

В. С. Кессельман

ВСЯ ФИЗИКА В ОДНОЙ КНИГЕ

От плоской Земли
до Большого взрыва



Москва ♦ Ижевск

2016

УДК 53
ББК 22.3
К368

Интернет-магазин
MATHESIS

<http://shop.rcd.ru>

- физика
 - математика
 - биология
 - нефтегазовые технологии
-

Кессельман В. С.
К368 Вся физика в одной книге: от плоской Земли до Большого взрыва. —
М.–Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2016. — 540 с.

ISBN 978-5-4344-0370-2

В книге подробно описаны все заметные открытия и сопутствующие им исторические обстоятельства по всем разделам классической и современной физики. Много внимания уделено изложению основ специальной теории относительности, квантовой механики, современной теории гравитации. Для чтения ряда разделов книги требуется знание основ дифференциального и интегрального исчисления.

Для любознательных школьников и студентов, руководителей физических кружков, а также для всех тех, кто хочет пополнить свои знания в одной из самых важных и увлекательных наук в процессе интересного и познавательного чтения.

ББК 22.3
УДК 53

ISBN 978-5-4344-0370-2

© В. С. Кессельман, 2016

Предисловие

Физика — наука о природе, изучающая наиболее общие свойства материального мира, важнейший источник знаний об окружающем мире. Будучи самыми базовыми и универсальными, законы физики лежат в основе всего естествознания. Практически любая естественная наука так или иначе связана с физикой. Физику считают теоретической основой современной техники, многие отрасли которой возникли на базе физических открытий.

Потребность в изучении окружающего мира привлекала на протяжении всей истории физики выдающихся ученых. Этими учеными было открыто и изучено огромное число явлений, которые не только интересны с точки зрения познания окружающего мира, но и нашли безмерно разнообразные применения в технике, технологии и повседневной жизни.

В предлагаемой книге подробно описаны все заметные открытия и сопутствующие им исторические обстоятельства. В этой книге рассказано полно, последовательно и неспешно о результатах, полученных учеными на разных этапах развития физики, и их разнообразных применениях в технике. В книге приведены описания реальных явлений, конкретных опытов, приведших к известным открытиям. При этом у читателя не должны остаться без ответа вопросы о том, *как и кем* совершено данное открытие, получен тот или иной физический закон. Поэтому даже те, кого при чтении этой книги заинтересуют лишь результаты открытий, найдут в ней материал, достаточно полно представляющий современную физику.

Много внимания уделено основам современной физики — специальной теории относительности (СТО), квантовой теории. Доступно изложена современная теории гравитации (ОТО), модели Вселенной (Большой взрыв, черные дыры, время в ОТО). Чтобы у читателя не сложилось представление, что принятые в этих теориях многими исследователями представления есть истина в последней инстанции, рассмотрены возражения, критика, которой подвергаются основные положения, легшие в основу современной физической картины мира. Как отмечал один из создателей квантовой физики Луи де Бройль, «каждый успех наших знаний ставит больше проблем, чем решает».

С нашей точки зрения, эта книга должна быть интересна и полезна. Похожих на эту книгу, насколько нам известно, не появлялось в последние несколько десятков лет. А за это время произошли важные открытия в физике, которые нашли применение в технике (достаточно вспомнить достижения нанотехнологии). Эти открытия нашли отражение в предлагаемой книге.

Мы определяем эту книгу как книгу для чтения по физике, рассчитанную как на любознательных школьников, желающих глубже изучить предмет, на преподавателей физики и руководителей физических кружков, студентов, так и на всех тех, кто хочет пополнить свои знания в одной из самых увлекательных и важных наук в процессе интересного и познавательного чтения.

«Ничто не дается даром в этом мире, и приобретение знания — труднейшая из всех задач, с какими человек может столкнуться. Человек идет к знанию так же, как он идет на войну — полностью пробужденный, полный страха, благоговения и безусловной решимости. Любое отступление от этого правила — роковая ошибка».

Карлос Кастанеда, американский антрополог и писатель (1925–1998)

Введение

Во все века человек никогда не переставал быть любознательным. Интерес человека к природе, жизненные потребности людей привели к появлению такой науки, как физика. Физика, одна из самых важных наук о природе, возникла в глубокой древности. Огромное ветвистое древо физики медленно произрастало из первых попыток истолкования явлений природы. Для познания окружающего мира человечеству пришлось пройти увлекательный, но мучительно длинный и трудный путь познания природы. На протяжении жизни сотни поколений человечество создавало каркас физической науки.

Всю историю физики можно условно разделить на четыре основных этапа:

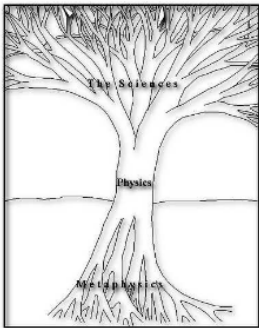
- древний;
- средневековый;
- этап классической физики;
- этап современной физики.

Первый этап развития физики иногда называют донаучным. Однако именно тогда были посеяны первые зерна естествознания. Уже у шумеров, вавилонян и египтян по отдельным вопросам физики были ценные знания, которые, однако, производят впечатление чего-то случайного, несистематического.

Но нам стоит быть благодарными предыдущим поколениям за многие открытия и достижения, сделанные ими.

Затем начался длительный этап, охватывающий период от времен Аристотеля до начала XVII века, то есть Античность и Средние века.

Назовем этот период метафизикой (метафизика — учение о причинах и началах бытия и знания). Начало третьего этапа — этапа классической физики — связывают с одним из основателей точного естествознания итальянским ученым Галилео Галилеем и основоположником классической физики, английским мате-



матиком, механиком, астрономом и физиком Исааком Ньютоном. Этот этап продолжался до конца XIX века. Именно трудами этих и других ученых были заложены основы той классической физики, которую изучают в школах и используют в большинстве практических расчетов в технике. Этот период составляет основу могучего древа физики.

К началу XX столетия появились экспериментальные результаты, которые трудно было объяснить в рамках классических представлений. Эти представления подверглись коренному пересмотру. В итоге открылся новый этап в развитии физики — этап современной физики, включающий не только квантовые, но и классические представления.

Физика всегда имела тесный контакт с соседними науками: астрономией, химией, минералогией. Еще теснее связь физики и математики. Математика стала орудием физика, только она дает возможность точного научного выражения законов природы и их применения к сложным процессам. Все эти области знания образуют крону древа современного естествознания.

Учебники физики содержат множество разных законов, описывающих разнообразные явления, пестрят огромным количеством формул. При этом нельзя забывать, что каждый закон, каждая формула не возникают в готовом виде. За ними огромное число наблюдений, постановка экспериментов, разочарование и радость постижения нового. Наука, как и искусство, немислима без имени творца.

Нам предстоит проделать длинный путь, который потребует терпения и упорства для постижения непростой науки — физики. Если временами будет трудно и, может быть, захочется остановиться, отказаться от дальнейшего пути, тогда стоит вспомнить слова Р. Роллана: «Жалеешь, что пошел по этой дороге, но еще больше жалеешь, если по ней не пошел».

В заключение я должен выразить благодарность Е. В. Огородниковой за большую работу, связанную с корректорской правкой, и важные замечания, а также Ю. В. Коробейниковой за пунктуальность (качество, почти утраченное повсеместно в наше время), которая сопровождала всю нашу работу над книгой.

В начале пути

Физики как науки еще нет, но люди накапливают знания о природе. Они задают природе «детские» вопросы, которые касаются принципиальных основ мироздания. Идет время, появляются ученые, сделавшие открытия, заложившие фундамент будущих исследований, без которого не могла бы появиться современная физика.

1. *Природа глазами древних людей. Пробуждение любознательности. Вселенная древних. Как измеряли время, расстояния и вес наши далекие предки. Наука «плоской Земли». Есть ли предел делению веществ? Система мира Аристотеля. Архимед. Простые механизмы не такие простые. «Золотое правило» механики. «Эврика!» Взгляды древних греков на Вселенную и Землю. Смелое предположение. Эратосфен измеряет Землю.*

Обычно, когда рассказывают о путешествии, всегда указывают место и время его начала. Но в нашем случае путешествия в физику ни о месте зарождения этой науки, ни о времени ее появления ничего определенного сказать нельзя.

Однако определенно можно утверждать, что люди всегда были любознательны. Они стремились объяснить окружающий мир таким, каким они его видели, то есть найти для всех явлений естественные, материальные причины. Но научных знаний у людей не было, законы природы были им неизвестны. Не зная природы многих явлений и событий, древний человек мог воспринимать их по большей части эмоционально, нежели разумно. Поэтому объяснение действительности неизбежно принимало фантастический характер. Как и современные люди, древний человек мог стать свидетелем таких причудливых природных явлений, как молния, «падение звезд» и метеоритов, кучевые облака, напоминающие лица или силуэты людей и животных, причудливые формы камней, скал, крон деревьев и т. п. Другого способа понять природу, кроме как уподоблять ее себе, живому существу, наделить ее чувствами и сознанием, у древнего человека не было.

Потребности повседневной жизни, развитие хозяйства, торгового обмена и наблюдения над природой приводили к постепенному накоплению первых научных знаний. Человек накапливал разнообразные знания не только о географической местности, в которой проживал, но и о животных, растениях, о самом себе. Он обогащался реальными знаниями о небесных светилах, об их движении, метеорологических явлениях и т. д. Накопленные знания и практические навыки, передаваясь от поколения к поколению, образовывали первоначальный фон будущей науки.

Вселенная древних была очень маленькой и тесной. И это не удивительно, ведь люди, создавая свои представления о ней, не имели другого масштаба, кроме земного. Какой же они представляли себе Землю?

Представление о форме Земли уходят в древние времена. Земля казалась древнему человеку плоской, поскольку кривизна земного шара незначительна на дистанции, которую человек способен обозреть с высоты собственного роста. Так как сдвиг линии горизонта замечен наблюдателю только с большой высоты, древний человек представлял Землю плоской равниной в силу объективных причин. Простые люди, обитавшие в пределах своих царств, имели лишь весьма смутное представление об их размерах и всю свою жизнь, от рождения до смерти, проводили в родной деревне, изредка посещая соседние селения. Такие представления были у людей во времена древних цивилизаций Месопотамии, Древнего Египта и позднее Греции.

Для человека тех времен шарообразная форма Земли стояла в резком противоречии с наличием силы тяжести, поскольку, по их представлениям, все тела должны были бы скатиться с круглой Земли «вниз». Людям казалось это совершенно очевидным.

Древний человек видел, что мир, в котором он живет, очень изменчив. Ничего не остается вокруг постоянным (В. С. Кессельман «Удивительная история физики», далее УИФ). Он замечал, что некоторые явления природы регулярно повторяются вновь и вновь: восход и заход Солнца, появление и исчезновение Луны, смена дня и ночи, приливы и отливы, смена времен года и т. п. Это давало возможность древнему человеку ориентироваться во времени. Так, уже в древности люди вели счет времени. Об этом говорят археологические данные. Желание человека соотнести течение собственной жизни с вечным движением небесных тел с незапамятных времен находило свое воплощение в различных средствах измерения времени.

Первым его помощником при этом было Солнце. После того как узнали, что направление тени удобно для определения времени, стали устанавливать солнечные часы, которые указывали время по передвигающейся с запада на восток тени.

Затем появился прибор для определения времени по изменению длины тени от вертикального стержня — гномон. Вертикальный предмет (шест, стела, колонна) позволял по наименьшей длине его тени (в полдень) определить угловую высоту солнца и время. На рисунке 1.1 показан гномон с небольшим вертикальным стержнем, укрепленным на плоской доске (или полушарии), разграфленной линиями. Это и был циферблат солнечных часов, а тень от стержня служила часовой стрелкой.



Рис. 1.1

В Древнем Египте гномоном служил вертикальный обелиск со шкалой, нанесенной на земле, а время измерялось по длине отбрасываемой тени. Этот обелиск, как говорят записи Аристофана (444–380 до н. э.), служил для почитания культа бога Солнца. Роль гномонов выполняли и прямые пилоны на общественных площадях, на рынках. Первые обелиски и пилоны, предназначавшиеся в Египте для измерения времени, были построены, по всей вероятности, уже в XIV в. до н. э.

Мы не задумываемся, почему на обычных часах стрелки идут, что называется, «по часовой стрелке»? А потому, что солнечная тень от гномона на солнеч-

ных часах также идет в том же направлении. Поэтому современные часы и пере-няли это движение от своих предков. Но вот если бы солнечные часы были бы изобретены в Южном полушарии, все было бы наоборот.

Природа поделила сутки на день и ночь, а человек стал отмечать «особые точки» дня и ночи уже по своему усмотрению. Однако начало суток у разных народов было разным: полночь — у древних египтян и римлян, полдень — у арабов, закат — у евреев и греков, заря — у славян.

В Риме первые солнечные часы изобрели только в 293 до н. э. Устройство солнечных часов является относительно простым и для того периода достаточно точно отмеряло время. Однако великое изобретение, солнечные часы, было встречено без той радости, какую оно бы заслуживало. На это есть указание в сохранившемся отрывке комедии римского поэта Плавта. Поэт заставляет одного кутилу произнести следующие слова: «Да погубят боги того, кто первый придумал час и воздвигнул солнечные часы, мне, бедному, по кускам сокращающие день. Прежде желудок был моими солнечными часами, из всех часов самыми лучшими и самыми верными. Везде эти часы приглашали к еде, кроме того случая, когда нечего было есть; теперь же и то, что имеется, не едят, если это не нравится солнцу».

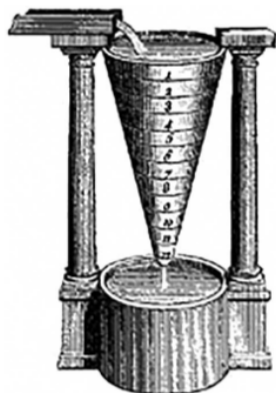


Рис. 1.2. Водяные часы

Солнечные часы имели один очевидный недостаток — все это хорошо только днем и в более-менее солнечную погоду. А как быть, когда небо покрыто тучами, или ночью? Выход был найден в изобретении водяных часов. Ночью солнечные часы заменяла клеписидра — «воровка воды» — так в Греции называли водяные часы, заимствованные из Вавилона или Египта. А в Китае они были еще раньше. Вначале водяные часы — это простой металлический или глиняный, а затем стеклянный сосуд, который наполняли водой. Медленно, капля за каплей, вытекала вода, уровень ее понижался, и деления на сосуде указывали, который час. Промежуток времени измерялся количеством воды, вытекавшей капля за каплей из малого отверстия, сделанного на дне сосуда. Таковы были водяные часы египтян, вавилонян, древних греков.

Сохранилась клеписидра, отмерявшая время для прений в афинском суде (УИФ).

Но не только часы были необходимы людям в их повседневной жизни. Постоянное сравнение окружающих объектов по их характерным свойствам требовало введения некоторых эталонов. И в первую очередь это относится к процедуре взвешивания, основанной на сравнении масс объектов, имеющей много-тысячелетнюю историю. Весы — один из древнейших приборов, изобретенных человеком. История весов уходит в глубь веков, и не случайно на многих языках слова «взвешивать» и «платить» — синонимы. Первые найденные археологами образцы весов относятся к V тысячелетию до н. э.

Согласно древнеегипетской «Книге мертвых» Анупис, бог с головой шакала, на входе в подземное царство взвешивает сердце всякого умершего на особых весах, где в качестве гири выступает богиня правосудия Маат (см. рис. 1.3). Этот инструмент хорошо виден на папирусе XIX династии (около 1250 года до н. э.).

А каменная стела из восточной Турции начала I тысячелетия до н. э. изображает хетта, использующего вместо поперечной планки балансовых весов собственный палец. Из Вавилона весы перешли к древним евреям. Ветхий Завет буквально пронизан проклятиями в адрес обманщиков, пользующихся неверными весами. Иегова внушает Израилю: «Не делайте неправды в суде, в мере, в весе и в измерении: да будут у вас весы верные и гири верные...»

Весы — полезное и, более того, необходимое изобретение, которое было весьма быстро освоено всеми народами Старого Света.

Ну а там, где весы, — там и гири. Исторически весы и гири появились с развитием торговли в странах Древней Месопотамии (Двуречья) и Египте. Именно в жарких болотах Месопотамии (что в переводе с греческого означает «между реками») зародилась история нашей собственной цивилизации более пяти тысяч лет назад. В основе самой первой в истории системы весовых единиц — древневавилонской — лежал вес одного хлебного зерна — грана. Зерна имели одинаковый размер и самой природой были уготованы для использования в качестве эталона для взвешивания. До последнего времени единица аптекарского веса называлась граном, что значит «зерно».

Позже люди начали сами изготавливать гири, виды которых зависели от местных условий: в Месопотамии гири изготавливались из камня или бронзы в виде груши, утки или льва; в Древнем Египте имели вид фигур и голов священных животных; греки применяли квадратные или прямоугольные пластины, круглые, конусообразные, трех- или многогранные куски свинца или бронзы; римляне использовали шары, кубики, круглые шайбы или призмы из бронзы, камня или свинца (УИФ).

Человек столкнулся с необходимостью измерений в глубокой древности, на раннем этапе своего развития, когда возникала необходимость изготавливать простейшие орудия труда, строить жилища. Но при строительстве жилища необходимо было устанавливать длины и углы, и в первую очередь прямой угол. И древние нашли выход в так называемом египетском треугольнике. Название треугольнику с отношением сторон 3 : 4 : 5 дали эллины: в VII–V веках до н. э. греческие философы и общественные деятели активно посещали Египет. Строился угол так: для построения прямого угла использовался шнур (или веревка), разделенный отметками (узлами) на 12 (3 + 4 + 5) частей: треугольник, построенный натяжением такого шнура, с весьма высокой точностью оказывался прямоугольным, и сами шнуры-катеты являлись направляющими для кладки прямого угла сооружения.



Рис. 1.3. Равноплечные весы, Древний Египет. На одной из чаш — гири, на другой — некий товар (слиток?). Внизу, на подставках, — наборы прямоугольных гирек. Сами весы вроде бы уже весьма совершенны: ось, коломысло, крюки, подвешенные на них чаши для взвешивания (Copyright The Oriental Institute of The University of Chicago)

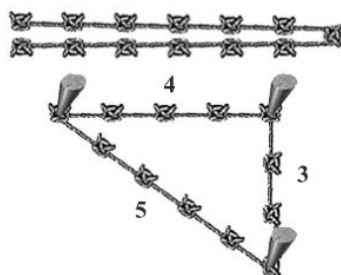


Рис. 1.4

Но измерять приходилось не только угол и длину. Со временем возникла необходимость в измерении площади, объема, емкости, массы, времени. Без измерений в практической жизни человеку было не обойтись. Первые единицы длины были весьма приблизительными. Они были связаны с размерами частей тела человека. Наш предок располагал только собственным ростом, длиной рук и ног. Если при счете человек пользовался пальцами рук и ног, то и при измерении длин и расстояний использовались руки и ноги. Не было народа, который не избрал бы свои единицы измерения. Например, строители египетских пирамид эталоном длины считали локоть — расстояние от локтя до конца среднего пальца. Почти у всех народов расстояние измерялось шагами, но для измерения полей и других больших расстояний шаг был слишком малой мерой. В Риме вводится большая мера, равная тысяче двойных шагов, получившая название милия (на латыни тысяча шагов — это *milia passum*). Постепенно это словосочетание сократилось до одного слова — милия. В программе Олимпийских игр Древней Эллады был бег на стадию. Эта мера была введена в Вавилоне, а затем перешла к грекам. За стадий принимали расстояние, которое человек проходит спокойным шагом за промежуток времени от появления первого луча солнца, при его восходе, до момента, когда солнечный диск целиком окажется над горизонтом. Это время приблизительно равно двум минутам. Установлено, что греческая стадия (или стадий) — это длина стадиона в Олимпии (192,27 м).

Так с древности человек осваивал различные способы измерений. С измерений началась, в частности, будущая физика.

Было время, когда философия была единственной наукой: не было ни физики, ни математики, ни астрономии. В то время люди предприняли первую попытку упорядочения взглядов на окружающий мир. При этом некоторые ученые сделали поразительные открытия: измерили Землю, «перенесли» Землю из центра мира во вращающуюся вокруг Солнца планету; сделали удивительные изобретения, некоторыми из которых мы пользуемся до сих пор. Все это происходило в век Античности, примерно 2500 лет тому назад.

Античность охватывает достаточно продолжительный отрезок времени (примерно от X в. до н. э. и до V в. н. э., т. е. до первых веков христианства) и относится к странам Передней Азии, Древней Греции и Древнего Рима. Наибольших успехов достигли науки в Древней Греции. Эта страна располагалась на небольшом пространстве, ограниченном в основном побережьем и островами Эгейского и Ионического морей. Именно Греция оказала определяющее влияние на развитие мирового естествознания. Само слово «физика» — греческого происхождения: *ta physika* (от *physics*) — природа. Множество научных открытий было совершено в Древней Греции, хотя родиной многих открытий и изобретений были также Китай и арабские страны. Особенно больших успехов греки достигли в математике и астрономии. Именно греки ввели понятие доказательства. Греческим мыслителям мы обязаны и другой важной идеей: о возможности объективного познания природы. Обладая интуицией и наблюдательностью, которые компенсировали отсутствие приборов (их тогда просто не было), греки получили много важных сведений о природе. Правда, были и подмены фактов различного рода вымыслом и догадками, что и неудивительно, учитывая время, когда все это происходило. Эти первые этапы научного мышления, развития естествознания получили название натуральной философии. Но и тогда античные

ученые стремились дать цельную картину мира, объясняя все явления на основе небольшого числа «начал». Некоторые древние мыслители свели все многообразие веществ к четырем: земле, воде, воздуху и огню (сейчас мы бы сказали, что все вещества бывают четырех видов: твердые тела, жидкости, газообразные и плазма). Хотя деление на 4 вида было известно грекам еще до Фалеса (624–547 гг. до н. э.), однако лишь Фалес первым подумал, что эти 4 элемента можно свести к одному первоэлементу, в качестве которого он назвал воду. Фалес полагал, что все рождается из воды; все возникает из воды и в нее превращается. Начало элементов, сухих вещей — вода; начало и конец Вселенной — вода. Все образуется из воды путем ее затвердевания/замерзания, а также испарения; при сгущении вода становится землей, при испарении становится воздухом. Причина образования/движения — дух, «гнездящийся» в воде. Свои географические, астрономические и физические познания Фалес связал в стройное философское представление о мире, материалистическое в основе, несмотря на ясные следы мифологических представлений. Он полагал, что сама Земля держится на воде и окружена со всех сторон океаном. Она пребывает на воде, как диск или доска, плавающая на поверхности водоема. Пример и доказательство всеобщей одушевленности Фалес видел в свойствах магнита и янтаря: так как магнит и янтарь способны приводить тела в движение, то, следовательно, они имеют душу (УИФ).

Все это кажется очень наивным. Но это на первый взгляд. На самом деле Фалес, высказавший мысль о том, что все вещи произошли из воды, по сути, произвел революционный переворот в мировоззрении, означавший отказ от мифологического объяснения явлений действительности в пользу представлений о них как превращении веществ. Поэтому Фалеса Милетского можно считать родоначальником греческой науки. Имя Фалеса уже в V веке до н. э. стало нарицательным для мудреца. «Отцом философии» Фалеса называли уже в древности.

Картина мира, построенная на основе этих воззрений, не нуждалась в божественном вмешательстве и в некотором смысле послужила основой современного учения о разных состояниях вещества и о его атомно-молекулярной структуре (конечно, на совершенно ином уровне).

Данная картина была дополнена Пифагором, внесшим идею объяснения явлений реальности на основе математической закономерности. Пифагор основал школу — пифагорейский союз, просуществовавший больше двух веков. В школе Пифагора впервые высказана догадка о шарообразности Земли. Мысль о том, что движение небесных тел подчиняется определенным математическим соотношениям, идеи «гармонии мира» и «музыки сфер», впоследствии приведшие к революции в астрономии, впервые появились именно в школе Пифагора. Однако в учении Пифагора в области физических явлений опытное познание подменялось мистикой чисел. Вместе с тем для развития физических концепций была важна установленная пифагорейцами возможность операций с физическими величинами при описании их числами.

В эпоху Античности, с ее попытками объяснить мир с помощью общих умозрительных гипотез и теорий, предвосхищалось немало позднейших научных открытий. Именно в эту эпоху зародились идеи об атомарном, дискретном строении материи. На эту идею натолкнула естественная мысль о возможности бесконечного дробления вещества на все более мелкие части. Можно предполагать, что использование в процессах измерения гирь различных масс также под-

разумевало равенство общей массы системы сумме составляющих масс ее отдельных компонентов. Это общее свойство массы мы определяем как аддитивность (то есть значение величины получается путем сложения частей, ее составляющих). А до каких пор можно разделять массу на отдельные части? На этот вопрос попытался ответить Демокрит (ок. 460–370 до н. э.), известный как создатель атомистической теории. Главным достижением философии Демокрита считается развитие им учения об атоме — неделимой частице вещества, обладающей истинным бытием, не разрушающейся и не возникающей. Он описал мир как систему атомов в пустоте, постулируя бесконечность их числа во Вселенной. Атомы, согласно этой теории, движутся в пустом пространстве (Великой Пустоте, как говорил Демокрит) хаотично, сталкиваются и вследствие соответствия форм, размеров, положений и порядков либо сцепляются, либо разлетаются. Образовавшиеся соединения держатся вместе и таким образом производят возникновение сложных тел. Само же движение — свойство, естественно присущее атомам. Тела — это комбинации атомов.

Теория Демокрита — это великая идея, которая должна была еще 2000 лет дожидаться своего научного воплощения. И хотя современность иначе представляет себе сами мельчайшие частицы, идея микроструктуры мира, позволяющая объяснить множество вещей, впервые была высказана Демокритом и его последователями — атомистами.

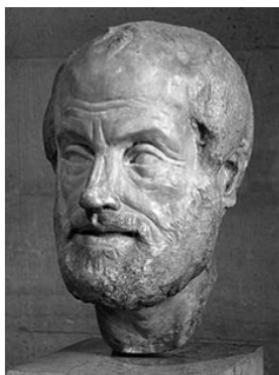


Рис. 1.5. Скульптура головы Аристотеля — копия работы Лисиппа (ок. 390 – ок. 300 до н. э.), Лувр

Период Античности — детство цивилизации. Перед взором древних людей мир представлялся как огромное скопление различных стихий, находящихся в непрерывных изменениях. Поиск устойчивого первоначала в изменчивом круговороте явлений необъятного космоса был главной целью великого Аристотеля (384–322 до н. э.). Ему было четырнадцать лет, когда умер Демокрит. В это время в Древней Греции существовала удивительная школа, где собирались лучшие умы того времени. Там обсуждались различные вопросы — от устройства природы до управления государством (В. С. Кессельман «Жизнеописания знаменитых физиков и астрономов»).

Эту школу создал знаменитый греческий философ Платон. Платоновская Академия была основана как религиозно-философский союз приблизительно в 387 году до н. э. близ Афин, в садах, посвященных мифическому герою Академу. В 366 г. до н. э. в Академии появился новый ученик, и звали его Аристотель. Тогда ему было 18 лет. Аристотель провел в обществе Платона семнадцать лет. Есть основание думать, что Платон любил своего гениального и непокорного ученика и не только передал ему все свои познания, но и перелил в него всю свою душу. Между учителем и учеником образовалась самая тесная связь, хотя и с временными размолвками и примирениями. После смерти Платона Аристотель жил в столице Македонии Пелле. Вернувшись в Грецию, в 343–335 г. до н. э. был воспитателем Александра Македонского. Последний очень ценил Аристотеля: «Я чту Аристотеля наравне со своим отцом, так как если отцу я обязан жизнью, то Аристотелю обязан всем, что дает ей цену». Аристотель

вернулся в Афины и основал там при всесторонней поддержке венценосного покровителя школу «Лицей», которой руководил в течение 12 лет. Школа получила свое название от храма Аполлона Ликейского. Аристотель был первым мыслителем, создавшим всестороннюю систему философии, охватившую все сферы человеческого развития — социологию, философию, политику, логику, физику. Он так много сделал, что его объяснение мира держалось незыблемым восемнадцать веков. Фигура Аристотеля оказала огромное влияние на развитие науки, на многие века его имя стало непревзойденным авторитетом в науке.

В основе мира, по Аристотелю, лежала геоцентрическая система (от «гео» — «земля»). Его исследования относятся к области механики, акустики, оптики. Особый интерес представляет учение о движении, которое, по Аристотелю, есть любое количественное и качественное изменение, благодаря которому явление реализуется.

Учение о движении Аристотеля господствовало в физике до эпохи Возрождения, и, несмотря на выявленные существенные ошибки и заблуждения, ряд принципиальных представлений остался до сегодняшнего дня.

Бурные события IV – начала III в. до н. э., связанные с завоеваниями Александра Македонского, сильно изменили тогдашний мир. Изменились и судьбы людей, населявших эллинистический мир. Основанные Александром города и колонизация греками новых территорий в Азии содействовали распространению греческой культуры на Востоке. Мир новых государств в масштабах земного шара, правда, был по-прежнему небольшой. Он занимал весьма маленькую полосу земли: от Северного моря до Сахары, от Атлантического океана до Индии. Эта «обитаемая земля» по-гречески называлась «ойкумена». Люди, как и в прежние века, мало знали об окружающем их мире. Человек мог родиться, прожить всю жизнь и умереть в одном и том же месте. И вся жизнь могла ограничиться для него тесным кругом ближних и дальних родственников, соседей и знакомых. И все занятия ограничивались бы выращиванием оливковых деревьев и виноградника, выпасом коз да рыбной ловлей. Но и среди этих людей появились фигуры, намного опередившие свое время.

Для нашего дальнейшего повествования из всех государств эллинистического мира самыми важными являются Древняя Греция и Египет.

Египет в рассматриваемое время почти не изменился со времен фараонов, все также стояли храмы на берегах великой реки и крестьяне трудились на своих наделах, караваны барок с зерном, льном, кожами спускались вниз по Нилу к великому городу Александрии. Все силы Египта уходило на то, чтобы обеспечить благоденствие обитателей этого огромного города. Славу Александрии составляла знаменитая Александрийская библиотека, входящая в состав Мусейона (дословно — «храм муз»), откуда впоследствии и произошло современное слово «музей». В основу библиотеки легли книги, собранные, в частности, Аристотелем. А прообразом Александрийского Мусейона и библиотеки послужило устройство афинского Ликей.

В библиотеке имелось, по некоторым данным, сотни тысяч свитков пергамента, содержавших сведения по различным наукам на многих языках того времени. Александрийская библиотека представляла собой более академию, чем обычное собрание книг: здесь жили и работали ученые, занимавшиеся как исследованиями, так и преподаванием. Отовсюду съезжались к Александрийскому

дворцу знаменитые писатели и ученые, особенно из Греции: из Афин в Александрию (километров триста) на корабле того времени можно было добраться менее чем за трое суток. Они получали бесплатную квартиру в музее, были освобождены от всех налогов и повинностей, их обязанностью было только прославлять царя. Поэт Тимон с насмешкой писал о деятелях музея: «В многоплеменном Египте многочисленные кропотели книг откармливаются в клетке муз».

Знаменитые ученые, собранные с различных концов мира, жили при храме Муз на полном иждивении царя; они обедали совместно, и эти обеды сопровождались научными беседами на самые различные темы. Античный мир породил фигуры, внесшие важный вклад в формирование основ современной физики. Одним из первых следует назвать Архимеда (ок. 287–212 до н. э.). Архимед — великий предтеча современной физики, один из самых замечательных ученых Древней Греции. Память о нем обросла вымыслами и легендами. Архимед родился в 287 г. до н. э. в Сиракузах, на острове Сицилия. Сицилия в те времена была дальним западным форпостом греческой культуры. В годы детства Архимеда эпирский царь Пирр вел здесь войну с римлянами и карфагенянами, пытаясь создать новое греческое государство. В этой войне отличился один из родственников Архимеда — Гиерон, ставший в 270 г. до н. э. правителем Сиракуз. Отец Архимеда, астроном Фидий, был одним из приближенных Гиерона, и это открыло ему возможность дать сыну хорошее образование.

Уже при жизни Архимеда вокруг его имени создавались легенды, поводом для которых служили его поразительные изобретения. Работы Архимеда относились почти ко всем областям математики того времени. В труде «Об измерении круга» Архимед вычислил число «пи» — отношение длины окружности к диаметру — и доказал, что оно одинаково для любого круга. Лучшим своим достижением он считал определение поверхности и объема шара — задача, которую до него никто решить не мог. Возможно поэтому Архимед просил выбить на своей могиле шар, вписанный в цилиндр.

Занимаясь практическими вопросами, Архимед исследовал принципы, лежащие в основе так называемых простых механизмов. И, в первую очередь, — рычага. Человек стал использовать рычаг еще в доисторические времена, интуитивно понимая его принцип. Такие инструменты, как мотыга или весло, применялись, чтобы уменьшить силу, которую необходимо было прикладывать человеку. В пятом тысячелетии до нашей эры в Месопотамии применялись весы, основанные на принципе рычага для достижения равновесия. Позже в Греции был изобретен безмен, позволивший изменять плечо приложения силы, что сделало использование весов более удобным. Наши далекие предки постоянно пользовались рычагом для того, чтобы приподнимать и сдвигать с места тяжелые камни и бревна. Рычаг позволяет достигнуть многократного выигрыша в силе самыми простыми и доступными средствами. Положив длинный и крепкий шест на обрубок полена (опору) и подсунув второй конец его под камень, человек превращал шест в простейший рычаг.

Около 1500 года до н. э. в Египте и Индии появляется шадуф (колодец с «журавлем»), прародитель современных кранов, устройство для поднимания сосудов с водой. Первое письменное объяснение принципа действия рычага дал Архимед, связав понятия силы, груза и плеча. Закон равновесия, сформулированный им, используется до сих пор и звучит так: «Усилие, умноженное на плечо

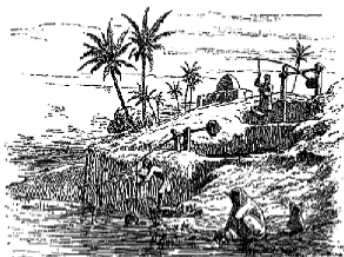


Рис. 1.6. Древний колодец с журавлем. Фивы (www.libma.ru)

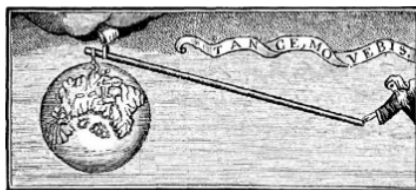


Рис. 1.7. «Архимед рычагом поднимает Землю» (гравюра из книги Вариньона (1787) о механике)

приложения силы, равно нагрузке, умноженной на плечо приложения нагрузки, где плечо приложения силы — это расстояние от точки приложения силы до опоры, а плечо приложения нагрузки — это расстояние от точки приложения нагрузки до опоры». По легенде, осознав значение своего открытия, Архимед воскликнул: «Дайте мне точку опоры, и я переверну Землю!»

В течение многих веков фундаментом механики была теория рычага, изложенная Архимедом в сочинении «О равновесии плоских фигур».

Фактически Архимед является создателем механики как науки, изучающей законы движения, покоя и равновесия тел.

Не обошел проблему равновесия тел и талантливый энциклопедист Герон Александрийский. Великий изобретатель древности родился в Александрии, отсюда и вторая часть его имени — Александрийский. О временном периоде, в который он жил и работал, спорят и по сей день. Точно, что после Архимеда, поскольку в своих работах он ссылаялся на его труды. Слава Герона была настолько велика, что книги с его именем имелись даже в эпоху Византии. Основной закон работы машины Герон формулирует так: *если при пользовании машиной требуется увеличение силы, то в результате происходит замедление, ибо чем менее движущая сила по отношению к движимой тяжести, тем больше потребуется и времени; таким образом, сила к силе и время ко времени находятся в том же самом обратном отношении.* Это и есть знаменитое золотое правило античной механики: что выигрывается в силе, то теряется в скорости. Со времен последователей Архимеда механику стали считать наукой о простых машинах: воротах, рычагах, блоках, клине и винте. Два последних основаны на свойствах наклонной плоскости, закон действия которой, правда, самому Архимеду известен не был.

Наиболее понятно золотое правило механики демонстрирует рычаг. Объяснение действия рычага, данное Архимедом, связано с понятиями силы, груза и плеча. В равновесии $F_{\text{тяж}} \cdot l_1 = F \cdot l_2$. Отсюда видно, что можно получить выигрыш в силе F за счет длины плеча. Если $l_2 > l_1$ в несколько раз, то выигрыш в затраченном усилии будет значительным — приложенная сила окажется много меньше силы тяжести, обусловленной весом поднимаемого груза.

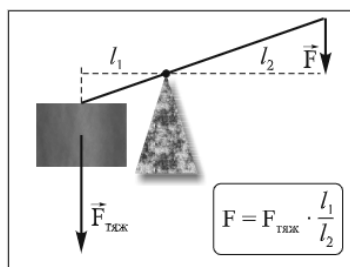


Рис. 1.8. Схема рычага

Известно, что при необходимости втащить груз на определенную высоту всегда легче воспользоваться пологим подъемом, чем крутым. Причем чем более пологий уклон, тем легче выполнить эту работу. Правда, все, что выигрывается в силе, теряется в расстоянии, ибо во сколько раз уменьшается наше усилие, во столько же раз возрастает расстояние, на которое придется тащить груз. Однако в тех случаях, когда время и расстояние не играют большой роли, а важна сама цель — поднять груз с наименьшим усилием, наклонная плоскость оказывается незаменимым помощником.

Наклонные плоскости — неотъемлемая часть и нашей сегодняшней жизни. Нельзя обойтись без знаний о наклонных плоскостях при строительстве автомобильных и железных дорог, в особенности на пересеченной или горной местности, при проектировании фуникулеров и эскалаторов, при прокладке горнолыжных спусков и возведении трамплинов, при организации аттракционов или оборудовании пандусов для инвалидов, при исследовании сползания ледников и схода лавин...

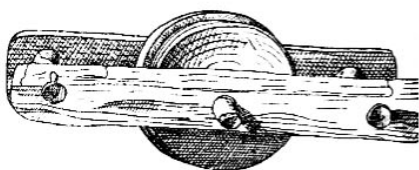


Рис. 1.9. Деревянный блок древних египтян (Лейденский музей)

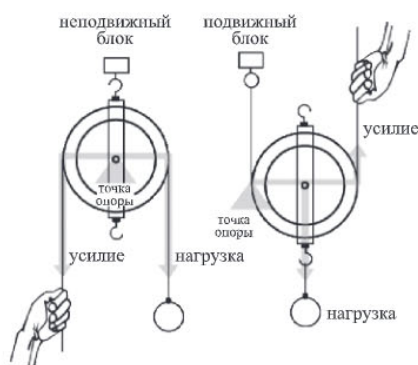


Рис. 1.10. Блоки

Еще одним механизмом, получившим распространение в древности, является неподвижный блок. Он представляет собой колесо с желобом, ось которого жестко прикреплена к стене или потолочной балке. Перекинув через колесо веревку и прикрепив ее противоположный конец к грузу, можно поднять его на высоту крепления блока.

Блоки по устройству бывают двух видов. *Неподвижным блоком* называют такой блок, ось которого закреплена и при подъеме грузов не поднимается и не опускается. Неподвижный блок можно рассматривать как равноплечный рычаг, у которого плечи равны радиусу колеса. Такой блок не дает выигрыш в силе, но позволяет менять направление действия силы. Это зачастую при подъеме тяжестей тоже играет большую роль. *Подвижный блок* — блок, ось которого поднимается и опускается вместе с грузом. Подвижный блок дает выигрыш в силе в два раза.

Существует легенда, будто построенный Гиероном в подарок египетскому царю Птолемею тяжелый многопалубный корабль «Сиракузия» никак не удавалось спустить на воду. Архимед соорудил систему блоков, с помощью которой он смог проделать эту работу одним движением руки.

При всей своей примитивности простые механизмы многократно расширяли возможности древнего человека. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно вспомнить о гигантских постройках древних египтян — пирамидах, огромных обелисках и статуях. Пример, который показывает, что простые механизмы не дают выигрыша в работе. Доказательство этого, конечно, дано на основе знаний,

которые были получены много веков спустя от рассматриваемого здесь времени. Но считаем уместным рассмотреть этот пример здесь, а читатель может обратиться к нему позже, после ознакомления с механикой.

Рассмотрим наклонную плоскость (см. рис. 1.11). Спроецируем действующие силы на ось X : $F = mgs \sin \alpha = mgh/l$. Отсюда $F/mg = h/l$, т. е. для равномерного поднятия груза с помощью наклонной плоскости необходимо приложить силу, во столько раз меньшую силы тяжести груза, во сколько раз длина наклонной плоскости больше ее высоты.

А дают ли простые механизмы выигрыш в работе? Рассчитаем работу, которую совершает сила F при подъеме груза с помощью наклонной плоскости. Работа силы F : $A_F = F/l$ (см. рис. 1.11). В свою очередь, сила $F = mgh/l$ (m — масса груза). Подставляя эти най-

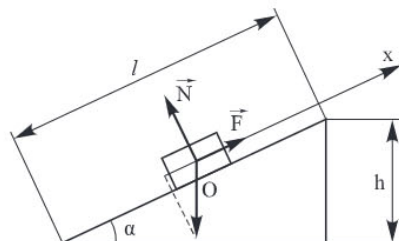


Рис. 1.11. К расчету силы и работы на наклонной плоскости

денные значения силы, получим $A_F = mgh$. Таким образом, работа A_F равна работе, которую нужно совершить, чтобы равномерно поднять груз на высоту h , не используя наклонной плоскости. Также можно видеть, что при фиксированной высоте наклонной плоскости выигрыш в силе тем больше, чем больше длина наклонной плоскости. Факт, используемый на практике, когда нужно передвинуть тяжелый груз на какую-то высоту.

Не дает выигрыша в работе и рычаг. При использовании неподвижного блока мы видим, что приложенные силы F и mg равны и пути, пройденные точками приложения сил при подъеме груза, тоже одинаковы, а значит, одинаковы и работы. Чтобы при помощи подвижного блока поднять груз на высоту h , необходимо конец веревки, к которому приложена сила F , переместить на $2h$. Следовательно, $A_1 = mgh$ и $A_2 = F \cdot 2h = (mg/2)2h = mgh$. Блок позволяет изменять направление действия силы.

При подъеме груза с помощью подвижного блока получается выигрыш в силе в два раза, так как плечо силы тяжести вдвое меньше плеча силы натяжения троса. Но при вытягивании троса на длину l груз поднимается на высоту $l/2$, следовательно, неподвижный блок также не дает выигрыша в работе. Таким образом, получая выигрыш в силе в два раза, проигрывают в два раза в перемещении, следовательно, и подвижный блок выигрыша в работе не дает.

Ни один из простых механизмов не дает выигрыша в работе.

Памятка путешественнику по физике. В завершение нашего путешествия по простым механизмам посмотрим на них с точки зрения знаний физической науки века этак восемнадцатого, когда физика уже обладала многими фактами. Это позволит сделать несколько замечаний относительно рассмотренных простых механизмов. Обычно в школьных задачах по физике модели простых механизмов наделяют идеальными свойствами. Например, в модели рычага считается, что это недеформируемое и невесомое тело. Модель нити (каната, троса) предполагает, что это гибкое, неупругое и невесомое тело, имеющее нулевой поперечный размер и имеющее определенную длину. Длина модельной нити неизменна — нить нерастяжима. Модельная неподвижная наклонная плоскость — это жесткое тело, у которого в зависимости от условий задачи поверхность может быть гладкой или шероховатой. По гладкой поверхности тела

скользят без трения, а по шероховатой поверхности тела катятся без проскальзывания. Во всех перечисленных случаях суммарная работа всех сил, действовавших на рабочее тело простого механизма (на рычаг, нить, плоскость), равна нулю, что соответствует золотому правилу механики. Отсюда следует, что простой механизм выполняет роль своеобразного трансформатора, который позволяет изменять величину и направление силы, с помощью которой совершается желаемое действие. *Реальные простые механизмы* обладают лишь приблизительно теми идеальными свойствами, которыми их наделяют авторы школьных задач по физике. Например, на самом деле не существует абсолютно жестких (недеформируемых) тел, невозможно полностью избавиться от трения между осями блока и шкивом и т. д. При учете неидеальности рассматриваемого механизма оказывается, что суммарная работа всех сил, действовавших на рабочее тело простого механизма, не всегда равна нулю. В частности, присутствие трения скольжения приводит к выделению тепловой энергии. Золотое правило механики, таким образом, получено на основе некоторых *модельных представлений*. Физики активно прибегали в прошлом и в настоящее время к использованию моделей. Мы будем в процессе нашего путешествия встречаться с разнообразными физическими моделями — жидкости, света, атома... Конечно, ни одна модель не может быть безупречной. Но на базе модели могут быть получены важные результаты, которые в дальнейшем составят теорию. Теория рассматривает явление более детально и дает возможность решать сложные задачи науки и техники.

А теперь вернемся к трудам Архимеда. Многие работы Архимеда касались гидростатики и плавания тел. Появление этих работ было непосредственно связано с решением технических задач. Великий сиракузец изучал силы, действующие на тела, и среди них — силу тяжести. Он открыл закон, согласно которому на тело, погруженное в жидкость, действует сила, равная весу вытесненной им жидкости. Это открытие связано с легендой, передаваемой многими историками. Согласно легенде упомянутый выше Гиерон, тиран Сиракуз, поручил ему выяснить, сделана ли его корона целиком из золота или же в нее подмешано серебро. Эта задача занимала Архимеда довольно долго, пока не помог случай. Однажды, приподнявши ногу в воде, Архимед констатировал с удивлением, что в воде нога стала легче. Он понял, что это явление даст ему ключ к разгадке задачи. С криком «Эврика!» («Нашел!») он выскочил из ванны, позабыв обо всем на свете. Настолько поразила его мысль, пришедшая в ванне. Этот известный исторический анекдот не совсем точен. Вот как пишет римский архитектор Витрувий, сообщая о поразивших его открытиях разных ученых: «Что касается Архимеда, то из всех его многочисленных и разнообразных открытий то открытие, о котором я расскажу, представляется мне сделанным с безграничным остроумием. Во время своего царствования в Сиракузах Гиерон после благополучного окончания всех своих мероприятий дал обет пожертвовать в какой-то храм золотую корону бессмертным богам. Он условился с мастером о большой цене за работу и дал ему нужное по весу количество золота. В назначенный день мастер принес свою работу царю, который нашел ее отлично исполненной; после взвешивания корона оказалась соответствующей выданному весу золота. После этого был сделан донос, что из короны была взя-

та часть золота и вместо него примешано такое же количество серебра. Гиерон разгневался на то, что его провели и, не находя способа уличить это воровство, попросил Архимеда хорошенько подумать об этом. Тот, погруженный в думы по этому вопросу, как-то случайно пришел в баню и там, опустившись в ванну, заметил, что из нее вытекает такое количество воды, каков объем его тела, погруженного в ванну. Выяснив себе ценность этого факта, он, недолго думая, выскочил с радостью из ванны, пошел домой голым и громким голосом сообщал всем, что он нашел то, что искал. Он бежал и кричал одно и то же по-гречески: «Эврика, эврика!» («Я нашел!»). Затем, исходя из своего открытия, он, говорят, сделал два слитка, каждый такого же веса, какого была корона, один из золота, другой из серебра. Сделав это, он наполнил сосуд до самых краев и опустил в него серебряный слиток, и... соответственное ему количество воды вытекло. Вынув слиток, он долил в сосуд такое же количество воды..., отмеряя вливаемую воду секстарием (0,547 л), чтобы, как прежде, сосуд был наполнен водой до самых краев. Так он нашел, какой вес серебра соответствует какому определенному объему воды. Произведя такое исследование, он таким же образом опустил золотой слиток и, добавив той же меркой вылившееся количество воды, нашел на основании меньшего количества секстантов воды, насколько меньший объем занимает слиток».

Потом тем же методом был определен объем короны. Она вытеснила воды больше, чем золотой слиток, и кража была доказана.

Часто этот рассказ связывают с открытием закона Архимеда, хотя он касается способа определения объема тел неправильной формы.

Если верить описанию Витрувия, то следует признать, что, по сути дела, Архимед является автором методики определения удельного веса тел путем измерения их объема погружением в жидкость. Каждому школьнику известно, что удельный вес металлов есть в любом справочнике, определить удельный вес сплава совсем не трудно: взял образец, взвесил его, потом опустил в воду и определил объем вытесненной им жидкости, поделил первое число на второе и по соотношению удельных весов нашел долю каждого металла. Вот и вся премудрость. Сейчас все кажется очень простым. Но тогда Архимеду понадобились долгие мучительные размышления, чтобы найти решение поставленной перед ним задачи и воскликнуть в конце «Эврика!». Стоит процитировать Эрнеста Ренана: «Каждый школьник знает теперь истины, за которые Архимед отдал бы жизнь».

Первое сочинение по гидростатике принадлежит Архимеду, выходит, оно написано ранее 212 г. до н. э. Дошло до нас оно не в подлиннике, но в переводе на латинский язык, под заглавием: «*De his quae vehuntur in aqua*» («О телах, плавающих в воде») и притом в неполном виде. В эпоху Возрождения сочинение это было восстановлено и снабжено необходимыми комментариями математиками Гвидо Убальди-дель-Монте (1545–1607), верным другом и покровителем Галилея, и Федерико Коммандином (1509–1575).



Рис. 1.12. Архимед («Эврика!»); иллюстрация к базельскому изданию 1575 года «Десяти книг об архитектуре» Витрувия

Достижения древнегреческих ученых не ограничиваются достижениями Архимеда. Еще ранее Архимеда появился ученый, высказавший смелые предположения о Земле и ее положении в космосе.

В III в. до н. э. Аристарх Самосский (320—около 250 до н. э.), как принято считать, впервые (во всяком случае, публично) высказал гипотезу, что все планеты вращаются вокруг Солнца, причем Земля является одной из них, совершая оборот вокруг дневного светила за один год, вращаясь при этом вокруг оси с периодом в одни сутки. По сути, впервые была описана гелиоцентрическая система мира. Возможно, на столь крамольную идею его подвигла уверенность, что малые объекты должны вращаться вокруг больших, то есть планеты должны вращаться вокруг Солнца. Подавляющее большинство астрономов и философов, однако, не сомневалось в неподвижности Земли. Это навлекло на Аристарха Самосского обвинение в неблагочестии со стороны поэта и философа Клеанфа. По свидетельству Плутарха, «Клеанф полагал, что греки должны привлечь [Аристарха Самосского] к суду за то, что он будто двигает с места Очаг мира», имея в виду Землю. Ученый вынужден был бежать из Афин. Гелиоцентрическая система получила развитие лишь по прошествии почти 1800 лет в трудах Коперника и его последователей. А от Аристарха Самосского до нас дошло единственное произведение — трактат «О размерах Солнца и Луны и расстояниях до них». В нем изложен геометрический метод оценки относительных расстояний до Солнца и Луны. Чтобы оценить деяния этого ученого, надо учесть уровень знаний, господствовавший в те времена. А во времена Аристарха Самосского одни древнегреческие ученые считали, что Солнце имеет размер ступни, другие — что Солнце по размерам больше Пелопоннеса. Аристарх использовал научный метод, основанный на наблюдении лунных фаз и солнечных и лунных затмений. Его построения основаны на предположении, что Луна имеет форму шара и заимствует свет от Солнца. Следовательно, если Луна находится в квадратуре, то есть

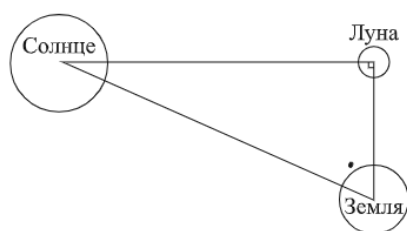


Рис. 1.13. Схема взаимного расположения Солнца, Луны и Земли во время квадратуры (Википедия)

выглядит рассеченной пополам, то угол «Земля—Луна—Солнце» является прямым (см. рис. 1.13). Следовательно, треугольник получается прямоугольный. Аристарх измерил угол между направлениями на Луну и на Солнце. Угол у Солнца α составил 3° . Ранее Аристарх измерил размер Луны, используя для этого лунное затмение. Проведя соответствующие измерения, Аристарх получил, что диаметры Земли и Луны относятся друг к другу как 2,5 к 1. Эти знания позволили Аристарху вычислить расстояние от Луны до Земли в земных радиусах.

По измерениям ученого получаем, что Солнце примерно в 19 раз дальше от Земли, чем Луна. По современным данным, ошибка значительная. Но во времена Аристарха еще не было тригонометрических функций (собственно, он сам в том же самом сочинении «О величинах и расстояниях Солнца и Луны» закладывал основы тригонометрии). Поэтому для вычисления этого расстояния ему приходилось использовать довольно сложные выкладки, подробно описанные в упомянутом трактате. Расстояние до Солнца Аристарх недооценил при-

мерно в 20 раз. Причина ошибки заключалась в том, что момент лунной квадратуры мог быть установлен только с очень большой неопределенностью, которая ведет к неопределенности значения угла α и, следовательно, к неопределенности расстояния до Солнца. Таким образом, метод Аристарха был достаточно несовершенным, неустойчивым к ошибкам. Но это был единственный метод, доступный в древности.

Однако вернемся к Земле. Пока люди не совершали путешествий на далекие расстояния, Земля представлялась им плоской. Так, Гомер утверждал, что Земля представляет собой плоский диск, окруженный постоянно движущимся потоками океана. Он сделал вывод, что именно такую форму имеет Земля, основываясь на том, что существует горизонт, и видах, которые открываются с вершин гор или на берегу моря. Невелики, скудны были познания Гомера о Земле. Но, как уже отмечалось, древние люди были весьма наблюдательны и о том, что Земля — это шар, догадывались. Идея шарообразности Земли была известна египтянам задолго до греков. На чем были основаны их догадки?

Одно из первых явлений, подмеченных людьми в древности и заставивших их заподозрить, что Земля шарообразна, состоит в следующем. Если плыть по морю или идти по совершенно ровной местности, приближаясь к берегу моря или к какому-нибудь городу, то сперва на горизонте становятся видны только верхушки самых высоких мачт или зданий, и лишь по мере движения взору открываются весь корабль и дома пониже.

Или вот такое явление природы, как лунное затмение. Древние поняли, что оно свидетельствует о том, что Земля — шар. Действительно, в самом начале затмения Луна видна в виде полного круга, затем левый ее край начинает темнеть, а спустя немного времени Луна перестает быть видна. Затем на правой стороне Луны появляется дугообразная область света, и через некоторое время Луна «рождается» заново.

Для наблюдений небесного свода у древних уже был некоторый инструментарий. Он появился из потребностей практической деятельности людей — с началом освоения земледелия, когда нужно было планировать сельскохозяйственные работы. Для этого нужно было определять моменты равноденствий и солнцестояний.

Одновременно и нужды кочевого животноводства требовали освоения методов ориентирования. А для этого изучались звезды, их движение. А с освоением мореплавания возникает потребность изучать и само небо. Так, уже во времена древних восточных деспотий (Шумер, Ассирия, Вавилон, Египет) возникают принципы систематизации небесных объектов. Так что измерению самой Земли предшествовал длительный период накопления первоначальных астрономических знаний.

Первое измерение дуги меридиана и вычисление радиуса Земли произвел Эратосфен (ок. 275–194 до н. э.), современник Архимеда. С раннего возраста Эратосфен жил в Александрии, здесь он и получил образование под руководством своего ученого земляка Каллимаха, стоявшего во главе Александрийской библиотеки. Неудовлетворенный познаниями, приобретенными в Александрии, Эратосфен отправился в Афины, где там так тесно сблизился со школой Платона, что обыкновенно называл себя платоником. Результатом изучения наук в этих обоих центрах древнегреческого просвещения явилось то, что его познания были

очень разносторонними, почти энциклопедическая эрудиция. Самое знаменитое деяние Эратосфена — измерение (и притом поразительно точное для тех времен) радиуса Земли. Как он это сделал?

Эратосфен сравнивал направление вертикали, проведенной к данному участку поверхности земного шара, с направлением параллельного пучка солнечных лучей в двух пунктах, отстоящих друг от друга на известном расстоянии. Вот как он описывает эту процедуру (краткое изложение этой работы известно нам по трактату Клеомеда «О круговращении небесного свода»): «Далее, вообразим две прямые, опускающиеся под Землю от каждого гномона и встречающиеся в центре Земли. Солнечные часы в Сиене находятся отвесно под Солнцем, и воображаемая прямая проходит от Солнца через вершину гномона солнечных часов, производя одну прямую от Солнца до центра Земли. Вообразим еще одну прямую, проведенную от конца тени гномона через вершину гномона к Солнцу на чаше в Александрии; и она будет параллельна уже названной прямой, поскольку уже сказано, что прямые от разных частей Солнца к разным частям Земли параллельны. Прямая, проведенная от центра Земли к гномону

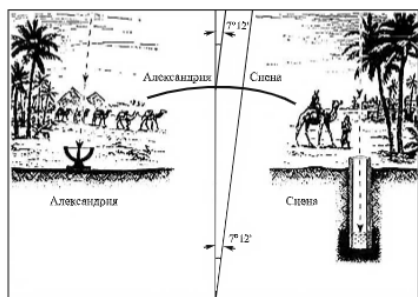


Рис. 1.14. Определение размеров Земли по наблюдениям Солнца из двух точек на земной поверхности (stargazers.pp.ru/howtomeasureearth.html)



Рис. 1.15. Скафис — древний прибор для определения высоты солнца над горизонтом (в разрезе)

в Александрии, образует с этими параллельными равные накрест лежащие углы. Один из них — с вершиной в центре Земли, при встрече прямых, проведенных от солнечных часов к центру Земли, а другой — с вершиной на конце гномона в Александрии, при встрече с прямой, идущей от этого конца к концу его же тени от Солнца, там, где эти прямые встречаются наверху». Но надежных часов, которые можно было бы сравнивать и переносить с места на место, у него не было, поэтому он обеспечивал одновременность наблюдений, выбирая полдень (когда Солнце находится в самом высоком положении) одного и того же дня в пунктах, расположенных на одной и той же долготе. Он проводил наблюдения в Александрии, где работал, и сравнивал их с наблюдениями, проводившимися некогда в Сиене, в 800 км южнее (в действительности это расстояние в древности измерялось в стадиях). От купцов и погонщиков верблюдов он знал, что на юге Египта в городе Сиене (ныне Асуан) Солнце в полдень 22 июня освещает дно глубоких колодцев и, следовательно, находится в зените (зенит — наивысшая точка на небосводе, небесной сфере), то есть сияет прямо над головой. Угол между лучом, направленным из глаза наблюдателя на светило, и вертикальным направлением называется зенитным расстоянием светила (z) (см. рис. 1.14). Для измерения зенитного расстояния Солнца Эратосфен изобрел специальный прибор — скафис.

Скафис представляет собой чашу в виде полусферы, на дне которой закреплен металлический стержень. На внутреннюю полость скафиса наносятся деления в градусах. Скафис устанавливают по отвесу так, чтобы стержень, направленный по радиусу сферы, занимал строго вертикальное положение, т. е. был направлен на зенит. На освещенной Солнцем внутренней полости скафиса должна быть тень, которую отбрасывает стержень. Дуга, измеряемая в градусах от основания стержня до конца тени, равна зенитному расстоянию Солнца.

Итак, полуденное Солнце находилось в Сиене в этот день вертикально над головой наблюдателя. Эратосфен измерил в полдень того же дня длину тени, отбрасываемой обелиском в Александрии, и нашел, что направление солнечных лучей составляет около $7,5^\circ$ (по некоторым данным $7,2^\circ$) с вертикалью. В этих опытах вертикали (радиус Земли) имели различные направления. Отсюда следовало, что радиусы Земли в Александрии и в Сиене пересекаются в центре Земли под углом в $7,5^\circ$. Если этот угол соответствует 800 километрам, то скольким милям будет соответствовать полная окружность, то есть 360° , рассчитать несложно. Таким образом Эратосфен рассчитал радиус Земли. Остается, однако, спорным, получилось ли у Эратосфена в итоге 250 000 стадий (согласно Клеомеду) или 252 000 (по сообщению Страбона и Теона Смирнского). Определить, насколько эти оценки близки к реальности (радиусу Земли), трудно, поскольку неизвестно, каким именно стадием пользовался Эратосфен. Однако если принять за стадию длину в 600 футов (180 см), как в большинстве систем мер, то диаметр Земли окажется всего лишь на 80 км меньше, чем фактический полярный диаметр!

Заметим, что первое измерение длины градуса меридиана в Европе было произведено Ж. Фернелем в 1528 году, т. е. примерно 1800 лет спустя после измерений Эратосфена. Им была получена величина 110,6 км (современное среднее значение — 111,1 км), что соответствует радиусу Земли около 6340 км.

Были и другие замечательные греческие ученые и изобретатели. Уже упоминавшийся в связи с золотым правилом механики Герон считается величайшим инженером за всю историю человечества. Лишь почти через 2000 лет были найдены и переведены на современные языки арабские списки его трудов. Герон занимался геометрией, механикой, гидростатикой, оптикой. Герон дал точные и приближенные формулы расчета различных фигур (вспомните формулу Герона для определения площади треугольника по трем сторонам). Герон изобрел ряд приборов и автоматов, в частности прибор для измерения протяженности дорог, действовавший по тому же принципу, что и современные таксометры, автомат для продажи «священной» воды, различные водяные часы и другое. Герон создал первую модель паровой машины (эолипил, см. рис. 1.16). Более того, в этой модели он продемонстрировал принцип реактивного движения, тот самый, который позволяет сегодня запускать на орбиту Земли искусственные спутники, исследовать космос. Эолипил (в переводе с греческого — «шар бога ветров Эола») представлял собой наглухо запаянный котел с двумя трубками на крышке. На трубках устанавливался вращающийся полый шар, на поверхности кото-



Рис. 1.16. Паровая турбина Герона (Википедия)

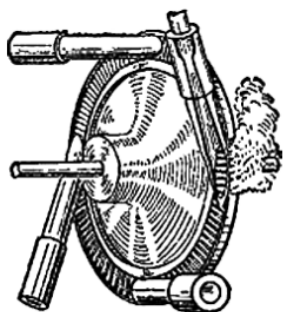


Рис. 1.17

рого были установлены два Г-образных патрубка-сопла. В котел через отверстие заливалась вода, отверстие закрывалось пробкой, и котел устанавливался над огнем. Вода вскипала, образовывался пар, который по трубкам поступал в шар и в Г-образные патрубки. При достаточном давлении струи пара, вырываясь из сопел, быстро вращали шар. Построенный современными учеными по чертежам Герона эолипил совершал до 3500 оборотов в минуту! Эолипил не производил никакой полезной работы и поэтому так и остался забавной игрушкой. В 1884 году английский инженер Чарльз Парсонс изобрел первую применимую на практике паровую турбину. Ее конструкция была столь эффективна, что турбинами вскоре стали заменять паровые двигатели на электростанциях. Фактически прообразом будущих паровых турбин было изобретение Герона.

Две тысячи лет назад древние греки знали, умели делать многое из того, что (пусть в измененном, усовершенствованном виде) служит и сегодня. Некоторые современные технологии, предметы и знания были открыты и изобретены в далекие античные времена (турбина — лишь один из множества примеров). Чтобы в этом убедиться, достаточно взглянуть в содержание школьных учебников: простые механизмы, золотое правило механики, закон Архимеда, законы статики (о чем будем еще рассказывать) и много другое — все это было сделано тогда, в Античности. В древние времена было очень много изобретений, которые были прародителями многих современных изобретений. Например, такой простой инструмент, как линейка, — один из самых старых чертежных инструментов на земле. Людям всегда было нужно уметь проводить прямые линии. Гладко обструганная дощечка-линейка помогала расчертить каменную плиту при строительстве пирамид, делить на столбцы пергаментный лист. И еще множество изобретений, которым в те времена не нашлось широкого применения и которые были забыты.

Некоторые взгляды того времени кажутся нам весьма наивными. Не об этом ли говорил римский философ Луций Анней Сенека: «Настанет время, когда потомки наши будут удивляться, что мы не знали таких очевидных вещей»? Но не забудем, в какое время происходили описываемые нами события, и будем благодарны ученым, изобретателям древности за полученное наследие.

Кончилась Античность, ушел огромный пласт истории, оставив потомкам много вопросов об окружающем мире, но и обогатив здравый смысл людей опытом предыдущих поколений. Начиналась своеобразная, не понятая еще до конца эпоха Средневековья, в которой продолжится наше путешествие.

Время великого прорыва

Наука «круглой Земли». Открыты законы движения планет. Галилей объясняет наблюдаемые факты, борясь с вековыми заблуждениями. Астрономические открытия Галилея поражают воображение людей. Наука на пороге создания классической физики.

2. *Космология Средних веков. Система мира Птолемея. «Сдвинувший» Землю: гелиоцентрическая система Коперника. Законы Кеплера.*

Средневековье начинается в Западной Европе с V века и продолжается до рубежа XVI–XVII вв. Раннее европейское Средневековье (VI–VIII века) — время и вправду очень тяжелое. Континент, потрясенный и разоренный нашествиями варваров во время так называемого великого переселения народов, оскудел и зарос густым лесом. Города захирели. Пришла в упадок торговля... Это хорошо разглядел еще Вольтер (1694–1778). В «Опыте о нравах и духе народов» (книга вышла в 1769 г.) он пишет: «Вместо прекрасного латинского языка — 20 варварских наречий, вместо культуры и законов — только варварские обычаи. Цирки и амфитеатры, возвышавшиеся во всех провинциях, сменились хижинами, крытыми соломой. Большие дороги, такие красивые и прочные, проведенные от подножия Капитолия до гор Тавра, покрылись стоячими водами. Такой же переворот произошел в умах: Григорий Турский и монах Фредегар из Сен-Галлена — это наши Полибий и Титы Ливий. Человеческий разум огрубел среди самых подлых и бессмысленных суеверий... Вся Европа коснеет в этом унижении до XVI века и освобождается от него лишь путем ужасных судорог».

Христианский средневековый мир был окружен неизвестными землями, знание о которых приобретало все более смутный характер по мере удаления от центра ойкумены. Далекие страны для людей — вместилища чудес и экзотики. Средневековое воображение населяло их диковинными чудовищами или добрыми дикарями.

Мир средневекового человека ограничивался узкими рамками его деревушки. Немудрено, что и мировоззрение этого человека было столь же ограниченным. Вся духовная жизнь Средневековья — просвещение, искусство, наука — была подчинена церкви.

В Средние века под влиянием католической церкви произошел возврат к примитивным представлениям древности о плоской Земле и опирающимся на нее полушарии неба.

В этот период люди разделяли те же предрассудки, которыми была полна предшествующая история. «Здравый смысл» человека средних веков сопротивлялся факту вращения Земли, движению ее вокруг Солнца! По-прежнему весь повседневный опыт убеждал средневекового человека с непреложной достоверностью, что Земля покоится, а Солнце движется вокруг нее. В это время часто

именно теологи занимались изучением окружающего мира, и прежде всего астрономией, входившей в круг обязательных университетских дисциплин. Каждый материальный объект рассматривался как символ сокровенного и идеального мира, а задача науки — раскрыть эти символы. Отсюда происходил отказ от изучения подлинных связей вещей при помощи опыта. Символизм наложил отпечаток на всю средневековую культуру. Считалось, что слова объясняют природу вещей. Непосредственное реалистическое восприятие мира в искусстве и литературе часто облекалось в форму символов и аллегорий. Так формировалась средневековая схоластика (от греч. *Schole* — «школа») — тип религиозной философии, характеризующийся принципиальным подчинением мысли авторитету догмата веры. В основу схоластики были положены основные положения учения Аристотеля. Типичными для Средних веков были философы, которые, «заявляя, — как писал Стендаль, — вздорными спорами о преимуществах химер Аристотеля или Платона, время от времени меняли одни нелепости на другие, не приближаясь несколько к истине».



Рис. 2.1. Вселенная Аристотеля

На этой теологической основе позднее Средневековье без труда приняло Аристотелевскую космологию. Согласно Аристотелю Земля представляет собой сферу в центре Вселенной, расположенную ниже Луны, то есть подлунную сферу несовершенных материальных тел. Выше находятся концентрические небесные сферы Луны, Солнца и звезд, состоящие из более чистой, неземной материи; они вращаются вокруг Земли. Каждая часть мироздания имеет назначенное ей место, стремится занять его и обрести покой. Это была логически согласованная система устройства Вселенной и действующих в нем законов физики, и, казалось, она соответствовала обычным представлениям и здравому смыслу.

Но жизнь не стояла на месте. В истории науки и техники случается, что многие годы, столетия наблюдателю может показаться, что она практически не развивается. И вдруг темп значительно ускоряется. Так случилось в период с начала XII–XIII веков, когда в Европе произошел резкий подъем развития технологий и увеличилось число нововведений в средствах производства. Менее чем за столетие было сделано больше изобретений, чем за предыдущую тысячу лет.



Рис. 2.2. Изобретение книгопечатания

Средневековый образ мира и обусловленный им настрой человека и культуры начинают разрушаться в XIV веке. Продолжается развитие техники, появляются башенные колесные часы от Парижа до Москвы. В 1440 году Иоганн Гуттенберг (1400–1468) изобретает книгопечатание отдельными вырезными буквами. Изобретение бумаги можно считать основополагающим двигателем цивилизации. Развивающемуся обществу нужны были образованные администраторы, юристы, нотариусы, медики и священники. Пришел черед образования высших школ.

В Средние века, в эпоху феодализма, «ученым языком» всей Западной Европы была латынь — международный язык науки. Все занятия велись на латинском языке, поэтому немцы, французы, испанцы могли слушать итальянского профессора с не меньшим успехом, чем его соотечественники. На латыни общались студенты и между собой. Использование латинского языка было удобно: ученые независимо от своего родного языка могли читать сочинения друг друга, общаться между собой, то есть быть в курсе открытий, совершавшихся в то время.

Образовательный процесс в Средневековье затягивался на 15–16 лет, и это было нормой. Изначально студент поступал на так называемый подготовительный факультет, где он изучал «семь свободных искусств»: грамматику, риторику, диалектику, музыку, арифметику, геометрию, астрономию. Обучение на данной ступени составляло 5–7 лет, но срок мог варьироваться. Чтобы поступить на один из трех основных факультетов, студенту необходимо было сдавать философию. Средневековый университет не выпускал из своих стен необразованных людей.



Рис. 2.3. Студенты в университетской аудитории (Германия, XIV век)

Начав разрушаться в XIV веке, средневековый образ мира продолжает разрушаться и в следующем столетии, произошел закат Средневековья. Не случайно этот период называют временем великого прорыва. В 1440 году Николай Кузанский в книге «Об ученом невежестве» утверждал, что все познания о природе следует записывать в цифрах, а все опыты над нею производить с весами в руках. XVI век стал переломным для европейской математики. Полностью усвоив достижения предшественников, она несколькими мощными рывками вырвалась далеко вперед. Леонардо да Винчи очень точно изложил основы метода нового естествознания: опыт и математический анализ. «Мне кажется, — пишет он, — что пусты и полны заблуждений те науки, которые не порождены опытом — отцом всякой достоверности — и не завершаются в наглядном опыте...» «Все наше познание начинается с ощущений», — пишет он. «Мудрость есть дочь опыта». «Никакой достоверности нет в науках там, где нельзя приложить ни одной из математических наук, и в том, что не имеет связи с математикой».

Леонардо из Пизы, Фибоначчи, Фома Аквинский, Региомонтан, Лука Пачоли и другие, Кардано и Тарталья и, наконец, Кеплер, Коперник, Виет и Непер — все они медленно, но верно приводили хаос в математике к его сегодняшнему упорядоченному виду (см. Кессельман В. С. Удивительная история математики. М.: Энас-книга, 2013; далее — УИМ).

Одновременно растет престиж математики, в изобилии появляется множество практических задач, требующих решения, — в артиллерии, мореплавании, строительстве, промыш-



Рис. 2.4. Математики XVI века, средневековая миниатюра

ленности, гидравлике, астрономии, картографии, оптике и др. В новых торговых государствах, особенно во Франции, Голландии, был большой спрос на инженеров и «арифметиков».

Неоспоримая эффективность применения математики в естествознании подталкивала ученых к мысли, что математика, так сказать, встроена в мироздание, является его идеальной основой. Другими словами, познание в математике есть часть познания реального мира. Многие ученые XVII–XVIII веков в этом и не сомневались. И эта мысль в последующие века только укреплялась.

В XIII–XV вв. в кругах образованных философов шарообразность Земли была общепринятым взглядом. И в популярной (конечно, не похожей на современную) литературе этот взгляд также распространялся (см. рис. 2.5).

Великие географические открытия на практике утвердили мнение о шарообразности Земли. Оказалось, что вокруг Земли можно объехать — совершить кругосветное путешествие. И первое такое путешествие в конце пятнадцатого века совершил Ф. Магеллан.



Рис. 2.5. Страница из средневековой книги «L'Image du monde» («Образ мира») с иллюстрацией, изображающей круглую Землю; книга написана Готье де Мецем ок. 1245 г., была очень популярна и переводилась на многие языки (иллюстрация принадлежит копии XIV века)



Рис. 2.6. Рисунок XVI века, изображает Магеллана во время его знаменитого кругосветного путешествия; Магеллан сидит на корме своего корабля, вокруг него — астрономические инструменты, с помощью которых он определяет положение судна в море



Рис. 2.7. Первое в истории изображение Земли с орбиты Луны

Ну а бесспорное доказательство шарообразности Земли было получено, когда земляне впервые высадились на поверхность нашего естественного спутника. Как заметил Норман Казинс (1915–1990), «самое главное в лунной экспедиции не то, что человек ступил на Луну, а то, что он увидел Землю»; увидел земной шар такой божественной формы!

Окружающий мир начинает расширяться, разрывая свои границы. Астрономия обнаруживает, что Земля вращается вокруг Солнца; тем самым Земля перестает быть центром мира. Но такое представление завоевывает умы людей

далеко не сразу. В тогдашнем мире господствовала геоцентрическая система мира Птолемея.

Клавдий Птолемей (2 в. н. э.) — древнегреческий астроном, математик, оптик, теоретик музыки и географ. В период с 127 по 151 год жил в Александрии, где проводил астрономические наблюдения. Он продолжил учение Аристотеля относительно шарообразности Земли. Птолемей создал геоцентрическую систему мироздания и учил, что все небесные тела движутся вокруг Земли в пустом пространстве. Впоследствии систему Птолемея признала христианская церковь. Птолемей в своем главном сочинении «Альмагест» писал: «Знаю, что я смертен, знаю, что дни мои сочтены; но, когда я в мыслях неустанно и жадно прослеживаю пути светил, тогда я не касаюсь ногами Земли: на пиру Зевса наслаждаюсь амброзией, пищей богов».

Птолемею удалось создать математически стройную систему движения планет, которые объясняли и, надо заметить, весьма точно, видимое петлеобразное движение планет сложной системой эпициклов и деферентов: каждая из планет равномерно движется по небольшому кругу — эпициклу, центр эпицикла равномерно обращается вокруг Земли по большему кругу — деференту (см. рис. 2.8). Эти эпициклы и деференты были идеальными окружностями. А могло ли быть иначе? Никоем образом. Ведь, по мнению пифагорейцев, движения небесных светил должны быть совершенными, т. е. круговыми. И такое представление оказало решающее влияние как на Аристотеля, так и на Клавдия Птолемея. Да и оказывало влияние много веков спустя. Система Птолемея полностью укладывалась в здравый смысл людей, и с ее помощью удалось построить стройную модель мироздания, не только объяснявшую с единой точки зрения характер наблюдаемых перемещений небесных светил, но и позволявшую с точностью, вполне достаточной для того времени, предвычислять будущие положения планет среди звезд.

Эта система была весьма сложной, и для объяснения отклонений от вычисленных движений планет приходилось вводить все новые окружности. Альфонс Мудрый, правивший Кастилией в XIII веке, глубоко уважал астрономию. На то имелись совершенно прагматические причины: знание точного положения планет на небе было жизненно необходимо для составления точных гороскопов. Для повышения их качества Альфонс заказал новые астрономические таблицы, основанные на теории Птолемея — последнем слове тогдашней космологии. Но когда ему объяснили тонкости птолемеевой системы, он отреагировал весьма скептически: «Если бы Всемогущий Бог посоветовался со мной перед творением, я бы порекомендовал что-нибудь попроще». Но в «Великом математическом построении астрономии» Клавдий Птолемей столь искусно и математически строго представил движение Солнца, Луны и других небесных светил вокруг неподвижной Земли, что впервые стали возможны сами вычисления движения. Астрономические таблицы на основе труда Птолемея играли огромную роль в практической астрономии на протяжении многих веков.

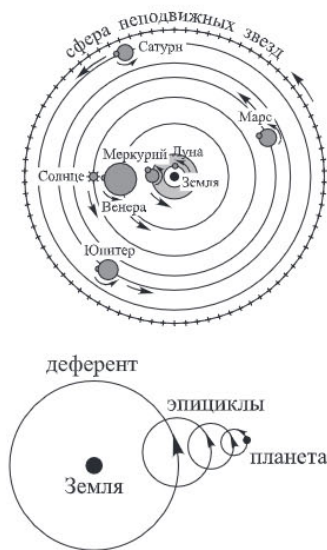


Рис. 2.8. Система мира по Птолемею

Около 1400 лет использовалась система Птолемея, но на протяжении всех этих лет она постоянно дополнялась новыми элементами (например, экванты — еще один дополнительный элемент птолемеевой системы). Происходило так потому, что, сделав вполне правильное предположение о равномерном движении по окружностям, Птолемей все же не смог отказаться от неподвижности Земли. Вот эта ошибка и привела к тому, что в итоге его система рухнула, так как не могла объяснить новых наблюдений. Геоцентрическая система мира Птолемея была принципиально неверной, а также безмасштабной, потому что для объяснений видимых движений планет определялись не абсолютные размеры эпициклов и деферентов, а лишь их отношения. И это обнаружил Коперник. В обращении к папе Павлу III Коперник критикует теорию эпициклов, не согласующуюся достаточно хорошо с наблюдениями и не дающую целой картины мироздания: «...Они (т. е. авторы геоцентрических теорий — *В. К.*) не смогли определить форму мира и точную соразмерность его частей. Таким образом, с ними получилось то же самое, как если бы кто-нибудь набрал из различных мест руки, ноги, голову и другие члены, нарисованные хотя и отлично, но не в масштабе одного и того же тела; ввиду полного несоответствия друг с другом из них, конечно, скорее составилось бы чудовище, а не человек». Коперник пишет, что он «стал досадовать, что у философов не существует никакой более надежной теории движений мирового механизма...»

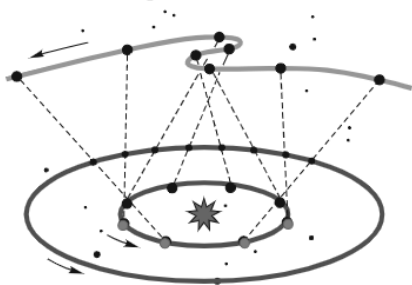


Рис. 2.9. Видимое петлеобразное движение планет



Рис. 2.10. Коперник за астрономическими наблюдениями (картина польского художника Яна Матейко, 1873)

Коперник отказался от принципа геоцентризма, то есть от неподвижной Земли как центра мира, и построил гелиоцентрическую систему мира, в которой неподвижным является Солнце, а все планеты, в том числе Земля, движутся вокруг Солнца. Коперник показал, что суточное движение всех светил можно объяснить вращением Земли вокруг оси, а петлеобразное движение планет — тем, что все они, включая Землю, обращаются вокруг Солнца. На рисунке 2.9 показано движение Земли и Марса в тот период, когда, как нам кажется, планета описывает на небе петлю. Планеты были поставлены, как говорится, на свои истинные места в Солнечной системе.

Коперник проводил наблюдения над неподвижными звездами, желая сравнить состояние неба в его эпоху с данными Птолемея. Делал он это для проверки своих выводов. Наиболее известным прибором, которым пользовался Коперник, был трикветрум, который служил для определения зенитных расстояний звезд. Применение трикветрума было описано Птолемеем, а затем и Коперником в книге о вращении небесных сфер. Прибор

состоял из трех шарнирно соединенных стержней, образующих равнобедренный треугольник, у которого угол при вершине мог изменяться в соответствии с измеряемым зенитным расстоянием. Мерой угла служила длина стержня с нанесенными на него делениями, находившегося в основании треугольника. Именно за работой с ним изображен Коперник на известной картине Яна Матейко (см. рис. 2.10).

Коперник, выдвинув правильный принцип, оказал решающее влияние на все последующее развитие естествознания и заслужил признание как один из величайших реформаторов науки.

Понятно, что теория Коперника полностью противоречила повседневному опыту людей, здравому смыслу. Осознать, поверить в такое было невозможно! Коперник не только убрал Землю из «центра мира», он также объяснил, почему возможно вращение Земли, против которого так восставал здравый смысл не только рядового человека, но и великого астронома Птолемея. Вот что можно прочитать в его сочинениях. Птолемей вступает в полемику со сторонниками вращательного движения Земли (не называя их по именам), считавшими, что суточное вращение совершает Земля, а не небо. Птолемей признает, что среди небесных явлений нет ничего противоречащего гипотезе о вращении Земли, но совсем иначе обстоит дело с явлениями на земле и в воздухе. «Они должны допустить, — пишет Птолемей, — что вращательное движение Земли должно быть самым быстрым из всех движений, связанных с ней, учитывая, что Земля должна совершать одно обращение за столь короткое время; в результате все предметы, не опирающиеся на Землю, должны казаться совершающими такое же движение в обратном направлении: ни облака, ни другие летающие или парящие объекты никогда не будут видимы движущимися на восток, поскольку движение Земли к востоку будет всегда отбрасывать их, так что эти объекты будут казаться движущимися на запад, в обратном направлении». Даже если предположить, рассуждает далее Птолемей, что и воздух движется в том же направлении и с той же скоростью, что и Земля, плавающие и парящие в воздухе тела должны следовать его движению. Если же они связаны с воздухом так, что следуют его движению, то нам они казались бы неподвижными, чего на самом деле нет. Так Птолемей «опровергает» взгляды сторонников вращения Земли. Некоторые его доводы сейчас могут показаться наивными, но и полтора тысячелетия спустя именно к таким доводам прибегали противники Коперника и Галилея.

В приведенных выше рассуждениях Птолемея, кроме тех наивных аргументов, о которых мы говорили, есть и здравые мысли. Это мысль Птолемея, что ход небесных явлений не противоречит гипотезе о вращении Земли. Птолемей прав и в том, что вращательное движение Земли быстрее всех прочих известных в ту эпоху движений. Если бы он попробовал вычислить ее скорость (а у него были для этого все необходимые данные: окружность Земли по Эратосфену и широта

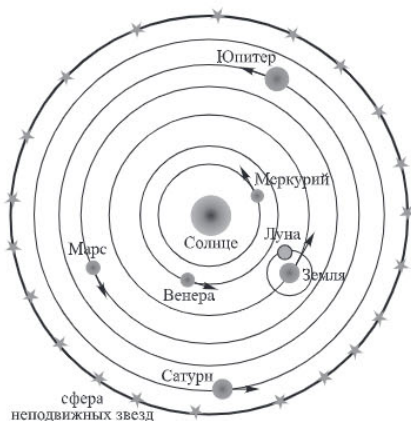


Рис. 2.11. Система мира по Копернику



Рис. 2.12. Портрет Коперника, гравированный в Лейпциге Геданом

Александрии), он нашел бы эту величину равной 385 м/с, что в десять раз быстрее ураганного ветра. Но он не мог понять, что воздух увлекается вращением Земли, а все плавающие или летающие в воздухе тела тоже участвуют во вращении Земли. Так здравый смысл подвел. Оказалось, что то, что было очевидным, не является правильным. В основном труде Николая Коперника «О вращении небесных сфер» гипотеза суточного вращения Земли стала частью гелиоцентрической системы мира, как у Аристарха Самосского. Отвечая на вопрос о ненаблюдаемости эффектов суточного вращения в земных экспериментах, Коперник писал: «Вращается не только Земля с соединенной с ней водной стихией, но также и немалая часть воздуха и все, что каким-либо образом сродно с Землей, или уже ближайший к Земле воздух, пропитанный земной и водной материей, следует тем же самым законам природы, что и Земля, или имеет приобретенное движение, которое сообщается ему прилегающей Землей в постоянном вращении и без всякого сопротивления».

Таким образом, главную роль в ненаблюдаемости вращения Земли играет увлечение воздуха ее вращением. Такого же мнения придерживались и большинство коперниканцев в XVI веке.

Но и для враждебно настроенных ученых, и для простых людей самым нелепым аспектом новой теории было приписываемое Земле движение, каждому собственным чувства подсказывали, что она стоит на месте. Ведь на стороне нападавших был здравый смысл. Доводы — те же, что и у Птолемея: если бы Земля двигалась, то птицы и снаряды остались бы позади, а падающий камень никогда не достиг бы земли. Сам воздух слетел бы прочь с земного шара. Словом, вся эта теория — сплошная чушь. Теория Коперника была революционной, поэтому не могла быть принята сразу. Это понимал и сам ее создатель. В предисловии к книге Коперник пишет: «Принимая в соображение, какой нелепостью должно показаться это учение, я долго не решался напечатать мою книгу и думал, не лучше ли будет последовать примеру пифагорейцев и других, передававших свое учение лишь друзьям, распространяя его только путем предания». И он был прав. Вот как отзывались о книге его великие современники. М. Лютер говорил: «Этот дурак хочет перевернуть все астрономическое искусство». И Ф. Бэкон «... Спекуляция человека, который не заботится о том, какие фикции он вносит в природу. Ему важно лишь, чтобы это отвечало его вычислениям». И, что удивительно, Галилей тоже не принял систему Коперника: «Я был убежден, что новая система — чистейшая глупость». Некоторое время его труд свободно распространялся среди ученых. Только тогда, когда у Коперника появились последователи, инквизиция спохватилась». Его учение было объявлено ересью, а книга внесена в Индекс запрещенных книг (с 1616 до 1833 г.). И Теологическая комиссия экспертов по запросу инквизиции рассмотрела два положения, вобравшие в себя суть учения Коперника, и вынесла следующий вердикт:

Предположение I: Солнце является центром мироздания и, следовательно, неподвижно. Все считают, что это заявление нелепое и абсурдное с философской точ-

ки зрения и, кроме того, формально еретическое, так как выражения его во многом противоречат Священному Писанию, согласно буквальному смыслу слов, а также обычному толкованию и пониманию Отцов Церкви и учителей богословия.

Предположение II: Земля не есть центр мироздания, она не является неподвижной и движется как целостное (тело) и к тому же совершает суточное обращение. Все считают, что это положение заслуживает такого же философского осуждения; с точки зрения богословской истины оно по крайней мере ошибочно в вере.

Вот почему Коперник не спешил обнародовать свой труд. Считается, что первый отпечатанный экземпляр его книги «Об обращении небесных тел» вложили ему в руки в день смерти, в 1543 году.

Однако планеты в системе мира Коперника по-прежнему вращались по идеальным кругам. В посвящении к своей книге он ссылается на учение о движении сфер вокруг центрального огня, изложенное пифагорейцем Филолаем. Этот ложный принцип — равномерных круговых движений — Коперник преодолеть не сумел. Движение каждой планеты вокруг Солнца он представлял как комбинацию таких движений (примерно как у Птолемея).

Сведения об учении Коперника распространялись крайне медленно. Первое издание его книги «О вращении небесных сфер» имело тираж всего 1000 экземпляров. Не без участия Ретика в Базеле в 1566 году вышло второе издание. Определенный интерес к теории Коперника появляется в эти годы и в Англии, где Томас Диггес в 1576 году переводит на английский язык небольшую часть сочинения Коперника. Позже отдельные университетские профессора полулегально знакомят студентов с основными положениями теории Коперника. Так было, например, в Тюбингенском университете, где Кеплер о новом учении узнал от своего учителя Местлина.

Эпициклы, деференты и экванты теории Птолемея в соединении с гелиоцентрической системой Коперника проложили путь к законам Кеплера. Проложили — чтобы навсегда уйти в историю.

Вот она та цепочка, лишь усвоив которую совершил свое открытие Кеплер. Кеплеру полностью удалось разрешить проблему движения планет вокруг Солнца. Кеплер определил и доказал, что планеты движутся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца. Три закона Кеплера в математической форме представили истинное движение планет. Свои законы движения планет Кеплер нашел, исследуя хаотическую массу наблюдений, не зависимых друг от друга, не объединенных ни общей идеей, ни единым принципом. А происходило это так. В 1600 году Кеплер занялся исследованием движения Марса, работая у знаменитого датского астронома Тихо Браге. Он перебрал всевозможные комбинации эпициклов, деферентов, эксцентров и эквантов, чтобы добиться лучшего совпадения расчетных результатов с наблюдаемым перемещением планеты, но добился точности в совпадении угловых координат планет лишь в 8 угловых минут, то есть всего около видимого диаметра лунного диска. Даже по тем временам это



Рис. 2.13. Иоганн Кеплер (1571–1630)

было очень низкой точностью. Естественно, такой результат не удовлетворил Кеплера. Часто приводят его слова: «Эти 8 минут привели к пересмотру всей астрономии». Перебрав около семидесяти различных комбинаций, Кеплер пришел к выводу, что орбита Марса должна быть *эллипсом*.

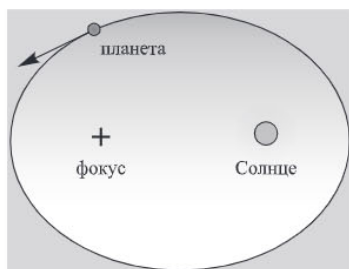


Рис. 2.14. Движение планеты по Кеплеру

«Кеплер, — писал Эйнштейн, — жил в эпоху, когда власть закона в природе отнюдь не была общепризнанной. А его вера в единообразный закон была столь велика, что дала ему сил на десять лет терпеливого труда — эмпирически исследовать движения планет, чтобы найти их математические законы».

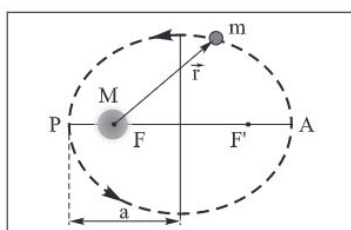


Рис. 2.15. Эллиптическая орбита планеты массой m (M — масса Солнца), a — длина большой полуоси, F и F' — фокусы орбиты

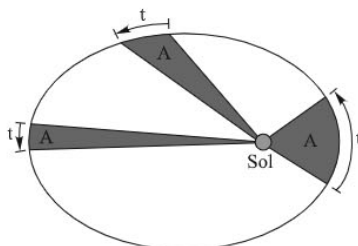


Рис. 2.16. Второй закон Кеплера (Википедия)

Чтобы согласиться с собственным выводом, Кеплеру нужно было переломить себя. В его ранних работах использовались пифагорейские идеи. Число планет и расстояния от них до Солнца были связаны с числом и расположением правильных геометрических (евклидовых) тел, при этом движение планет вокруг Солнца он объяснял действием своеобразных интеллектуальных сил, или душ. Как и большинство его современников, он был убежденным сторонником концепции идеального кругового движения. Но своим открытием Кеплер порвал с греками!

Путем неимоверно тяжелого труда, методом проб и ошибок Кеплер приходит к выводу, что *траектория движения Марса представляет собой не круг, а эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце* — положение, известное сегодня как первый закон Кеплера.

Второй закон Кеплера (закон площадей) гласит: каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца, причем за равные промежутки времени радиус-вектор, соединяющий Солнце и планету, описывает равные площади.

Из второго закона следует, что чем дальше планета от Солнца, тем медленнее она движется. Применительно к нашей Солнечной системе с этим законом связаны два понятия: перигелий (ближайшая к Солнцу точка орбиты) и афелий (наиболее удаленная точка орбиты).

Таким образом, из второго закона Кеплера следует, что планета движется вокруг Солнца неравномерно, имея в перигелии большую линейную скорость, чем в афелии.

Оба закона были сформулированы Кеплером в 1609 году в книге «Новая астрономия», причем осторожности ради он относил их только к Марсу. Новая модель движения вызвала огромный интерес среди ученых-коперниканцев, хотя не все они ее приняли.

Тем временем Кеплер продолжает астрономические исследования и в 1618 году открывает *третий закон*: *отношение куба среднего удаления планеты от Солнца к квадрату периода обращения ее вокруг Солнца есть величина постоянная для всех планет*: $a^3/T^2 = \text{const}$. Этот результат Кеплер публикует в завершающей книге «Гармония мира», причем применяет его уже не только к Марсу, но и ко всем прочим планетам (включая, естественно, и Землю), а также к галилеевым спутникам (о них — далее). Этот закон можно записать и так: квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей орбит планет. Справедливо не только для планет, но и для их спутников. $T_1^2/T_2^2 = a_1^3/a_2^3$, где T_1 и T_2 — периоды обращения двух планет вокруг Солнца, а a_1 и a_2 — длины больших полуосей их орбит.



Рис. 2.17. Третий закон Кеплера. Скорости близких к Солнцу планет значительно больше, чем скорости далеких
(college.ru/astronomy/course/content/.../theory.htm)

Законы Кеплера дали вполне ясное представление о геометрическом характере планетных движений, но не объясняли физических свойств явления, не вскрыли причины этих движений. А движение планет по эллипсам совсем не укладывались в многовековые представления людей, в их здравый смысл. Для ученых, живших до Кеплера и Ньютона, этого вопроса не существовало, потому что для них круговые движения небесных тел представлялись понятными сами по себе и не требовали дальнейшего обоснования. Даже Галилей игнорировал законы Кеплера, не видя их роли в деле обоснования новой системы мира. По всей вероятности, это вызвано главным образом тем, что в тех механических построениях Галилея, которые изложены в «Диалоге», равномерные круговые движения играли столь значительную роль, что отказаться от них он не мог. Еще в 1612 году он сделал следующее замечание: «Не только есть много примеров движения по эпициклам, но и не существует иного рода движения». В связи с этим он совершенно не обратил внимания на то, что на основе равномерного обращения по круговым орбитам невозможно создать теорию планетных движений и построить планетные таблицы. В эпоху Галилея влияние пифагорейской школы было весьма значительным, а учение о движении Земли именовалось пифагорейским учением.

Замечание. При рассмотрении законов Кеплера мы обратились к такой геометрической фигуре, как эллипс. В дальнейшем в нашем путешествии будут встречаться другие фигуры (парабола, гипербола), причем в далеких друг от друга областях физики, от механики до физики атома. Поэтому остановимся немного на истории изучения этих кривых. Античные геометры изучали самые разные плоские кривые. Свойства эллипса, параболы и гиперболы изучали многие, в том числе Архимед и Евклид. Особого их внимания удостоились конические сечения: эллипс, парабола и гипербола. Оказалось, что все эти разные кривые есть линии пересечения прямого кругового конуса плоскостями, не проходящими через его вершину и наклоненными под разными углами к образующей (см. рис. 2.18). Наиболее важных результатов добился Аполлоний Пергский в III веке до н. э.

Он разработал общую теорию конических сечений, которую изложил в труде «Коника» (отсюда другое название кривых — коники), в восьми книгах, где рассмотрел почти 400 теорем. Аполлоний впервые получил все три линии как сечения одного и того же конуса. Он же ввел их современные названия: парабола, гипербола и эллипс. Они происходят от греческих слов «приближение», «избыток» и «недостаток».

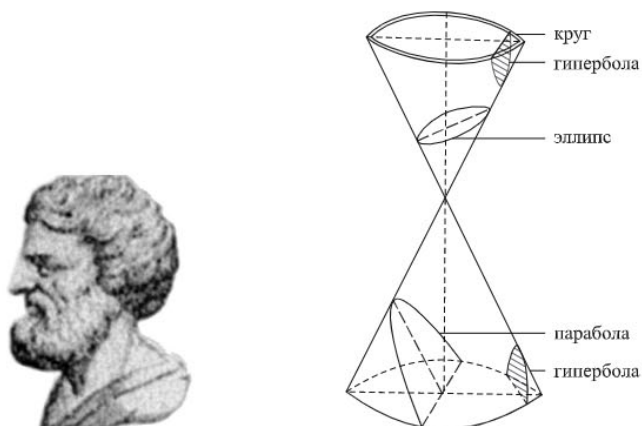


Рис. 2.18. Аполлоний Пергский и его конические сечения:
эллипс, парабола, гипербола

Долгое время конические сечения не находили применения, пока ими всерьез не заинтересовались астрономы и физики. Выяснилось, что эти линии встречаются в природе: пример тому — траектории небесных тел, они графически описывают многие физические процессы — в механике (парабола: зависимость высоты подъема тела от времени; движение тел, брошенных под углом к горизонту, и т. д.), гипербола лидирует, например, в законах Ома и Бойля–Мариотта, находит применение в атомной физике, теории относительности. Об этом разговор впереди.

В нашем путешествии мы подошли к такому периоду в истории интересующей нас науки, который связан собственно с рождением физики, той классической физики, которую изучают в наших школах.

3. Галилей — «отец современной физики». Астрономические открытия Галилея. Физика колебаний маятника. «Гениальнейший часовой мастер всех времен».

В то время, когда Кеплер работал над законами движения планет, его современник Галилео Галилей совершил ряд великих открытий. Благодаря этим открытиям Галилея называют основателем экспериментальной физики. «Отцом современной физики» назвал Галилея А. Эйнштейн. Своими экспериментами Галилей убедительно опроверг умозрительную метафизику Аристотеля, заложил фундамент классической механики. Он собрал и систематизировал те факты и идеи, на основе которых впоследствии Ньютон вывел законы движения. В сво-

их работах Галилей заложил основы более общего научного метода выявления законов природы вообще. Он ввел в механику точный количественный эксперимент и математическое описание явлений, утверждая, что «книга природы написана языком математики».

Галилей жил во время, известное в истории как эпоха Возрождения. Именно в эту эпоху совершил Н. Коперник переворот в мировоззрении своей геоцентрической системой.

Галилео Винченцо Боннайотти ди Галилей, а именно так звучит его полное имя, родился 15 февраля 1564 года в Пизе в знатной, но обедневшей флорентийской семье. Большую часть жизни он провел в бедности, в долгах, потому что, как подобает истинному итальянцу, держал на своей шее в дальнейшем немалую толпу родни. В Пизанском университете Галилео впервые познакомился с физикой Аристотеля, с работами древних математиков — Евклида и Архимеда, сочинения которого прилежно изучал.

В 1608 году до Галилея дошли вести о новых инструментах для наблюдения за отдаленными объектами — «голландских трубах». Используя свои познания в геометрической оптике, Галилей посвятил «все свои труды изысканию научных начал и средств, которые делали бы возможным устройство инструментов подобного рода, и скоро нашел желаемое, основываясь на законах преломления света». Галилей не изобрел телескоп, но усовершенствовал зрительную трубу для наблюдения внеземных объектов (см. книгу «На кого упало яблоко»). Ему удалось построить телескоп (тогда, правда, еще такого названия не было) с 30-кратным увеличением, и с помощью этого инструмента он предпринял первый телескопический обзор небесных тел, сделав головокружительные открытия. Были открыты горы на Луне, фазы Венеры, четыре главных спутника Юпитера, пятна на Солнце, обнаружена звездная природа нашей галактики — Млечного Пути.

Сатурн впервые наблюдался Галилеем в 1610 году. Его первое сообщение об этом событии (июнь 1610) гласит: «Отдаленнейшую из планет наблюдал тройную». По разным сторонам от диска планеты ученый увидел два одинаковых симметрично расположенных «придатка», которые, в отличие от спутников Юпитера, не двигались вокруг центрального тела, а сохраняли свое положение. В действительности же это были «ушки» знаменитых колец, но качество оптики было недостаточно высоким, чтобы различить их явно. Свои первые открытия с телескопом Галилей описал в сочинении «Звездный вестник», изданном во Флоренции в 1610 году. Книга имела сенсационный успех по всей Европе, даже коронованные особы спешили заказать себе телескоп. Несколько телескопов Галилей подарил Венецианскому сенату, который в знак благодарности назначил его пожизненным профессором с окладом 1000 скудо. В сентябре 1610 года телескопом обзавелся Кеплер, а в декабре открытия Галилея подтвердил влиятельный римский астроном Клавийус.

Полученные Галилеем данные подтверждали теорию Коперника и третий закон Кеплера.



Рис. 3.1. Телескопы Галилея, изобретенные за год до него И. Липпершеем



Рис. 3.2. Галилей показывает телескоп венецианскому дожу (фреска Дж. Бертини)



Рис. 3.3. Портрет Галилео Галилея работы Оттавио Леони (1568–1630)

Рост влияния Галилея, независимость его мышления и резкая оппозиционность по отношению к учению Аристотеля способствовали формированию агрессивного кружка его противников. Особенно возмущали недоброжелателей Галилея его пропаганда гелиоцентрической системы мира, поскольку, по их мнению, вращение Земли противоречило библейским текстам. Наконец, в феврале 1615 года инквизиция получила формальный донос. Было начато дело, разбиравшееся келейно, закрытым порядком в течение года. По средневековой иерархии грехов прегрешение Галилея не принадлежало к числу смертельных. На основные догмы веры он не покушался. Но он покушался на авторитет церкви и тем самым впадал в ересь. Несмотря на блистательную защиту, на ходатайство авторитетных лиц, в том числе и герцога Тосканского, его признали «сильно подозреваемым в ереси», приговорили к отречению и пожизненному заключению. Ему предписано не рассуждать более письменно или устно каким-либо образом о движении Земли и о неподвижности Солнца... под страхом наказания как неисправимого». 69-летнему ученому пришлось, стоя на коленях и держа руку на Евангелие, признать ложность учения Коперника, а также свое непристойное тщеславие, что причина вращения Земли излагается в книге так, будто оно есть истина. Свое заключение он отбывал вначале во дворце сиенского архиепископа Пикколомини, затем на своей вилле в Арчетри вблизи Флоренции. Там Галилей скончался, будучи почти совершенно слепым.

*Движенье повсюду, движенье везде:
И в воздухе птица, и рыба в воде,
И жизни нигде без движения нет,
И Солнце летит в хороводе планет.
Вот листья по воздуху долго кружат,
И падает камень быстрее стократ.*

Галилео Галилей

Маятник. Галилей, работая в университетах Пизы и Падуи, обобщил и привел в систему свои идеи в области движения. Одно из первых его открытий связано с замечательными свойствами маятника.

История маятника уходит в глубину веков. Им пользовались и в древних странах: Месопотамии, Вавилоне, Ассирии, Урарту, Халдее, и позже в Риме и Греции. Предшественником маятника можно считать лозу, с ее помощью в далекой древности люди находили воду. Маятник, или правильнее говорить — отвес, — это разновидность лозы.

Можно подолгу зачарованно наблюдать за монотонным непрерывным движением маятника:

«О, маятник душ строг —
Качается глух, прям,
И страстно звучит рок
В запретную дверь к нам...»
(О. Мандельштам)



Его сразу же взяли на вооружение прорицатели, гадалки, колдуны, маги разного уровня. Недаром именно рисунок маятника украшал первое издание знаменитых предсказаний Нострадамуса. Служили отвесы для получения неизвестных сведений из настоящего, прошлого и будущего. Их удерживали за подвеску между указательным и большим пальцами (см. рис.), отвесы делали прямолинейные, эллиптические или кругообразные движения, значения которых предварительно устанавливалось владельцем отвеса. Но маятником также интересовались практически все ученые-естествоиспытатели от Аристотеля до наших дней. А для нас наибольший интерес представляют исследования этого предмета Галилеем.

Широко цитируемая легенда приписывает Галилею такой случай, побудивший его к глубоким исследованиям маятника. Как-то в одно воскресное утро 1583 года Галилео, слушая в соборе в Пизе долгую церковную службу, обратил внимание на то, как раскачивался вперед и назад свисавшая с потолка люстра. Галилео по ударам своего пульса стал отсчитывать время, за которое люстра делала качания.

Использование пульса для измерения времени относится к средневековой Европе. Как свидетельство тому можно рассматривать строки из «Бури» Шекспира:

«Перед собой, летя, я выпью воздух,
И ворочусь я прежде, чем твой пульс
Не более двух раз успеет стукнуть»
(пер. Н. Сатина).

Люди хотят верить легендам. Туристам, которые посещают привлекающий своими архитектурными формами и внушительными размерами Беломраморный Главный собор XI века в Пизе, рассказывают легенду о лампе Галилея. Эта бронзовая лампа, представляющая собой огромную люстру на 49-метровом жестком подвесе, была создана прославленным Бенвенутто Челлини. Но далека от действительности легенда о том, что Галилей открыл закономерность маятниковых движений, наблюдая за люстрой, висевшей на длинном шнуре в Пизанском соборе. Дело в том, что он объявил о своем открытии в 1581 году, тогда как люстра была повешена 6 годами позже.

Он сравнил длительность отдельных качаний и обнаружил, что большое колебание люстры длится столько же, сколько малое. С этого начались его исследования маятника, а маятник — это любой груз, висевший на нити. Галилей наблюдал за колебаниями маятника, меняя грузы, длину нити и начальное отклонение. В дальнейшем Галилей произвел следующий эксперимент: подвесил два свинцовых шара на нитях одинаковой длины и, отклоняя их от вертикали на разные углы, одновременно отпускал. Из этих опытов Галилей сделал вывод о том,

что за равные промежутки времени маятник совершает одинаковое число колебаний, поэтому решил использовать маятник для создания часов. Он начал эту работу, однако не успел ее закончить. В дальнейшем началась борьба за приоритет в создании маятниковых часов, в которой принимал участие ученик Галилея Вивiani и Христиан Гюйгенс. (Но это уже другая история, о ней можно прочитать в нашей книге «На кого упало яблоко».)



Рис. 3.4. Христиан Гюйгенс (портрет работы Каспара Нечера (1671), масло, музей Boerhaave)

Серьезно заинтересовался проблемой колебаний маятника Христиан Гюйгенс. Его можно считать непосредственным преемником Галилея в науке. По словам Лагранжа, Гюйгенсу «было суждено усовершенствовать и развить важнейшие открытия Галилея». В своем сочинении «Horologium oscillatorium» (1673) Гюйгенс обосновал математическую теорию колебания маятника. Он получил формулу, описывающую период колебаний так называемого математического маятника (см. далее). Он первым установил зависимость периода колебаний от длины маятника. Если груз на подвесе считать маленькой тяжелой точкой, то период колебаний T прямо пропорционален корню квадратному из длины маятника L . Формула Гюйгенса записывают во всех учебниках физики в таком виде:

$$T = 2\pi\sqrt{L/g}.$$

Однако сам автор для практических целей пользовался более простой формулой. Из-за того, что величина g — ускорение силы тяжести — близко к 10, формула упрощается и приобретает вид: $T \sim 2\sqrt{L}$.

Так как в формуле переменной величиной является длина маятника, то и период колебания будет зависеть только от длины маятника и не будет зависеть от амплитуды колебаний. Независимость периода колебаний от амплитуды называется изохронностью.

Маятник лучше всего подходит для измерения времени, поэтому он нашел применение в часах. Маятник совершает колебания за правильные отрезки времени, и если его закрепить на часах таким образом, чтобы он управлял движением колес, то движение механизма станет таким же правильным, как и движение маятника.

Маятник — самая важная деталь часов. Изобретением настоящих, точных и надежных маятниковых часов мы обязаны Христиану Гюйгенсу, который создал их в 1656 году. А. Зоммерфельд назвал Гюйгенса «гениальнейшим часовым, мастером всех времен». В часах Гюйгенса маятник совершал свои колебания под действием восстанавливающей силы, пропорциональной ускорению силы тяжести, для жителей Земли величины постоянной. Основным элементом, помимо маятника, в таких часах является устройство (спусковой механизм), которое преобразует непрерывное вращательное движение в колебательное или возвратно-поступательное движение. Это устройство обеспечивает равномерное расходование энергии, запасенной в пружине или гире.

Создание подобных часов было действительно революционным, так как впервые была достигнута большая точность в измерении времени, что имело огромное научное и практическое значение. Маятниковые часы со спусковым ме-

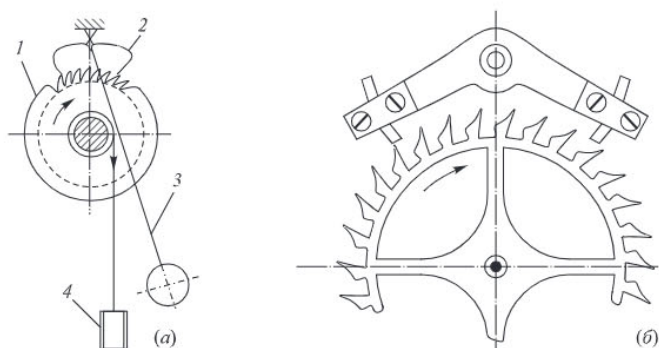


Рис. 3.5. Спусковой механизм маятниковых часов: а) общий вид: 1 — спусковое колесо; 2 — анкер; 3 — маятник; 4 — гиря; б) спусковой механизм усовершенствованного типа

ханизмом стали основой экспериментальной техники, столь необходимой для развития физики.

Завершив описание некоторых работ Гюйгенса в области колебаний, опять возвращаемся к трудам Галилея в механике. Но прежде остановимся на таком интересном вопросе: как ученые в описываемое время общались, каким образом в век карет, отсутствия привычных нам средств коммуникации узнавали о работах друг друга?

Общение ученых во времена Галилея и Гюйгенса. В дальнейшем, рассказывая о результатах, полученных Галилеем, Ньютоном и другими учеными того периода, мы будем ссылаться на опубликованные ими труды, описывать их отношения друг с другом, часто непростые... Нам трудно сейчас представить себе, как медленно осуществлялась связь между учеными в описываемое время. Жизнь характеризовалась неспешным, как и в предыдущие эпохи, развитием техники. Особенно это отчетливо видно при взгляде на архаичность транспортных средств в это время. Кареты в своем зачаточном виде появились только во второй половине или в конце XVI века (а стекла появились в них лишь в XVII в.). На плохих дорогах — ничтожные скорости. Усыпанные щебнем или мощенные камнем дороги надолго останутся исключением. Использовали ли лошадей, экипажи, суда или скороходов, в среднем скорость передвижения не превышала самое большое 100 км в сутки (см.: Бродель Ф. Структуры повседневности. Т. 1. Прогресс, 1986).

В XVII веке значительно оживляется обмен информацией между учеными. Преобладающей формой научного обмена продолжает оставаться переписка. Однако объем и разнообразие информации, идущей по этому каналу, резко возрастает. Еще в начале XVII века роль неформальных «информационных центров» часто играли частные лица (такие как Мерсенн в Париже, а немного позже Генри Ольденбург и Джон Коллинз в Лондоне); поддерживая активную переписку с учеными в своих странах и за границей, они могли держать группу заинтересованных лиц в курсе текущих интеллектуальных достижений. Особенно стоит отметить известного физика и математика М. Мерсенна (1586–1648), который был «главным почтамтом для всех ученых Европы, начиная с Галилея и кончая Гоббсом». В переписке сообщались доказательства важнейших теорем, описания научных опытов, философские концепции, политические проекты и т. д.; письма

ученых размножались, становились широко известными, а иногда прямо предназначались самими авторами для публикации. Все эти люди были беззаветно преданы науке, которой они отдавали все свое время, весь свой энтузиазм, а нередко (как, например, Коллинз) и все свои средства.

Уже в 60-е годы XVII века в Европе создаются условия для крупных коллективных исследований в различных областях науки, возникают стабильные интернациональные центры научной ориентации-академии (см. подробнее «На кого упало яблоко»). В конце XVII века неофициальные сети научной коммуникации стали замещаться первыми научными журналами, возникает и приобретает всеобщее признание неизвестная ранее форма обмена информацией — научная периодика. Первый европейский журнал («Журнал ученых», 1665–1828) был создан по инициативе французского министра финансов Жана-Батиста Кольбера, которого часто сравнивают с кардиналом Ришелье. Кольбер задумал периодическое издание, которое бы освещало научные, критические и литературные проблемы, стоящие перед интеллектуальной элитой Европы. В это время начинает издаваться (сначала Ольденбургом, затем Робертом Гуком) научный периодический журнал Королевского общества «Philosophical Transactions». В том же году в Париже стал выходить «Журнал ученых» («Journal des Savants»). Несколько позже, в 1682 году, в Лейпциге появился первый номер журнала «Acta Eruditorum». С возникновением физических научных обществ, физических отделений Академий наук и университетов начали издаваться *физические журналы*. Но это произошло уже в девятнадцатом веке, когда происходило разделение общефизических журналов на периодические издания по различным областям физики.

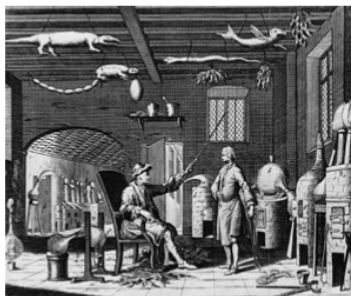


Рис. 3.6. Лаборатория XVIII века. Ученый инструктирует своего ассистента. Рисунок из журнала «Universal Magazine — Practical Chemistry», 1748 г. Фото: Халтон Эрчив (Hulton)

С самого момента появления упомянутые журналы стали местом великих научных баталий, в которых участвовали крупнейшие умы. В этот период наблюдается важное организационное изменение: развивается книгоиздательская индустрия. Если в XVI веке было опубликовано незначительное количество книг, то в XVII веке количество книг резко возрастает.

Таким образом, к концу семнадцатого века уже имеются места встреч ученых между собой, а также возможности изложения результатов своих исследований не только в частной переписке, но и в научных журналах и книгах. Обратившись к их содержанию, мы можем увидеть многое из того, что теперь входит в обычные школьные учебники по физике.

4. *Свободное падение тел и здравый смысл. Эксперименты Галилея с наклонной плоскостью. Движение тела, брошенного под углом к горизонту. «Диалоги». Принцип инерции Галилея.*

Из опытов с падающими телами люди установили, что маленький и большой камни, выпущенные из рук одновременно, падают с одинаковой скоростью. Это для тяжелых предметов. Но вот очень легкие (как, например, перья птиц, листья

деревьев и т. п.) падали с заметно меньшей скоростью. Отсюда делался вывод, что чем тело тяжелее, тем быстрее оно падает. Некоторые древние ученые, по-видимому, проводили вполне разумные опыты с падающими телами, но использование в Средние века античных представлений, предложенных Аристотелем, скорее запутало вопрос. Великий греческий философ и ученый, по-видимому, придерживался распространенного представления о том, что тяжелые тела падают быстрее, чем легкие. Действительно, наблюдения, которые каждый из нас может проделать в повседневной жизни, казалось бы, подтверждают это.

Окончательно парадокс, явно противоречащий здравому смыслу, — время падения тел с одной и той же высоты не зависит от величины массы — был разрешен в опытах Галилея. Пожалуй, это был первый в истории научный результат, так явно противоречащий всей исторической практике людей! Галилей не только проверил опытом и отстаивал это утверждение, но и установил вид движения тела, падающего по вертикали: «...Говорят, что естественное движение падающего тела непрерывно ускоряется. Однако в каком отношении происходит, до сих пор не было указано; насколько я знаю, никто еще не доказал, что пространства, проходимые падающим телом в одинаковые промежутки времени, относятся между собою как последовательные нечетные числа».

Эксперимент Галилея прочно ассоциируется с бросанием шаров с Пизанской башни. Об этом писал его ученик и биограф Винченцо Вивiani. Однако подобный опыт не фигурирует в произведениях самого Галилея. Ученые XX века склонны были считать эксперимент с Пизанской башней вымыслом биографа. Это было связано с тем, что для проверки этого закона в эксперименте было необходимо отмечать положения падающих тел в последовательные моменты времени. Но тела падают слишком быстро, и в XVI веке еще не было приборов, позволяющих точно фиксировать положение падающих тел в определенные моменты времени. Так что эксперимент с башней, видимо, из разряда устойчивых мифов. Известно только, что Галилей проводил опыты с телами, скатывающимися по наклонной плоскости. Галилей придумал предельно простой способ, позволяющий как бы замедлить скорость падения тела: для своего эксперимента он использовал узкую доску длиной 12 локтей (примерно 5 метров) с желобом, выстлав этот желоб пергаментом для уменьшения силы трения. По желобу в доске, установленной под углом к горизонту, скатывался бронзовый шар.

Ставился этот эксперимент, наверное, в 1604 году. Примерно через тридцать лет Сальвиати в «Диалогах» (о них подробнее ниже) так его описал:

Берем деревянную болванку или брус длиной 12 локтей (Флорентийский локоть равен двадцати дюймам), в локоть шириной и толщиной в три пальца. Прорежем в нем желоб шириной чуть более одного пальца. Сделав эту канавку очень прямой, ровной и отполированной и выстелив ее пергаментом, тоже гладким и отполированным настолько, насколько это возможно, начнем катать по ней твердый, гладкий и очень круглый шар.

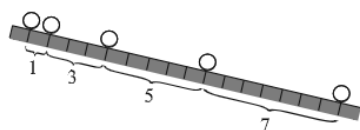
Следует заметить, что и шары, и желобы в опытах Галилея были достаточно внушительных размеров, а сами опыты выполнялись не в помещении, а на улице.

Установив доску наклонно путем поднятия одного ее конца на два локтя над другим ее концом, мы пускали шарик, как я уже говорил, по желобу, отмечая, как будет описано отдельно, время, необходимое шарiku для спуска. Мы

повторяли этот эксперимент несколько раз, чтобы измерить время с точностью не хуже одной десятой сердечного ритма.

Усовершенствовав методику, рассказывал далее в «Диалогах» Сальвиати, удалось измерить время, необходимое шару, чтобы преодолеть одну четвертую пути, две трети, а затем три четверти пути. Эксперименты повторялись при разных углах наклона доски, и всего было проведено сто измерений, при этом использовалось простое устройство под названием «водяные часы», которые похожи на песочные, только вместо песка в них вода. Галилей использовал большой сосуд, в дне которого было небольшое отверстие. Из него вытекала тонкая струйка воды, которая заполняла сосуд. Эта струйка воды направлялась в небольшой сосуд, который предварительно взвешивался. Промежуток времени измерялся по увеличению (приращению) веса сосуда. Вот так ставились эксперименты во времена Галилея!

Галилей установил, что время скатывания шаров не зависит от угла наклона, а зависит лишь от высоты (h) поднятия одного ее конца. При этом, несмотря на несовершенство физических приборов, разница во времени оказалась достаточно заметной. Галилей писал: «Пустив шар по длине, равной четверти длины желоба, я нашел, что время пробега в точности равнялось половине времени, какое употреблялось для прохождения целого желоба... Оказалось, что расстояния, пройденные шариком за последовательные одинаковые промежутки времени (за первую, вторую, третью и т. д. секунды), соотносятся как $1 : 3 : 5 : 7 : 9$ и т. д. То есть расстояние, пройденное шариком за вторую секунду, в три раза, а за третью — в пять раз больше, чем за первую. Суммы последовательных чисел этого ряда образуют квадраты:



$1 = 1$;
 $1 + 3 = 4$ — за две секунды;
 $1 + 3 + 5 = 9$ — за три секунды;
 $1 + 3 + 5 + 7 = 16$ — за четыре секунды и т. д.

«Из опытов, сто раз повторенных, я всегда находил, что проходимые пути относятся между собою как квадраты времен», — писал Галилей.

Теперь мы говорим: путь, пройденный телом при движении с постоянным ускорением, пропорционален квадрату времени.

В результате этих опытов Галилей пришел к следующим выводам:

1. Все тела при падении движутся одинаково: начав падать одновременно, они движутся с одинаковой скоростью.

2. Движение происходит с «постоянным ускорением»; темп увеличения скорости тела не меняется, то есть за каждую последующую секунду скорость тела возрастает на одну и ту же величину.

Известный историк науки Александр Койре (1892–1964) заметил, что «мысль заменить свободное падение тел движением по наклонной плоскости является в самом деле признаком гениальности». Галилеева наклонная плоскость — это, по сути, первая экспериментальная установка. Недаром бытует изречение: «Наука спустилась с небес на Землю по наклонной плоскости Галилея».

Галилей понимал, что последователей Аристотеля сбивало с толку сопротивление воздуха. Он указал, что плотные предметы, для которых сопротивление воздуха несущественно, падают почти с одинаковой скоростью. Галилей писал:

«...Различие в скорости движения в воздухе шаров из золота, свинца, меди, порфира и других тяжелых материалов настолько незначительно, что шар из золота при свободном падении на расстоянии в одну сотню локтей наверняка опередил бы шар из меди не более чем на четыре пальца. Сделав это наблюдение, я пришел к заключению, что в среде, полностью лишенной всякого сопротивления, все тела падали бы с одинаковой скоростью».

В условиях Земли падение тел считается условно свободным, так как при падении тела в воздушной среде всегда возникает еще и сила сопротивления воздуха. Идеальное свободное падение возможно лишь в вакууме, где нет силы сопротивления воздуха, и независимо от массы, плотности и формы все тела падают одинаково быстро, то есть в любой момент времени тела имеют одинаковые мгновенные скорости и ускорения.

Наблюдать идеальное свободное падение тел можно в трубке Ньютона, если с помощью насоса выкачать из нее воздух (см. рис. 4.1). В стеклянную трубку помещают различные предметы: дробинки, кусочки пробки, пушинки и т. д. Если перевернуть трубку так, чтобы эти предметы могли падать, то быстрее всего упадет дробинка, за ней — кусочек пробки, и, наконец, плавно опустится пушинка. Но если выкачать из трубки воздух, то мы увидим, что все три тела упадут одновременно. Значит, движение пушинки задерживалось ранее сопротивлением воздуха, которое в меньшей степени сказывалось на движении, например, пробки. Когда же на эти тела действует только притяжение к Земле, то все они падают с одним и тем же ускорением.

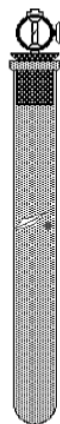


Рис. 4.1.
Трубка
Ньютона

Галилей, естественно, не мог точно определить ускорение свободного падения (g), поскольку не имел секундомера. Песочные, водяные часы не способствовали точному отсчету времени. Галилей определил ускорение свободного падения с большой ошибкой. В «Диалогах» он утверждает, что шар падал с высоты 60 м в течение 5 с. Это соответствует значению g , почти в два раза меньшему истинного. Ускорение свободного падения было достаточно точно определено лишь Гюйгенсом в 1660 году.

При реальных физических движениях тел в газовой или жидкостной среде трение накладывает огромный отпечаток на характер движения. Любой предмет, сброшенный с большой высоты (например, парашютист, прыгнувший с самолета), вовсе не движется равноускоренно, так как по мере набора скорости возрастает сила сопротивления среды. Известен такой факт: один из американских каскадеров совершил прыжок в воду с высоты 75 м (Бруклинский мост), и скорость приземления была 33 м/с. Сравнение этой величины с получившейся по формуле свободного падения дает конечную скорость около 38 м/с. Такая получается разница даже для небольшой высоты (udik.com.ua/books/book-574/chapter-20201).

Падение тел, брошенных под углом к горизонту. Закончив изучение падения тел по вертикали, Галилей занялся исследованием важного с точки зрения практики вопроса о падении тела, брошенного под углом к горизонту. Изучение особенностей такого движения началось довольно давно, еще в XVI веке, и было связано с появлением и совершенствованием артиллерийских орудий.

Законы полета метательных снарядов не привлекали особого внимания ученых до тех пор, пока не были изобретены дальнобойные орудия, которые посы-

ляли снаряд через холмы или деревья — так, что стреляющий не видел их полета. Значительно возросшие с развитием техники скорость и дальность полета снарядов и пуль сделали возможным дистанционные сражения. Знание законов движения снаряда позволяло бы при соответствующей тренировке повторять свой успех в следующем сражении. Однако лишь навыка войны, разрешающей способности его глаза было недостаточно для точного попадания в цель артиллерийской дуэли первым. Близко к правильному решению о полете пушечных ядер подошли Леонардо да Винчи и итальянский математик Тарталья (1499–1557). Последний сумел показать, что наибольшей дальности полета снарядов можно достичь при направлении выстрела под углом 45° к горизонту. В его книге



Рис. 4.2. Так в Средневековье представляли себе траекторию пушечного ядра (Википедия)

«Новая наука» были сформулированы правила стрельбы, которыми артиллеристы руководствовались до середины XVII века. Леонардо да Винчи и Тарталья отрицали старую, неправильную качественную картину движения брошенного тела и противопоставили ей другую, более правильную, но тоже качественную картину. Галилей существенно развил теорию этого вопроса. Пожалуй, ни по одному из вопросов механики Галилей не сделал большего, не проник так глубоко в сущность процесса, как в области изучения законов движения тела, брошенного под углом к горизонту.

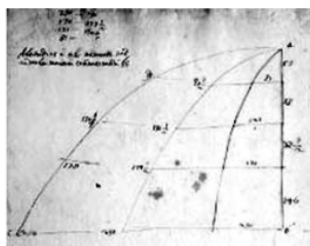


Рис. 4.3. Фрагменты рукописи Галилея — расчеты движения по параболе

Галилей дал метод расчета траекторий движения тела для любых углов вылета и для любых начальных скоростей. Он впервые использовал геометрическое сложение скоростей, то есть приблизился к векторному представлению о скорости. По сути, он использовал принцип независимости движений, известный в других областях физики как принцип суперпозиции (наложения). Согласно принципу суперпозиции результирующий эффект нескольких воздействий представляет собой сумму эффектов от каждого воздействия в отдельности. Он является следствием линейности уравнений движения.

Историю динамики открывают «Беседы» Галилея. «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящиеся к механике и местному движению» — одна из двух фундаментальных книг Галилео Галилея, изданная в 1638 году, шесть лет спустя после его «Диалогов о двух важнейших системах мира, птолемеевской и коперниканской», о которых поговорим ниже. Изложенные в них законы сыграли огромную роль в становлении

механики. Беседа происходит между знакомыми героями «Диалога». На этот раз они обсуждают свободное падение тел, качание маятника, прочность механизмов, вычисляют площади, объемы тел. Затем собеседники ведут речь о применении закона рычага в различных механизмах, о равноускоренном движении, о движении тела, брошенного под углом к горизонту и убеждаются, что максимальная дальность полета достигается, если угол равен 45° .

В период 1604–1632 гг. Галилей пишет «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой» — итог почти 30-летней работы. Книга в основном была завершена марте 1630 года и после долгих мытарств вышла во Флоренции в 1632 году.

Галилей избрал для изложения своих взглядов форму диалога (дискуссии двух собеседников). Диалог идет между тремя любителями науки: коперниканцем Филиппо Сальвиати (1582–1614), близким другом Галилея, нейтральным-венетиканцем Джованни Франческо Сагредо (1571–1620), тоже другом Галилея и Симпличио (персонаж вымышленный), приверженцем Аристотеля и Птолемея. Сальвиати представляет самого Галилея. Хотя в книге нет авторских выводов, сила аргументов в пользу системы Коперника говорит сама за себя. Книга написана не на ученой латыни, а на «народном» итальянском языке, что значительно расширило число читателей. Выбор формы изложения в виде диалога был более эффективным средством сравнения разных точек зрения, чем монолог, используемый в научных статьях и выражавший только одну точку зрения. Это произведение состоит из четырех диалогов, каждый из которых считается происходившим в течение одного дня.

«День первый» начинается с дискуссии о скорости света. Фактически опыт, описанный в этой работе, повторил Физо через 250 лет (см. с. 222). Галилей в то время не сумел провести этот сложный эксперимент, но его заслуга в постановке этой экспериментальной и теоретической задачи бесспорна. Далее рассматриваются проблемы движения, изучаются колебания маятников, обсуждаются акустические явления: получение звука с помощью колебаний, частота которых определяет высоту тона звука, волновое распространение в воздухе, явление резонанса, акустические интервалы. Таким образом, Галилей заложил основы современной акустики. Нас же сейчас интересует важный вопрос для всей физики — вопрос об инерции. Этот вопрос рассматривается в «День второй».

«День второй» посвящен в основном обсуждению вопроса о движении Земли. Здесь Галилей, чтобы ответить на возражения, которые, начиная с Птолемея, выдвигались против движения Земли, закладывает два краеугольных камня современной динамики: принцип инерции и классический принцип относительности. То, что мы называем инерцией, Галилей поэтически назвал «неистребимо



Рис. 4.4. Титульный лист к первому изданию «Бесед и математических доказательств, касающихся двух новых отраслей науки...» (Лейден, 1638)



Рис. 4.5. Титульный лист «Диалогов» Галилея

запечатленное движение». Принцип инерции устанавливается Галилеем с помощью рассуждения, напоминающего доказательство от противного в математике: наклон плоскости по отношению к горизонту является причиной ускоренного движения тела, движущегося вниз, и замедленного движения тела, движущегося вверх; если же тело движется по неограниченной горизонтальной плоскости, то, не имея причины ускориться или замедлиться, оно совершает равномерное движение. Принцип инерции имеет длинную историю (Кессельман В. С. Удивительная история физики. Энас-книга, 2015; далее — УИФ), однако никто раньше не формулировал его с такой ясностью.

По Аристотелю, естественным состоянием тела был покой, сила нужна для того, чтобы поддерживать движение тела по горизонтальной плоскости. Спустя 2000 лет Галилей подверг сомнению это утверждение. Он считал, что для тела естественно как совершать движение по горизонтальной плоскости с постоянной скоростью, так и пребывать в состоянии покоя. Галилей обратил внимание, что при движении по горизонтальной поверхности требуется все меньшая сила, когда происходит переход от шероховатой поверхности к гладкой. А если между телом и поверхностью будет слой масла, для перемещения предмета почти не потребуются усилия и, двинувшись, он долго будет сохранять движение без приложения внешней силы. Теоретически можно представить себе, что если трение свести к нулю, тело будет двигаться без приложения силы бесконечно долго. Рассуждения Галилея являются примером мысленного эксперимента, которыми так богата физика. «...Закон инерции, — писали А. Эйнштейн и Л. Инфельд, — нельзя вывести непосредственно из эксперимента, его можно вывести умозрительно — мышлением, связанным с наблюдением. Этот эксперимент никогда нельзя выполнить в действительности, хотя он ведет к глубокому пониманию действительных экспериментов».

Определение инерции Галилеем было сформулировано следующим образом: «Тело может совершать прямолинейное и равномерное движение, а не только покоиться, если на само тело ничего не действует». В случае свободного падения на тело постоянно действует сила притяжения, и результаты этого действия непрерывно суммируются, ибо, согласно закону инерции, вызванное раз действие сохраняется. Это представление является основой его логического построения, приведшего к законам свободного падения. Проявление инерции мы постоянно встречаем в окружающем мире, например: при резком торможении автобуса пассажиры «бросает» вперед — они продолжают двигаться с прежней скоростью (а во времена Галилея такой эффект наблюдали пассажиры при резком торможении кареты). И подобных примеров можно привести множество.

Верно, как замечают многие критики, что Галилей не дал общей формулировки этого принципа, но тот факт, что Галилей всегда точно применял его, показывает, что он понимал его во всей его общности. Галилей устранил многовековое заблуждение о движении тел: ранее считалось, что если движение не поддерживается какой-либо силой, то такое движение должно прекратиться, даже если отсутствуют причины для его остановки. Все сказанное важно для понимания того факта, что великие достижения Ньютона, о которых речь впереди, возникли отнюдь не на пустом месте. Запомним это.

8 января 1642 году Галилео Галилей умер на руках сына и ближайших учеников — Вивiani и Торричелли. Папа Урбан VIII велел похоронить Галилея

в монашеском приделе собора Санта-Кроче во Флоренции без почестей и надгробия. И когда 85 лет спустя Лондон торжественно похоронил сэра Исаака, Флоренция перенесла прах Галилея в усыпальницу собора Санта-Кроче, и он упокоился рядом с Микеланджело Буонаротти. Через 340 лет уже Римский Папа Иоанн Павел II думал о строении Вселенной так же, как Галилей. Он признал преследования Галилея несправедливыми и снял обвинения с великого ученого.

Но эстафету разума не было возможности остановить — в год смерти Галилея миру явился Ньютон...



Рис. 4.6. Галилей (слева) и другие астрономы. Гравюра 1692 года

По дорогам классической физики

Факел, зажженный Галилеем, — в руках Ньютона. Ученый закладывает фундамент механики и объясняет законы движения планет. Наконец получен ответ на вопрос: «Почему Луна не падает на Землю?» Формируется математический аппарат классической физики и на его основе создается описание разнообразных механических движений. Принципы динамики, маятник, тяготение — вот стержневые вопросы физики XVII века, к которым присоединилась еще проблема взаимодействия тел, и в первую очередь теория удара.

5. «...И вот явился Ньютон». Механика Ньютона. Математический инструмент классической физики. Равномерное движение по окружности.

После Галилея в работы физиков все больше включались формулы. Математической формулой в физике была формула для периода качания маятника, полученная Гюйгенсом на основе наблюдений Галилея. Выводил формулы и Декарт, но лишь Ньютон смог обобщить наблюдения предшественников в математическую форму, создав для этого соответствующий математический аппарат.



Рис. 5.1. Вулсторп.
Дом, где родился Ньютон



Рис. 5.2. Исаак Ньютон. 1702 год.
Портрет работы
Готфрида Кнеллера
(1648–1723)

Во второй половине семнадцатого века, точнее в 1665 году, Исаак Ньютон окончил Кембриджский университет и собирался начать работу там же, в его родном Тринити-колледже. Однако чума, бушевавшая в Англии, заставила Ньютона уединиться на своей ферме в Вулсторпе. «Чумные каникулы» затянулись почти на два года. «Я в то время был в расцвете моих изобретательских сил и думал о математике и философии больше, чем когда-либо позже», — писал Ньютон. Тогда и сделал молодой ученый почти все свои открытия в физике и математике. Заняться математикой его заставляла необходимость исследовать и выражать законы, создавшие первую научную картину мира, объединившие механику с астрономией. Законы Ньютона — это поворотный момент в истории физической науки. Можно сказать, что с законов движения Ньютона пошел отсчет истории современной физики.

Первый закон Ньютона. Галилей выявил свойство тел сохранять свою скорость, хотя еще не нашел полной и точной формулировки закона инерции. Это предстояло сделать Ньютону, который обобщил все накопленные к тому времени знания о движении физических тел и смог сформулиро-

вать законы, легшие в основу созданной им механики. Ньютон сформулировал закон инерции в 1687 году так: «Всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние». То есть если тело неподвижно, то оно так и останется в таком состоянии до тех пор, пока на него не начнет действовать какая-то внешняя сила. И, соответственно, если тело движется равномерно и прямолинейно, то оно будет продолжать свое движение до момента начала воздействия внешней силы. Это первый закон Ньютона, называемый еще законом инерции. Латинское слово *inertia* переводится на русский язык как «бездействие» и даже... «лень»! Тело, к которому не приложены силы, само по себе свою скорость не изменяет — ему как бы лень это делать. Поэтому закон Галилея–Ньютона (первый закон Ньютона) и получил название закона инерции.

Очевидные факты повседневной жизни указывают, что механическое движение относительно, то есть имеет смысл говорить только о движении одного тела относительно другого. В формулировке закона инерции Галилея упущена существенная деталь — относительно какой системы отсчета рассматривается движение. Нетрудно привести пример системы отсчета, в которой закон инерции не выполняется. Пусть поезд начинает отходить ускоренно от вокзала. Так вот в системе отсчета, связанной с поездом, вокзал движется с ускорением, хотя явных взаимодействий, приводящих к изменению скорости вокзала, незаметно. Поэтому закону инерции Галилея следует дать иную интерпретацию: существуют такие системы отсчета, в которых тело движется равномерно при отсутствии взаимодействия с другими телами. Такие системы отсчета называются инерциальными.

Пусть некоторое тело движется равномерно и прямолинейно относительно некоторой системы отсчета ХОУ. В любой другой системе отсчета, которая движется относительно ХОУ равномерно, движение этого тела будет равномерным (но, конечно, с другой скоростью). Следовательно, любая система отсчета, которая движется равномерно относительно какой-нибудь инерциальной системы отсчета, сама является инерциальной.

Есть несколько определений этого понятия. Вот два из них.

1. *Инерциальной системой отсчета считается система отсчета, которая либо движется прямолинейно и равномерно, либо сама находится в покое.*

2. *Инерциальной системой отсчета называется такая система, тела в которой либо движутся равномерно и прямолинейно, либо покоятся.*

Прямолинейное и равномерное движение свободной материальной точки в инерциальной системе отсчета называется движением по инерции. При таком движении вектор скорости материальной точки остается постоянным ($v = \text{const}$). Покой точки является частным случаем движения по инерции ($v = 0$). Вопрос о существовании инерциальных систем отсчета на самом деле не такой простой. Во многих случаях в качестве инерциальной системы отсчета рассматривают систему отсчета, связанную с поверхностью Земли. Строго говоря, эта система не является инерциальной, так как Земля вращается вокруг собственной оси, то есть движется с ускорением. Эта неинерциальность проявляется в целом ряде экспериментов: в движении известного маятника Фуко (см. с. 188), отклонении в полете снарядов, подмыве одного из берегов рек и т. д. Безусловно, эти эффекты малы, и при решении многих задач ими можно пренебречь, то есть считать Землю инерциальной системой. Аналогичные рассуждения можно применить и к другим более грандиозным системам, например связанным с Солнцем или другими звездами.

В современной трактовке первый закон Ньютона формулируется так:

«Существуют такие (а именно, инерциальные) системы отсчета, относительно которых движущееся поступательно тело сохраняет скорость постоянной, если на само тело ничего не действует (либо сумма всех сил, которые действуют на определенное тело, равна нулю)».

Первый закон Ньютона дает нам ответ на вопрос: «А в каком случае тело будет двигаться прямолинейно и равномерно?»

Второй закон Ньютона. Второй закон механики призван ответить на вопрос: «В каком случае тело приобретет ускорение и будет двигаться с ним?»

Первый закон Ньютона утверждает, что для изменения скорости движения необходимо приложение силы. Это касается увеличения скорости, уменьшения ее или остановки движущегося объекта. Любая механическая система, обладающая массой, является инерционной, то есть препятствующей изменениям, «сопротивляющейся» им.

Итак, для того, чтобы тело находилось в состоянии покоя или двигалось равномерно, не нужно делать ничего. Напротив, заставить изменить скорость может лишь сила — «Сила есть причина ускорения».

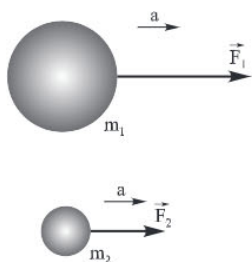


Рис. 5.3. Для сообщения двум телам разной массы одного и того же ускорения требуются разные силы

Изменить скорость не означает обязательно изменить ее величину. Можно изменить лишь направление скорости, оставляя ее величину неизменной. Поэтому здесь мы рассматриваем скорость, ускорение, силу как величины векторные, хотя сам векторный анализ Ньютону был неизвестен. Этот раздел математики возник гораздо позже, а его применение в физике началось примерно в середине девятнадцатого века. Инертность — это свойство тела, а масса тела — физическая величина, являющаяся мерой инертности тела. Человеческий опыт свидетельствует: чем она больше, тем инертнее тело, тем большую силу нужно приложить, чтобы оно начало двигаться. А если тело движется, то для изменения его скорости или остановки потребуется тем большая сила, чем тело массивнее (см. рис. 5.3).

Итак, ускорение тела \mathbf{a} ¹ прямо пропорционально действующей силе \mathbf{F} и обратно пропорционально массе тела m : $\mathbf{a} \sim \mathbf{F}/m$. Это как раз утверждает второй закон Ньютона.

Поскольку ускорение — векторная величина, то и сила — величина векторная. Обычно на тело действует несколько сил, тогда под силой \mathbf{F} понимают равнодействующую силу, то есть геометрическую сумму сил. В этом случае второй закон Ньютона принимает вид

$$\mathbf{a} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \frac{\mathbf{F}}{m}.$$

Из приведенного соотношения следует, что тело будет совершать равномерное прямолинейное движение не только тогда, когда на него не действуют ника-

¹ Здесь и в дальнейшем векторы в тексте выделены жирным шрифтом.

кие силы (первый закон Ньютона, движение по инерции), но и тогда, когда векторная сумма приложенных к телу сил равна нулю. Второй закон Ньютона можно сформулировать по-другому: произведение массы тела на его ускорение равно векторной сумме всех действующих на тело сил: $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$

Здесь в левой части равенства стоит равнодействующая сила (векторная сумма всех приложенных к телу сил). Отметим важное обстоятельство. В этом законе ничего не говорится о характере самих сил. Эти силы могут быть разными: механическими, электрическими и т. п. Поэтому закон Ньютона описывает широчайший круг физических явлений.

Замечание, которое стоит прочитать. В неинерциальной системе отсчета второй закон (как и первый) не выполняется. Например, в падающем свободно лифте ускорение \mathbf{a} человека равно нулю, хотя сила \mathbf{F} нулю не равна, так как действует сила тяжести.

Для того чтобы уравнение движения материальной точки в неинерциальной системе отсчета по форме совпадало с уравнением второго закона Ньютона, дополнительно к «обычным» силам (трения, упругости, тяготения), действующим в инерциальных системах, вводят силы инерции.

При учете сил инерции второй закон Ньютона будет справедлив для любой системы отсчета: произведение массы тела на ускорение в рассматриваемой системе отсчета равно сумме всех сил, действующих на данное тело (с учетом и силы инерции). При этом силы инерции \mathbf{F}_{in} должны быть такими, чтобы вместе с силами \mathbf{F} , обусловленными воздействием тел друг на друга, они сообщали телу ускорение \mathbf{a}' , каким оно обладает в неинерциальных системах отсчета.

Так как $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ (\mathbf{a} — ускорение тела в инерциальной системе отсчета), то

$$m\mathbf{a}' = m\mathbf{a} + \mathbf{F}_{in}.$$

Рассмотрим пример: силы инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета. На тележке к штативу на нити подвешен шарик массой m (см. рис. 5.4).

Пока тележка покоится или движется прямолинейно и равномерно, нить, которая удерживает шарик, занимает вертикальное положение и сила тяжести \mathbf{P} уравновешивается силой реакции (натяжения) нити \mathbf{T} .

Если тележку привести в поступательное движение с ускорением \mathbf{a}_0 , то нить будет отклоняться от вертикали в сторону, обратную движению, до такого угла α , пока результирующая сила $\mathbf{F} = \mathbf{P} + \mathbf{T}$ не даст ускорение шарика, равное \mathbf{a}_0 . Значит, результирующая сила \mathbf{F} направлена в сторону ускорения тележки \mathbf{a}_0 и для установившегося движения шарика (теперь шарик движется вместе с тележкой с ускорением \mathbf{a}_0) равна $\mathbf{F} = m\mathbf{g} \operatorname{tg} \alpha = m\mathbf{a}_0$, откуда находим угол отклонения.

В системе отсчета, которая связана с ускоренно движущейся тележкой, шарик покоится, что возможно, если сила \mathbf{F} уравновешивается равной и противоположно направленной ей силой \mathbf{F}_{in} , которая является ни чем иным, как силой инерции, так как на шарик никакие другие силы не действуют. Таким образом, $\mathbf{F}_{in} = -m\mathbf{a}_0$.

Проявление сил инерции при поступательном движении, как мы уже отмечали, мы можем видеть в повседневных явлениях. Если поезд набирает скорость, то пассажир, сидящий при этом по ходу поезда, прижимается к спинке сиденья под действием силы инерции. Наоборот, при торможении поезда пассажир отклоняется от спинки сиденья, так как сила инерции направлена в противоположную сторону. Особенно в этом случае внезапного торможения силы инерции яв-

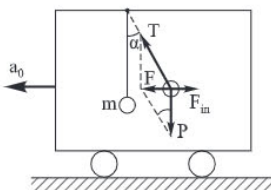


Рис. 5.4. К расчету сил инерции, действующих на тело при ускоренном поступательном движении системы (www.terver.ru/Sila_inerci.php)

но заметны. Эти силы проявляются в перегрузках, возникающих при запуске и торможении космических кораблей.

Уверенность в справедливости второго закона Ньютона основывается не только на результатах отдельных опытов, которые позволяют подойти к формулировке этого закона, а главным образом на том, что все вытекающие из него следствия, проверяемые как специальными опытами, так и всей человеческой практикой, оказываются правильными.

Второй закон Ньютона описывает количественно действие сил на тело. Понятно, что Ньютон не мог ограничиться двумя этими законами. Надо было охарактеризовать случай взаимодействия тел. Он описывается третьим законом.

Третий закон Ньютона. Но откуда появляются сами силы? Наблюдения людей наводят на мысль, что силы появляются в результате действия одного тела на другое. Ньютон понял, что такое взаимодействие не является односторонним. Классический пример: лошадь, везущая телегу, действует на телегу, но и телега

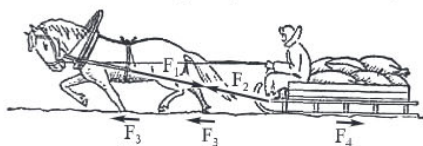


Рис. 5.5

не остается в стороне. Она, в свою очередь, действует на лошадь. Всякий раз, когда одно тело действует с некоторой силой на другое, со стороны второго тела на первое действует сила противодействия, равная по величине и противоположная по направлению силе действия.

Иногда этот закон формулируют сокращенно так: «Сила действия равна по величине и противоположна силе противодействия».

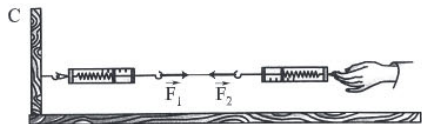


Рис. 5.6. Иллюстрация третьего закона Ньютона

Возьмем два динамометра, зацепим друг за друга их крючки и, взявшись за кольца, будем растягивать их, следя за показаниями, обоих динамометров (см. рис. 5.6). Мы увидим, что при любых растяжениях показания обоих динамометров будут совпадать; значит, сила, с которой первый динамометр действует

на второй, равна силе, с которой второй динамометр действует на первый.

Третий закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета.

Вернемся к классическому примеру с лошадью, приведенному выше. Но если третий закон справедлив, то как может возникнуть движение? Как объяснить, что лошадь везет сани, если, как это следует из закона действия и противодействия, сани тянут лошадь назад с такой же силой F_1 , с какой лошадь тянет сани вперед (сила F_2)? Почему эти равные и противоположные силы не уравновешиваются? Лошадь сдвинет и повезет нагруженные сани, потому что со стороны грунта на ее копыта действуют большие силы трения, чем на скользкие полозья саней. Дело в том, что, во-первых, хотя эти силы равны и прямо противоположны, они приложены к разным телам (о чем упомянуто в тексте, выделенном курсивом), а во-вторых, и на сани, и на лошадь действуют еще и силы со стороны грунта (см. рис. 5.6). Сила со стороны лошади приложена к саням, испытывающим кроме этой силы лишь небольшое трение F_4 полозьев о снег; поэтому сани

начинают двигаться вперед. К лошади же помимо силы со стороны саней F_1 , направленной назад, приложены со стороны дороги, в которую она упирается ногами, силы F_3 , направленные вперед и большие, чем сила со стороны саней. Поэтому лошадь тоже начинает двигаться вперед. Если поставить лошадь на лед, то сила со стороны скользкого льда будет недостаточна и лошадь не сдвинет сани. То же будет и с очень тяжело нагруженным возом, когда лошадь, даже упираясь ногами, не сможет создать достаточную силу, чтобы сдвинуть воз с места. После того как лошадь сдвинула сани и установилось равномерное движение саней, сила F_4 будет равна сумме сил F_3 (первый закон Ньютона).

Подобный же вопрос возникает и при разборе движения поезда под действием локомотива. И здесь, как и в предыдущем случае, движение возможно лишь благодаря тому, что кроме сил взаимодействия между тянущим телом (локомотив) и «прицепом» (поезд) на тянущее тело действуют со стороны грунта или рельсов силы, направленные вперед. На идеальной скользкой поверхности, от которой нельзя оттолкнуться, ни сани с лошадью, ни поезд, ни автомобиль не могли бы сдвинуться с места. О трении мы поговорим далее.

Применяя третий закон Ньютона, всегда следует помнить, что равные по модулю и противоположно направленные силы действия и противодействия приложены к разным телам и поэтому не могут уравновешивать друг друга.

Ньютон не только сформулировал три закона механики, он разработал математический аппарат, ставший главным инструментом классической физики. Без математики были невозможны достижения науки XVII века. Правда, законы, открытые этими учеными, не были записаны в привычном для нас виде. Надо сказать, что все физические законы Галилея, Декарта, Гюйгенса, Ньютона — и вообще всех первых физиков — имеют вид пропорций или ее частных случаев. Если для математика или физика XX века пропорция выступает лишь частным случаем функциональной зависимости, то к моменту формулировки первых законов физики понятие пропорции рассматривалось в качестве канона, но никак не функции, само понятие которой утвердилось в науке лишь после работ Г. Лейбница и И. Ньютона (см. УИМ). Связь величин называется пропорцией, связь отношений содержится в понятии функции.

А заняться математикой Ньютона заставляла необходимость исследовать и выражать законы, полученные в результате обобщения человеческого опыта. Ньютоном были заложены основы математического анализа: он первым построил дифференциальное исчисление и дал возможность решать самые разнообразные математические и физические задачи. Без математического понятия производной функции нет физического понятия скорости. Без дифференциальных уравнений нет законов классической механики и т. д.

Ньютон, по-видимому, никому не рассказывал о своих открытиях, не публиковал их. Об этих открытиях мир узнал лишь через тридцать с лишним лет. Это привело к конфликту с Лейбницем за приоритет в создании основ дифференци-

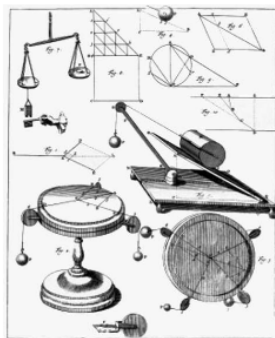


Рис. 5.7. Старинные иллюстрации к законам физики. Гравюра. Законы Ньютона. Датирована XVII в.

ального исчисления, что на десятилетия привело к прерыванию контактов между английскими и европейскими учеными (см. подробнее в УИМ).

Основные задачи Ньютон формулировал в терминах механики.

Первая задача: определение скорости движения по известной зависимости пути от времени; в этом случае вектор скорости определяется через первую производную от пути: $v = dS/dt$, а ускорение через первую производную от скорости: $a = dv/dt$.

Вторая задача: определение пройденного за данное время пути по известной скорости. В этом случае необходимо использовать интеграл, и задача становится неоднозначной. Чтобы получить единственное решение, используют начальные условия. Так для скорости имеем $v = \int a dt + \text{const}$. Если ускорение постоянно, а скорость в начальный момент равна некоторому значению v_0 , то в итоге получим $v = v_0 + at$. Зависимость пути от времени $S(t)$ для рассматриваемого случая находим интегрированием полученного выражения для скорости. Если в начальный момент $S = 0$, тогда имеем $S(t) = v_0 t + at^2/2$. Получили знакомое выражение зависимости пути от времени для равноускоренного движения, т. е. для случая, когда величина ускорения постоянна, а движение происходит по прямой линии.

А теперь расшифруем написанные выше соотношения.

Нетрудно увидеть, что центральное понятие дифференциального исчисления — производная — возникла при рассмотрении задачи об определении скорости неравномерного движения. Скорость — это быстрота перемещения объекта в заданном направлении. В общем нахождение скорости объекта (v) — простая задача: нужно разделить перемещение (s) в течение определенного времени (t) на это время (t), то есть воспользоваться формулой $v = s/t$. Однако таким способом получают среднюю скорость тела. Используя некоторые вычисления, можно найти скорость тела в любой точке пути. Такая скорость называется мгновенной скоростью. Вот для решения второй задачи и потребовалось создать специальный математический аппарат. Будем вслед за Г. Галилеем изучать закон свободного падения тел. Пусть тело падает с некоторой высоты h .

Галилей экспериментально нашел, что путь h , пройденный телом из состояния покоя за время t , пропорционален квадрату времени.

Известная со школьной скамьи формула этой зависимости имеет вид: $h(t) = gt^2/2$, где g — некоторая постоянная, как выяснилось позднее, равная приблизительно $9,81 \text{ м/с}^2$. Движение свободно падающего тела явно неравномерное. Скорость V падения постепенно возрастает. Но как именно выглядит зависимость $V(t)$? Такую зависимость нетрудно найти, рассматривая пути, пройденные телом за очень маленький промежуток времени (τ). На этом малом промежутке времени средняя скорость приближенно равна $[h(t + \tau) - h(t)]/\tau$. Понятно, что это значение скорости будет тем ближе к значению скорости в момент времени t (к так называемой мгновенной скорости), чем меньше величина τ . Значит, скорость в момент t можно найти, уменьшая интервал времени τ . Математически это выражается с помощью перехода к пределу и записывается следующим образом: $V(t) = \lim [h(t + \tau) - h(t)]/\tau$, когда $\tau \rightarrow 0$ (говорят, τ стремится к нулю).

Подставляя зависимость для $h(t)$, после ряда несложных преобразований находим искомое значение мгновенной скорости $V = gt$.

К проблеме определения мгновенной скорости можно подойти и с геометрической стороны. Для рассмотренного случая график зависимости пути, проходя-

мого падающим телом от времени, есть парабола. Попробуем наши аналитические расчеты перевести на «геометрическую сцену». Если мы возьмем точку на кривой и пожелаем определить наклон касательной в этой точке, мы можем выбрать вторую точку, близкую к первой, и соединить эти две точки прямой. Далее мы можем построить прямоугольный треугольник, в котором эти две точки находятся на концах гипотенузы. Отношение двух других сторон треугольника дает нам наклон линии, соединяющей точки (см. рис. 5.8). Если мы представим себе, что вторая точка медленно перемещается в сторону первой, мы сможем увидеть, что по мере того, как наш треугольник становится все меньше и меньше, наклонная линия становится все более похожей на касательную, а тангенс угла наклона касательной и будет искомым мгновенной скоростью. Если эти две точки встретятся, мы увидим касательную, а треугольник исчезнет, и две стороны, которые давали нам числовое значение угла наклона, будут равны нулю. В таком случае мы имеем соотношение двух нулей, которое и дает нам ответ! Но что такое отношение двух нулей?!

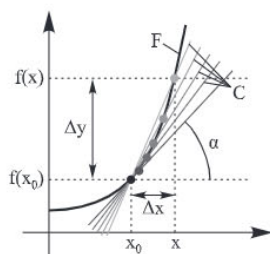


Рис. 5.8. Иллюстрация понятия производной

Ньютона такая ситуация не испугала. На языке Ньютона наше конечное соотношение исчезающе малых величин — реальная величина. Ньютон стремился обосновать метод флюксий (так он называл производную) с помощью теории пределов, хотя последняя была им лишь намечена. Сам термин «предел» был введен Ньютоном, а употребляемый ныне символ \lim (три первые буквы от *limes*) ввел швейцарский математик Симон Антуан Жан Люилье (1750–1840) только в 1786 году. Мы видим, что написанное выше выражение есть вычисление производной функции (в нашем случае $h(t)$). Итак, средняя скорость есть отношение перемещения ко времени, за которое это перемещение произошло: $V_{cp} = \Delta S / \Delta t$. Направление вектора средней скорости совпадает с направлением ΔS . Мгновенная скорость есть предел средней скорости, когда промежуток времени движения стремится к нулю. Другими словами, мгновенная скорость есть первая производная пути по времени. Вектор мгновенной скорости всегда направлен по касательной к траектории тела в сторону движения тела (см. рис. 5.9).

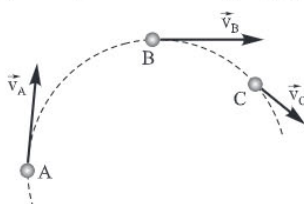


Рис. 5.9. Мгновенная скорость в каждой точке направлена по касательной к траектории в этой точке

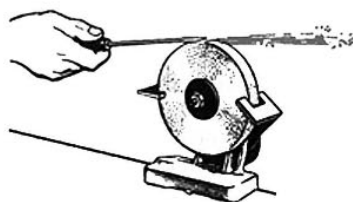


Рис. 5.10. Направление искры совпадает с направлением мгновенной скорости точки

Производная — одно из фундаментальных понятий математики и, как мы видим, возникло в первую очередь для скорости движения и построения касательной к кривой. Открытие Ньютона стало поворотным пунктом в истории ес-

тествознания. Оказалось, что связь между количественными характеристиками самых различных процессов, исследуемых физикой, химией, биологией, техническими науками, аналогична связи между путем и скоростью. Понятно, что в физике производная нашла самый радушный прием.

Приведем несколько примеров использования производной в различных разделах физики в дополнении к случаю вычисления мгновенной скорости, рассмотренному выше. С этими примерами мы встретимся в дальнейшем.

а) При вращении тела вокруг оси угол поворота φ есть функция времени t . Тогда угловую скорость легко найти как предел: $\lim \Delta\varphi/\Delta t = \dot{\varphi}(t)$ при $\Delta t \rightarrow 0$.

б) Мгновенная мощность W есть производная работы по времени: $W = \lim \Delta A/\Delta t$, где ΔA — изменение работы.

в) Пример из электричества. Сила тока I есть производная по времени от величины, протекающего в цепи заряда: $I = \lim \Delta q/\Delta t$, где q — положительный электрический заряд, переносимый через поперечное сечение проводника за время Δt при Δt , стремящемся к нулю.

г) Похожее соотношение получаем для удельной теплоемкости. Если ΔQ — количество теплоты, необходимое для изменения температуры за Δt времени, тогда $\lim \Delta Q/\Delta t = C$, где C — удельная теплоемкость.

Получив в руки аппарат дифференциального исчисления, физики поспешили его использовать для описания не только поступательного движения. И весьма в этом преуспели, что будет видно из рассмотрения весьма распространенного в природе вращательного движения. Узнав о нем подробнее, мы сможем рассмотреть великий закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном, и следствия из этого закона.

Сначала небольшой экскурс в историю. Вначале люди пользовались различными приспособлениями, простыми механизмами, а одна из проблем, стоявших перед ними, заключалась в том, как преобразовать вращательное движение в поступательное.

Собственно история вращательного движения по окружности не намного «моложе» прямолинейного движения. Археологические находки, в числе которых были и первые колеса, которые находили вместе со скелетами вьючных животных, относятся к бронзовому веку — 3500–4000 лет до н. э. Вращательное движение — это движение не по прямой линии. Такие движения называются криволинейными, то есть траектории их представляют собой не прямые, а кривые линии. В природе по криволинейным траекториям движутся планеты, воды рек...

Среди различных видов криволинейного движения особый интерес представляет равномерное движение тела по окружности. Нашим далеким предкам наблюдаемое круговое движение светил казалось универсальным, а окружность считалась идеальной фигурой. И хотя, как оказалось, планеты движутся по эллипсам, а не по окружностям, это не поколебало заметно отношения людей к ней.

Движение по окружности — самый простой с точки зрения описания вид криволинейного движения. Движение по окружности используется в неисчислимых количествах в технике, на транспорте и т. п. И кроме всего, окружность как нельзя кстати подходит на роль простой, но охватывающей разные ситуации модели. Часто любое сложное криволинейное движение тела на достаточно малом участке его траектории можно приближенно рассматривать как равномерное движение по окружности.

Равномерное движение по окружности — это движение, во время которого модуль скорости движения не изменяется, изменяется только ее направление: направление вектора скорости меняется от точки к точке. А значит, криволинейное движение — это всегда движение с ускорением, даже если по модулю скорость постоянна.

Поэтому, когда говорят о скорости такого движения, подразумевают мгновенную скорость.

Рассмотрим случай равномерного движения по окружности на плоскости. Выберем в качестве этой плоскости плоскость XY. Начало координат выберем в центре окружности (рис. 5.11).

Координаты частицы выразим через величину радиуса окружности r и угол поворота α : $x = r \cos \alpha$, $y = r \sin \alpha$.

Поскольку движение происходит по окружности, r от времени не зависит. Функцией времени является только угол поворота $\alpha(t)$.

Производная от угла по времени называется угловой скоростью вращения (ω): $\omega = d\alpha/dt$.

При равномерном вращении по окружности ($\omega = \text{const}$) написанное выражение можно проинтегрировать. В результате получим $\alpha = \omega t + \text{const}$.

Постоянную интегрирования можно выбрать из условия $\alpha(0) = 0$. Тогда получим $x(t) = r \cos \omega t$, $y(t) = r \sin \omega t$. Полученные соотношения полностью определяют движение. Из этих уравнений дифференцированием по времени можно найти скорость материальной точки по осям координат:

$$v_x = dx/dt = -\omega r \sin \omega t,$$

$$v_y = dy/dt = \omega r \cos \omega t.$$

Скалярное произведение векторов \mathbf{r} и \mathbf{v} можно записать через их проекции: $xv_x + yv_y = r \cos \omega t (-\omega r \sin \omega t) + r \sin \omega t (\omega r \cos \omega t) = 0$, что означает перпендикулярность векторов \mathbf{r} и \mathbf{v} , то есть скорость действительно направлена по касательной к окружности:

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)} = \sqrt{(\omega^2 r^2 \sin^2 \omega t + \omega^2 r^2 \cos^2 \omega t)} = \omega r = \text{const},$$

и она не зависит от времени. Движение действительно равномерное (но по окружности).

Дифференцируя по времени скорость, мы можем определить ускорение: $a_x = dv_x/dt = -\omega^2 r \cos \omega t$, $a_y = dv_y/dt = -\omega^2 r \sin \omega t$. Отсюда следует, что ускорение зависит от времени, то есть движение не является равноускоренным. Абсолютная величина ускорения (модуль) тем не менее остается величиной постоянной: $a = |\mathbf{a}| = \sqrt{(a_x^2 + a_y^2)} = \omega^2 r$.

Так как $\omega r = v$, то $|\mathbf{a}| = v^2/r$, и мы получили формулу для центростремительного ускорения, известную нам из школьного курса физики. Это ускорение направлено к центру (потому и называется центростремительным). В этом легко убедиться, рассчитав скалярное произведение векторов \mathbf{a} и \mathbf{r} (как это было сделано выше). Опуская промежуточные преобразования, в итоге получим, что скалярное произведение $\mathbf{a} \cdot \mathbf{r} = \omega^2 r^2 \cos(\mathbf{a} \wedge \mathbf{r})$ и равно с другой стороны — $\omega^2 r^2$. Сравнивая эти два выражения для скалярного произведения, видим, что вектор ускорения антипараллелен вектору \mathbf{r} , то есть направлен к центру.

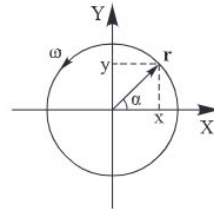


Рис. 5.11. Равномерное движение по окружности

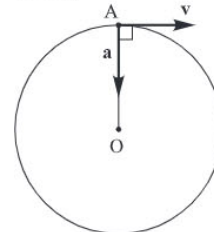


Рис. 5.12. Радиус-вектор, скорость и ускорение при равномерном движении по окружности
(www.emomi.com/download/parshin/lecture_3.htm)

Там, где есть ускорения, есть и силы. В самом деле, во всех случаях равномерного движения тела по окружности мы можем обнаружить такую силу, дейст-

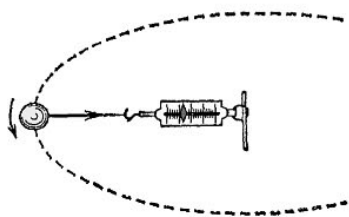


Рис. 5.13. Динамометр показывает силу, с которой нить действует на шарик, движущийся по окружности

вующую со стороны какого-либо другого тела. При вращении шарика на нити это сила натяжения, действующая со стороны растянутой нити на шарик; ее легко обнаружить, привязав нить другим концом к динамометру (см. рис. 5.13).

При движении шарика по круговому желобу или при движении поезда по закруглению пути это сила реакции, действующая со стороны деформированного желоба на шарик или деформированного рельса на колеса поезда, направленная к центру дуги окружности, по которой движется шарик или поезд; в случае

движения планет вокруг Солнца это сила притяжения к Солнцу.

Если действие силы прекращается (например, обрывается нить, к которой привязан шарик), то исчезает и центростремительное ускорение: дальше шарик полетит по касательной к окружности (то есть по направлению скорости, которой обладает шарик в момент исчезновения силы). Это мы замечаем, наблюдая летящий сноп искр, когда затачивают какой-либо предмет на точильном камне (рис. 5.10).

Сила, необходимая для того, чтобы тело массы m равномерно двигалось со скоростью v по окружности радиуса r , может быть найдена на основании второго закона Ньютона. Так как ускорение тела $a = v^2/r$, то требуемая сила $F = mv^2/r$.

Существует неправильное представление о том, что тело, движущееся по окружности, испытывает действие так называемой центробежной силы. В действительности это не так, что с очевидностью следует из простого опыта с вращающимся шариком, удерживаемым на нити. Ощущение силы натяжения, действующей на руку, говорит нам о существовании центростремительной силы (связанной с центростремительным ускорением). Если бы на шарик действовала центробежная сила, то при обрыве нити он полетел бы по радиусу в сторону от центра. Однако этого не происходит, шарик начинает двигаться по касательной в направлении скорости, которую он имел в момент времени обрыва нити, как отмечено выше. В этот момент прекратила действовать сила, направленная внутрь.

Центробежная сила — составляющая фиктивных сил инерции, о которых говорилось выше. Эту силу вводят при переходе из инерциальной системы отсчета в соответствующим образом вращающуюся неинерциальную, что позволяет в полученной неинерциальной системе отсчета продолжать применять законы Ньютона для расчета ускорения тел через баланс сил.

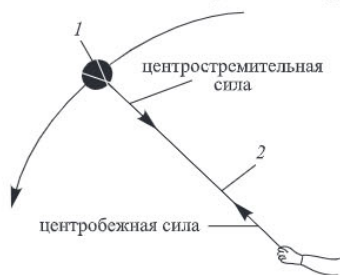


Рис. 5.14

Центробежные или просто направленные от центра силы все-таки бывают, но действуют они вовсе не на то тело, которое вращается (1), а на связь (2), удерживающую это тело (рис. 5.14). То есть не на автомобиль, а на дорогу, не на Луну, а на Землю, не на камень в плече (см. ниже), а на веревку и руку человека и т. д.

Этим обстоятельством воспользовались в глубокой древности изобретатели праши — простейшим приспособлением для метания камней. Прашу использовали на войне в Европе и на Ближнем Востоке, по крайней мере с Бронзового века и до XVII века н. э. Самая древняя праща была найдена в гробнице Тутанхамона (XIV в. до н. э.). Камень, выпущенный из пращи, летит по касательной к окружности раскрутки пращи. То есть, если представить траекторию раскрутки как циферблат с метателем в центре, для того, чтобы метнуть снаряд точно вперед, необходимо отпустить пращу в районе 3-х часов (при вращении пращи против часовой стрелки).

В качестве примера динамики вращательного движения рассмотрим так называемый *конический маятник*.

Четыреста лет назад в немецком городе Оснабрюке появились необычные часы: маятник новых часов, установленных на городском соборе, не раскачивался туда-сюда, а вращался. Теоретически обосновал создание часов, в которых маятник, называемый коническим, равномерно вращается, а секундная стрелка движется плавно, без скачков, все тот же знаменитый Христиан Гюйгенс в 1659 году. При всей привлекательности конического маятника изготавливать часы с подобным устройством во времена Гюйгенса было чрезвычайно сложно, прежде всего потому, что необходим был специальный подвес для маятника. Поэтому тогда, в XVII веке, широкого распространения такие часы не получили. Лишь во второй половине XIX века получили распространение оригинальные настольные и каминные часы с коническим вращающимся маятником, работающим по принципу центробежного регулятора. Первый патент на бытовые часы с коническим маятником был выдан американцу С. Бригсу из Конкорда в 1855 году. Маятник в форме шара подвешивался на нити и через пружину приводился в движение.



А мы рассмотрим задачу на движение такого маятника (рис. 5.15), который представлен шариком, подвешенным на легкой нити длиной l к потолку и вращающимся по окружности, лежащей в горизонтальной плоскости, с угловой скоростью 5 рад/с . Нашей задачей будет нахождение расстояния (в см) между точкой подвеса и центром окружности.

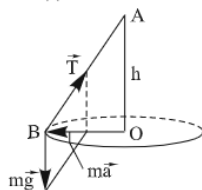


Рис. 5.15

На шарик действуют силы тяжести и реакция нити, которые вместе сообщают ему центростремительное ускорение. Запишем уравнение второго закона Ньютона в проекции на оси x и y : $ma_c = T \sin \alpha$ и $T \cos \alpha - mg = 0$.

Перепишем эти уравнения: $ma_c = T \sin \alpha$, $mg = T \cos \alpha$ и, разделив первое уравнение на второе, получим $a_c/g = \tan \alpha$. Здесь α — угол отклонения нити от вертикали.

Так как $a_c = \omega^2 l \sin \alpha$ (l — длина нити подвеса), тогда $\omega^2 l \sin \alpha = g \tan \alpha = g \sin \alpha / \cos \alpha$, или $\omega^2 l \cos \alpha = g$. Выражаем длину l через высоту подвеса h ($l = h / \cos \alpha$). И окончательно имеем $h = g / \omega^2$. Подставляя в формулу данные задачи, получим $h = 40 \text{ см}$.

Решим теперь другую задачу: вычислить скорость и период вращения (время одного оборота) T такого конического маятника. При этом угловая скорость не задана. Так как $a_c = mv^2/R$ и исключая силу натяжения T из уравнений, получим $v = \sqrt{(gR \sin \alpha / \cos \alpha)}$. Из рис. 5.15 следует, что $R = l \sin \alpha$. Подставляя вместо радиуса его выражение через длину l , получим $v = \sqrt{(gl \sin^2 \alpha / \cos \alpha)}$. Из определения периода следует $V = 2\pi R / T = 2\pi l \sin \alpha / T$. Отсюда $T = 2\pi l \sin \alpha / v = 2\pi \sqrt{(l \cos \alpha / g)}$.

Сделав остановку, чтобы разобраться в движении тела по окружности, мы вполне готовы к изучению открытого Ньютоном закона всемирного тяготения и следствий из него.

6. *Невидимая рука гравитации. Закон всемирного тяготения. Ускорение силы тяжести: теория подтвердила опыт. Два лика силы тяжести. Вывод закона Кеплера из закона всемирного тяготения. Наведение порядка «на небесах».*

Когда великие предшественники Ньютона, в частности Галилей, изучали равноускоренное движение тел, падающих на поверхность Земли, они были

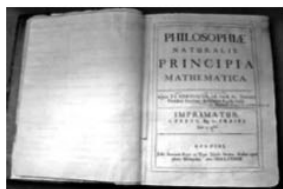
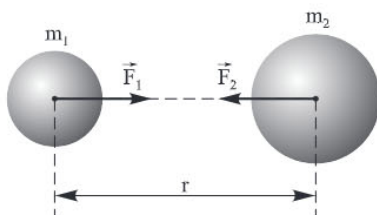


Рис. 6.1. Титульный лист «Начал» Ньютона

уверены, что наблюдают явление чисто земной природы — существующее только недалеко от поверхности нашей планеты. Кеплер и другие ученые полагали, что в законах, определяющих движение небесных тел, действуют совсем иные законы движения, нежели законы, управляющие движением на Земле. В 1686–1687 гг. Ньютон опубликовал свои знаменитые «Математические начала натуральной философии», ознаменовавшие рождение современной механики.

В этой работе Ньютон сформулировал свой знаменитый закон всемирного тяготения: *сила гравитационного притяжения между двумя материальными точками массы m_1 и m_2 , разделенными расстоянием r , пропорциональна обеим массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними*. Гениальное прозрение Ньютона заключалось в том, что он объединил два типа гравитации (земной и небесных сфер) в своем сознании и отбросил искусственное и ложное разделение Земли и остальной Вселенной. Закон поэтому и называется всемирным.



В рамках классической механики формула, выражающая этот закон, проста:

$$F = Gm_1m_2/r^2.$$

Здесь F — сила притяжения между двумя материальными телами с массами m_1 и m_2 . Коэффициент G называется гравитационной постоянной. Следует отметить, что в приведенной форме закон всемирного тяготения стали записывать лишь в XIX веке.

Чудесным образом оказалось, что силу притяжения между ньютоновскими телами можно определить, зная только их массы и расстояния между ними. Величина G определялась экспериментально и оказалась очень малой величиной. Малостью гравитационной постоянной объясняется то, что гравитационные эффекты в реальной жизни не заметны. Они становятся заметны, лишь когда мы имеем дело с огромными количествами материи. Вот хороший пример (Уинпл Ф. Земля, Луна, планеты. 1948): представим себе шар, сделанный из золота, добытого во всем мире, скажем, 30000 т; такой шар имел бы 14 м в диаметре. Если бы этот шар находился в пространстве, вдали от всех притягивающих сил, то человек весом 80 кг, сидящий на нем, весил бы столько же, сколько 0,3 г на Земле. Сверчок легко мог бы поднять этого человека, а лягушка могла бы вообще сбросить его с золотого шара.

Гравитационная постоянная фигурирует в современном законе всемирного тяготения, однако отсутствовала у Ньютона и в работах других ученых вплоть до начала XIX века. Она впервые была введена в закон всемирного тяготения, по-видимому, только после перехода к единой метрической системе мер.

Дискуссия о точности, с которой выполняется закон всемирного тяготения, шла на протяжении всего XVIII века. Не зная гравитационную постоянную, ученые были вынуждены пользоваться в расчетах относительными величинами. Поскольку нахождение G имело значение главным образом для астрономии, эта задача была сформулирована как определение средней плотности Земли. Очевидно, что при известных значениях плотности ρ и радиуса R Земли (легко найти массу Земли), а также ускорения свободного падения g на ее поверхности можно найти G . Первым ученым, определившим плотность Земли (а следовательно, и G) с удовлетворительной точностью, был замечательный ученый Генри Кавендиш (1731–1810). Для этого он использовал крутильные весы.



Рис. 6.2. Один из последних портретов Ньютона (1712 г., художник — Торнхилл)

Первоначально эксперимент был предложен Джоном Мичеллом (1724–1793). Именно он сконструировал главную деталь в экспериментальной установке — торсионный подвес, однако он умер в 1793 году, так и не поставив опыта. После его смерти экспериментальная установка перешла к Генри Кавендишу.

Кавендиш модифицировал установку, провел опыты и описал их в *Philosophical Transactions* в 1798 году. Установка представляла собой деревянное коромысло с прикрепленными к ее концам свинцовыми шарами весом 159 кг каждый (крутильные весы). Оно было подвешено на нити из посеребренной меди длиной 1 м. К шарам подносят шары меньшего размера, сделанные также из свинца. В результате действия гравитационных сил коромысло закручивается на некий угол. Жесткость нити была такой, что коромысло делало одно колебание за 15 минут. Угол поворота коромысла определялся с помощью луча света, пущенного на зеркальце на коромысле и отраженного в микроскоп. Зная упругие свойства нити, а также угол заворота коромысла можно вычислить гравитационную постоянную. В «Британике» утверждается, что Г. Кавендиш получил значение $G = 6,754 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$. Современное значение гравитационной постоянной — $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$. Следует отметить, что историки физики, в отличие от самих физиков, говорят об измерении Кавендишем *средней плотности Земли*, что и было в действительности.

С точностью до семи процентов Кавендиш установил, что средний удельный вес Земли равен 5,47 г/см. Этот результат имел первостепенное значение для физики, поскольку дал меру для определения массы планет и Солнца — первого шага к познанию Солнечной системы.

Открытие закона всемирного тяготения часто связывают с легендой об упавшем яблоке. Вот как об этом пишет М. Льюис в «Истории физики»:

«...Случайного падения яблока — явления, которое приводит в пример еще Кеплер, — отнюдь не было достаточно для того, чтобы Ньютона озарила мысль о всемирном

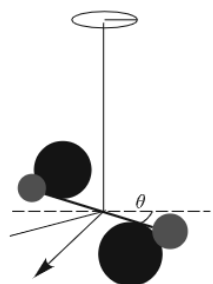


Рис. 6.3. Крутильные весы (схематическое изображение, Википедия)

тяготении. Родственники и друзья Ньютона рассказывали об этом эпизоде, утверждая, что слышали о нем от самого Ньютона; Вольтер создал ему популярность. Но если даже этот эпизод и имел место, его следует рассматривать в ином свете» (см. также В. С. Кессельман «На кого упало яблоко»). Об этом наверняка иронически писал Байрон:

Когда однажды, в думу погружен,
Увидел Ньютон яблока паденье,
Он вывел притяжения закон
Из этого простого наблюдения.
Впервые от Адамовых времен
О яблоке разумное сужденье
С паденьем и с законом тайных сил
Ум смертного логично согласил.

Дж. Байрон. «Дон Жуан». Песнь X (пер. Т. Гнедич)

Методами математического анализа Ньютон показал, что сферическое тело, например Луна, Солнце или планета, создает тяготение так же, как и материальная точка, которая находится в центре сферы и имеет эквивалентную ей массу (то есть как будто вся реальная масса тела сосредоточена в точке). На доказательство этого факта Ньютон потратил много времени и сил. Доказательство можно значительно упростить, если воспользоваться известной теоремой Гаусса (1777–1855) для электрического заряда, всякий раз заменяя слово «заряд» словом «масса», а слова «электрическое поле» словами «поле тяготения». Но, Гаусс в то время, когда выводил свои формулы Ньютон, еще не родился.

Забегая вперед отметим, что лет через сто после работ Ньютона другой англичанин — Фарадей, ввел понятие поля, окружающего магниты и электрические заряды (см. с. 268). Это понятие оказалось для физики очень плодотворным и применимо и в случае тел, обладающих массой. Каждое тело (например, Земля) создает вокруг себя силовое поле — поле тяготения. В каждой точке такое поле можно характеризовать силой, действующей на некую пробную массу (m_G), в точке пространства r , окружающего массу, создающую

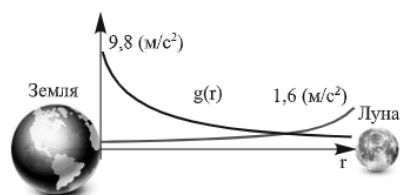


Рис. 6.4. Из графика функции $g = g(r)$ наглядно видно, что напряженность гравитационного поля g стремится к нулю, когда расстояние r стремится к бесконечности

его. При этом отношение силы, действующей на пробную массу, к этой массе называется напряженностью гравитационного поля (g) в данной точке: $g = F/m_G$. Напряженность поля представляет собой векторную величину, направление которой определяется направлением гравитационной силы F , а численное значение — формулой ускорения свободного падения. Но по своему физическому смыслу это совершенно разные физические величины. В то время как напряженность поля характеризует состояние пространства в данной точке, сила и ускорение появляются только тогда, когда в данной точке находится пробное тело.

Гравитационное взаимодействие характерно для всех материальных объектов вне зависимости от их природы. Оно заключается во взаимном притяжении тел и определяется фундаментальным законом всемирного тяготения. Гравитационным взаимодействием определяется падение тел в поле сил тяготения Земли, описывается движение планет Солнечной системы, а также других макрообъектов.

Ускорение силы тяжести. После открытия закона всемирного тяготения сразу же возникла возможность получить результаты, обнаруженные в экспериментах и наблюдениях. Для Галилея g было просто экспериментально измеряемой константой. По Ньютону же ускорение свободного падения можно вычислить, подставив в формулу закона всемирного тяготения массу Земли M и радиус Земли R , помня при этом, что, согласно второму закону Ньютона, сила, действующая на тело, равняется его массе, умноженной на ускорение. Действительно, сила тяжести для массы m на поверхности Земли равна mg . Приравняв эту силу гравитационной, получим $mg = GmM/R^2$. Сокращая на m , получим выражение для земного ускорения, не зависящего от массы падающего тела. Вот так, на «кончике пера», получен результат, который так противоречил наблюдениям и подтвердил замечательные опыты Галилея. Эксперименты показывают, что *ускорение свободного падения зависит от географической широты: чем ближе к полюсу, тем оно больше*. Это объясняется действием центробежной силы. Ведь точки земной поверхности, расположенные на более высоких широтах, ближе к оси вращения, и, следовательно, при приближении к полюсу расстояние от оси вращения уменьшается, доходя до нуля на полюсе. Это явление было открыто в 1672 году, когда французский астроном Жан Рише (1630–1696), находясь в экспедиции в Африке, обнаружил, что у экватора маятниковые часы идут медленнее, чем в Париже. Ньютон вскоре объяснил это тем, что период колебаний маятника обратно пропорционален квадратному корню из ускорения свободного падения, которое уменьшается на экваторе из-за действия центробежной силы. Математика начинала демонстрировать свою силу, и со временем ее сила в физике только возрастала.

Влияние центробежной силы приводит еще к одному эффекту, который легко наблюдать в таком эксперименте. Возьмите железный стержень и несколько гибких металлических полосок. Согните их, придав системе форму шара. Если нижний конец полосок закрепить на оси неподвижно, а верхнему концу оставить возможность скользить вдоль оси, то при вращении системы полоски начнут смещаться вниз, и тем больше, чем выше скорость вращения. Подобное явление, предсказанное для Земли Гюйгенсом и Ньютоном в конце XVII века, было впервые обнаружено в конце

1730-х годов в результате обработки данных двух французских экспедиций, специально снаряженных для решения этой проблемы в Перу и Лапландию. Знаменитый астроном и геодезист Пьер Луи Моро де Мопертуй (1698–1759) в середине XVIII века возглавлял экспедицию в Лапландию (название расположенного в Северной Европе культурного региона) для измерения по меридиану дуги в один градус. Ведь Ньютон, исходя из закона всемирного тяготения, показал, что Земля должна быть несколько сплюснута у полюсов, а значит, длина дуги меридиана в один градус должна быть различной во Франции и Лапландии. Экспедиция подтвердила и этот блестящий вывод Ньютона, а Мопертуй за свое достижение получил почетный титул «сплюснувший Землю». Вольтер же присвоил

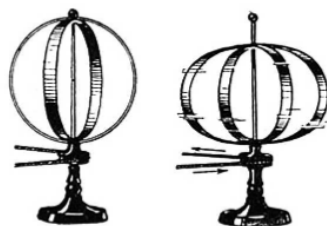


Рис. 6.5. Опыт, доказывающий, что Земля сплюснута у полюсов. При вращении обручей вокруг оси они сплюсшиваются, как показано на рисунке

Мопертюи титул «сплющивателя обоих Кассини». Дело было в том, что Жан (Джованни) и Жак Кассини (Жан Кассини (1625–1712), итальянский и французский астроном, основатель астрономической династии) возражали против выводов Ньютона из закона всемирного тяготения. Так что Мопертюи «сплющил» не только Землю, но и отца и сына Кассини. Ученого даже изобразили на специальной отчеканенной медали — в меховой одежде, в одной руке держит палицу Геракла, а в другой — сплюснутую Землю.

Впрочем, вскоре, поссорившись с Мопертюи, тот же острослов Вольтер не преминул колкнуть его язвительной эпитафией:

Посланец физики, отважный мореход,
Преодолев и горы, и моря,
Влача квадрант средь снега и болот,
Почти что превратившись в лопаря,
Узнал ты после множества потерь,
Что знал Ньютон, не выходя за дверь!

Земля «лишилась» идеальной сферической фигуры. В 1873 году немецкий математик и физик Иоганн Листинг предложил название для фигуры Земли — геоид (от гео ... и греч. Eidos — вид). Термин этот в науке прижился. Правда, отличие формы Земли от сферы весьма мала: ее полярный радиус лишь на 21 км короче экваториального. Однако такое отличие необходимо учитывать, например, при расчете движения спутников.

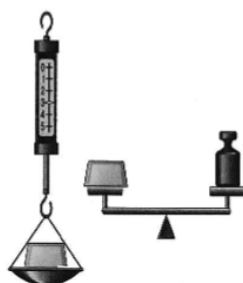


Рис. 6.6. Пружинные и рычажные весы

Сила тяжести. Итак, сила тяготения существует между всеми телами. В жизни мы употребляем словосочетание «сила тяжести». Силой тяжести принято называть силу, с которой нас к себе притягивает Земля. Она существует на поверхности любой планеты или другого небесного тела. Значение силы тяжести зависит от географической широты и определяется как геометрическая сумма силы притяжения Земли и центробежной силы инерции, учитывающей эффект суточного вращения Земли. На Земле сила тяжести на полюсе и на экваторе отличается менее чем на 0,5 %. Направление силы тяжести — вертикаль в данной точке земной поверхности. Мы также часто употребляем слова «вес», «масса».

Вес и масса — разные понятия. Вес — сила, с которой тело действует на горизонтальную опору или вертикальный подвес. Масса же, о чем мы рассказывали выше, есть мера инертности тела. Она же определяется количеством вещества, из которого состоит тело. Вес можно измерять с помощью пружинных весов, которые могут служить и для косвенного измерения массы, если их соответствующим образом проградуировать; рычажные весы в такой градуировке не нуждаются, так как в этом случае сравниваются массы, на которые действует одинаковое ускорение свободного падения (см. рис. 6.6). Масса измеряется в килограммах, а вес — в единицах силы (ньютонах). Так как значение веса (при неизменной массе тела) пропорционально ускорению свободного падения, тогда, например, в условиях невесомости у всех тел вес равен нулю, а масса у каждого тела своя.

И все же строгое различение понятий веса и массы принято в основном в физике, а во многих повседневных ситуациях слово «вес» продолжает использоваться, когда фактически речь идет о массе. Конечно, термин «вес» уже прижился как синоним термина «масса», но это не избавляет от необходимости понимать, что это вовсе не одно и то же. Вес тела, то есть сила, с которой тело действует на опору, и сила упругости, с которой опора действует на тело, в соответствии с третьим законом Ньютона равны по модулю и противоположны по направлению: $mg = F_y$. Это имеет место, если тело находится в покое на горизонтальной поверхности или равномерно движется и на него действуют только сила тяжести. При ускоренном движении тела и опоры вес P будет отличаться от силы тяжести F_T .

Рассмотрим в качестве примера движение лифта, когда его ускорение a направлено вертикально вниз. Если координатную ось Y направить вертикально вниз, то векторы P , g и a оказываются параллельными оси Y , а их проекции положительными; тогда уравнение второго закона Ньютона в нашем случае имеет вид: $P = m(g - a)$.

Из приведенного соотношения следует, что вес тела, направление ускорения которого совпадает с направлением ускорения свободного падения, меньше веса покоящегося тела. Если тело вместе с опорой свободно падают, то из приведенного соотношения следует, что $P = 0$. Исчезновение веса при движении опоры с ускорением свободного падения называется *невесомостью*. Естественно, что масса космонавтов никуда не девается, так как, помимо того, что она является мерой инертности, она же служит мерой количества вещества. Итог: без опоры и без веса тело не имеет веса, тяжесть есть, а веса нет.

Состояние невесомости наблюдается в самолете или космическом корабле при движении с ускорением свободного падения независимо от направления и значения модуля скорости их движения.

При ускоренном движении тела и опоры с ускорением, направленным вертикально вверх, вес тела оказывается больше действующей на него силы тяжести. В этом случае P и g совпадают по направлению и, следовательно, $P = m(a + g)$. Это чувствует человек, поднимающийся в лифте.

Увеличение веса тела, вызванное ускоренным движением опоры или подвеса, называют *перегрузкой*. Действие перегрузки испытывают на себе космонавты как при взлете космической ракеты, так и на участке торможения космического корабля при входе в плотные слои атмосферы. Испытывают перегрузки и летчики при выполнении фигур высшего пилотажа, и водители автомобилей при движении с большими ускорениями.

Сила тяжести, как и любая сила, имеет точку приложения в теле, на которое она действует. Оказалось, что эта точка приложения имеет важное значение для определения условий равновесия тела. Эта точка получила название «центр тяжести тела». Проблемой центра тяжести интересовался еще Архимед. Он так определил центр тяжести: «Центром тяжести некоторого тела является некоторая расположенная внутри него точка, обладающая тем свойством, что если за нее мысленно подвесить тяжелое тело, то оно останется в покое и сохранит первоначальное положение». В дошедших до нас сочинениях по статике («О равновесии плоских фигур или о центрах тяжести плоских фигур» и «Послании к Эратосфену о механических теоремах») Архимед развивает теорию нахождения центра

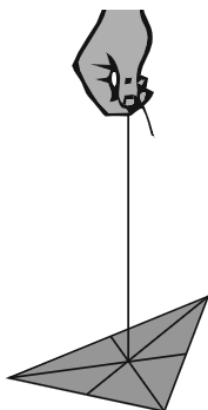


Рис. 6.7. Подвешенная тонкая пластина треугольной формы в точке центра тяжести находится в равновесии (плоскость пластины параллельна поверхности Земли)

тяжести различных фигур. Наглядное представление о центре тяжести иллюстрирует рис. 6.7.

Дадим математическое определение центра тяжести тела. Будем считать, что тело состоит из множества частиц, каждая массой m_i . Несмотря на то что на каждую такую частицу действует сила тяжести, равная $m_i g$ (где g — ускорение свободного падения), можно показать, что сумма всех этих отдельных сил эквивалентна одной силе, приложенной в точке тела, которую назовем его *центром тяжести*. Действительно, полная сила тяжести этих параллельных сил, действующая на тело, состоящее из n частиц с массами m_1, m_2, \dots, m_n , равна $F = m_1 g + m_2 g + \dots + m_n g = \sum m_i g = Mg$. Здесь $M = \sum m_i$. При этом мы считаем, что ускорение свободного падения одно и то же для всех точек тела. Таким образом, в соответствии со вторым законом Ньютона сила $F = Mg$ вызывает такое же поступательное движение тела, как и сумма всех сил тяжести, действующих на частицы тела. В общем случае определение центра тяжести произвольного тела путем последовательного сложения сил, действующих на отдельные его части, — трудная задача; она облегчается только для тел сравнительно простой формы. В случае если тело имеет плоскость, ось или центр симметрии, то его центр тяжести лежит соответственно в плоскости симметрии, оси симметрии или в центре симметрии.

Первые впечатляющие успехи теории тяготения

Ньютона. Первым аргументом в пользу ньютоновской модели послужил строгий вывод на ее основе эмпирических законов Кеплера. Следующим шагом стала теория движения комет и Луны, изложенная в «Началах». Вскоре истинность закона подтвердилась убедительными фактами. Близкий друг Ньютона — Галлей — в 1682 году, пользуясь формулами «Начал», высчитал орбиту яркой кометы и предсказал, что она вернется в 1759 году. И комета (ей было присвоено имя Галлея) явилась в назначенный ей срок. Вездесущий Вольтер откликнулся на возвращение кометы восторженными стихами. Но еще более поразительным триумфом идей Ньютона считают открытие планеты Нептун. Астрономы того времени никак не могли втиснуть в «небесное расписание» движение Урана, хотя Ньютон разработал тонкий математический метод для вычисления планетных путей. Уран же выходил из назначенного курса. На некоторых участках своего пути вокруг Солнца он, без всяких видимых причин, то замедляет свой бег, то ускоряет движение. Раздумывая над этим явлением, русский астроном А. И. Лексель (1740–1784) пришел к убеждению, что за Ураном находится еще планета, влияющая на движение Урана. Тогда же француз У. Леверье (1811–1877) и англичанин Дж. Адамс (1819–1892) пришли к аналогичному выводу. Они одновременно и независимо друг от друга вычислили, где следует искать «виновника» отклонений. В указанном месте астрономы обнаружили маленькую планету — Нептун. Впоследствии удалось установить, что закон, полученный Ньютоном, действует и за пределами Солнечной системы, в мире далеких звезд и отдаленных галактик.

А теперь вернемся к законам Кеплера и посмотрим, как из теории тяготения Ньютона можно получить результаты, добытые с таким трудом Кеплером. Как

отмечалось выше, свои законы движения планет Кеплер нашел, исследуя хаотическую грудку наблюдений, не зависящих друг от друга, не объединенных ни общей идеей, ни единым принципом. Законы Кеплера дали вполне ясное представление о геометрическом характере планетных движений, но не объясняли физических причин, по которым планеты движутся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца. Открытие Кеплером законов движения планет поставило перед людьми много новых вопросов, главным из которых был вопрос о причинах их движения. Что заставляет планеты двигаться? Этот вопрос занимал многие умы того времени. Под влиянием этой мысли Ньютон вслед за Кеплером сделал вывод, что сила, которая удерживает планеты на их орбитах, «исходит» от Солнца и убывает с расстоянием. Ньютон учел, что согласно закону инерции Галилея всякое движущееся тело, представленное самому себе, движется прямолинейно и равномерно, — оно только тогда изменяет скорость и направление своего движения, когда на него действует внешняя причина, определенная сила. Это указывало на то, что по отношению к движению планет следует искать не причину, производящую движение, а причину, изменяющую их прямолинейный путь в криволинейный, то есть силу, удерживающую планету на ее орбите. Поэтому Ньютон решил, что если планеты движутся не по прямым, а по кривым линиям, по эллипсам, то это должно вызываться причиной, внешним воздействием, которое «исходит» от Солнца. Что же это за причина или сила? На этот важный вопрос прежде всего и ответил Ньютон, который строго математически показал, что такой причиной является сила солнечного притяжения. Огромным достижением Ньютона была не только идея о законе, но и математический формализм. Теория Ньютона оказалась настолько могучей, что ее автора еще при жизни вознесли на пьедестал. Поэт Александр Поп (1688–1744) откликнулся таким стихотворением:

Закон природы скрыт во тьме
Был много тысяч лет.
«Да будет Ньютон!» — Бог сказал.
И появился свет.

В великой системе мироустройства по Ньютону законы Кеплера становятся прямым следствием универсальных законов механики и закона всемирного тяготения.

Покажем это на примере вывода третьего закона Кеплера. Третий закон Кеплера проще вывести для круговой орбиты (большинство орбит планет весьма близки к круговым).

Действительно, уравнение эллипса $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$, где a — большая полуось эллипса, b — малая полуось эллипса. Если $2c$ — расстояние между фокусами, то между a , b и c (если $a > b$) существует соотношение $a^2 - b^2 = c^2$. Эксцентриситетом (e) эллипса называется отношение расстояния между фокусами этого эллипса к длине его большой оси: $e = c/a$. Эксцентриситеты большинства орбит у комет приближаются к единице, они движутся по вытянутым орбитам. У планет Солнечной системы эксцентриситеты малы. Так, например, эксцентриситет орбиты Земли $e = 0,017$, т. е. ее орбита очень близка к окружности.

Запишем второй закон Ньютона для тела (планеты) массы m_1 , вращающегося по круговой орбите радиуса r_1 вокруг центрального тела (Солнца) массы M

и удерживаемого на своей орбите гравитационной силой, описываемой законом всемирного тяготения

$$Gm_1M/r_1^2 = m_1v_1^2/r_1.$$

Здесь в качестве ускорения планеты взято центростремительное ускорение v_1^2/r_1 .

Поскольку период T_1 — это время, за которое планета совершает полный оборот вокруг Солнца, скорость v_1 запишем в виде $v_1 = 2\pi r_1/T_1$. Подставляя выражение для v_1 в соотношение, написанное выше, и выполняя ряд преобразований, окончательно получим

$$T_1^2/r_1^3 = 4\pi^2/GM.$$

Аналогичный результат может быть получен для любой планеты. Так как правая часть соотношения не зависит от параметров конкретной планеты, то отсюда получим третий закон Кеплера:

$$T_1^2/T_2^2 = r_1^3/r_2^3.$$

(Отметим, что вывод 2-го закона Кеплера можно посмотреть в книге Джанколи «Физика». Т. 1. С. 316.)



Рис. 6.8. Титульный лист амстердамского издания 1738 года книги Вольтера «Элементы физики Ньютона»

Теория Ньютона не только стала завоевывать умы ученых, но и стала модной при королевских дворах во времена «галантного века». Объяснение принципов теории дал сам Вольтер!

Эта теория оказалась важной не только потому, что навела порядок на «небесах» и на Земле. Становилось ясно, что эта теория — предвестник будущих великих открытий. У всех интересующихся освоением космического пространства на слуху слова: «первая космическая скорость», «вторая...». Эти понятия и сами их величины напрямую связаны с законом всемирного тяготения.

Космические скорости. Скорость, с которой происходит движение тела по круговой орбите под действием силы всемирного тяготения, называется *первой космической скоростью* (v_1). Если тело под действием силы тяжести движется вокруг Земли равномерно по окружности радиусом R , то ускорение свободного падения является его центростремительным ускорением: $v^2/R = g$. Отсюда первая космическая скорость равна $v_1 = \sqrt{Rg}$. Подставив в выражение значение радиуса Земли и ускорения свободного падения у ее поверхности, получим, что первая космическая скорость для Земли $v \approx 7,9$ км/с. Эта скорость примерно в 8 раз больше скорости пули. Первая космическая скорость для любого небесного тела также определяется этим выражением (естественно для своих значений радиуса и ускорения свободного падения). Если космическому аппарату сообщается скорость меньше первой космической, то он движется по траектории, которая пересекается с поверхностью земного шара, то есть аппарат падает на Землю. При начальной скорости больше 7,9 км/с, но меньше 11,2 км/с космический аппарат движется вокруг Земли по криволинейной траектории — эллипсу. Чем больше начальная скорость, тем более вытянут эллипс. При достижении некоторого значения

скорости, называемого второй космической скоростью (v_2), эллипс превращается в параболу и космический корабль уходит от Земли безвозвратно. У поверхности Земли вторая космическая скорость равна 11,2 км/с. При скорости более второй космической тело движется по гиперболической траектории.

В механике Ньютона математически описаны законы движения тел. При этом центральным моментом в этом описании выступает сила — понятие, интуитивно использованное еще нашими далекими предками. Продолжая наше путешествие по механике Ньютона, посмотрим, как это важное понятие развивалось и использовалось в механике.

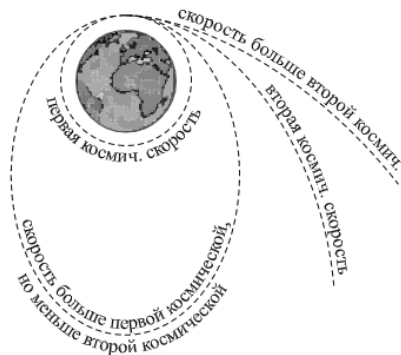


Рис. 6.9. Космические скорости

7. Понятие силы: от древних греков до Ньютона. Без силы нет работы. Работа сил упругости. Ни шагу без трения. Работа сил трения. Работа силы тяжести. Трудноопределимое понятие. Два вида механической энергии.

Начало физики мы ведем с Древней Греции. Здесь и первые истоки понятия силы. У древних силы природы — это то, что обуславливает явления природы и управляет ими. Сила трактовалась как склонность тела к определенным действиям, присущее ему естественное свойство. Сила всегда рассматривалась как действие одного тела на другое.

Простейший пример демонстрирует рис. 5.5: тело — телега, сила — лошадь. Куда пойдет лошадь, туда будет двигаться и телега. Это весьма общий взгляд. Такого взгляда придерживался Рене Декарт (1596–1650). Он утверждал, что не существует никаких сил, кроме силы удара при соприкосновении тел.

Исаак Ньютон в XVII веке изменил взгляд на силу, используя для описания силы математические методы. Сила рассматривалась как причина изменения скорости и имеет направление. Второй закон Ньютона утверждает, что в инерциальных системах отсчета ускорение материальной точки по направлению совпадает с равнодействующей всех сил, приложенных к телу, а по модулю прямо пропорционально модулю силы и обратно пропорционально массе материальной точки.

Сила в механике, действуя на тело, может его перемещать. В физике такое действие означает совершение работы. Понятие работы возникает первоначально в технике как характеристика работоспособности водоподъемных машин, а затем проникает и в механику. Произведение силы на расстояние играло в жизни человека важную роль, начиная с простейших механизмов, которые он использовал. Неосознанно им пользовались еще создатели первых механизмов и машин. Наиболее простой случай — это работа, совершаемая постоянной (как по величине, так и по направлению в течение всего того времени, когда вычисляется работа) силой. В этом случае работа A определяется как произведение величины силы (F) и проекции перемещения (S) на направление вдоль силы (см. рис. 7.1). В общем

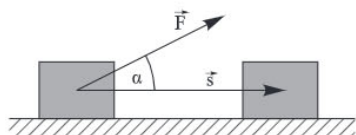


Рис. 7.1

случае $A = FS \cos \alpha$; здесь α — угол между направлением силы и перемещения (отметим, что $S \cos \alpha$ — это величина составляющей вектора S , параллельной вектору F).

Легко видеть, что $FS \cos \alpha$ есть скалярное произведение векторов F и S : $A = \mathbf{F} \cdot \mathbf{S}$. Работа является скалярной величиной. Она может быть как положительной ($0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$), так и отрицательной ($90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$). Что это означает?

Сила совершает работу, если перемещение точки приложения силы происходит в направлении действия силы. Если же это перемещение происходит в направлении, противоположном направлению действия силы, то мы говорим, что совершается работа против данной силы (рис. 7.2).

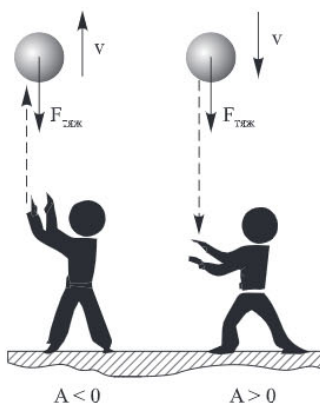


Рис. 7.2. При бросании мяча вверх сила тяжести направлена против движения, то есть препятствует ему. Следовательно, сила тяжести совершает отрицательную работу. При падении мяча направление силы тяжести и направление движения мяча совпадают, значит, сила тяжести совершает положительную работу (www.nvtc.ee/e-oppe/Gusseva/rabota/___.html)

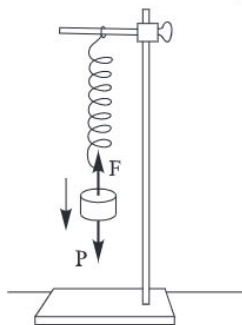


Рис. 7.3. При опускании груза совершается работа против силы натяжения F

Продолжим рассмотрение вопроса для случая упругой силы.

Работа сил упругости. Если на нерастянутую пружину мы подвесим груз и дадим ему возможность опускаться, то сила тяжести, действующая на груз, совершит работу, так как груз движется в направлении этой силы. В то же время пружина растягивается и совершается работа против силы упругости пружины.

В общем случае, когда сила не постоянна, а движение не прямолинейно, работа вычисляется как интеграл по траектории точки:

$$A = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S}.$$

Рассмотренный пример, когда модуль силы зависит от координаты, служит примером так называемых упругих сил, возникающих при деформации тела. При деформации (деформация —

изменение размеров, формы и конфигурации тела в результате действия внешних или внутренних сил, от лат. deformation — искажение) возникает сила, которая стремится восстановить прежние размеры и форму тела. Ее называют силой упругости. При малых относительных деформациях ($|x|/l \ll 1$) сила упругости пропорциональна деформации тела и направлена в сторону, противоположную направлению перемещения тела при сжатии ($x < 0$) и растяжении ($x > 0$) (рис. 7.4): $F_{\text{упр}} \sim (-x)$.

Это соотношение выражает экспериментально установленный Гуком (1635–1703) закон.

Таким образом, при растяжении или сжатии пружин возникают упругие силы, которые также подчиняются закону Гука. В пределах применимости закона Гука пружины способны сильно изменять свою длину. Поэтому их часто используют для измерения сил.

Математически силу упругости, возникающую при деформации растяжения, или сжатия, записывают следующим образом: $F_{\text{упр}} = -k \cdot x$, где x — смещение, k — коэффициент пропорциональности, или коэффициент жесткости. Значение k зависит от размеров тела и материала, из которого тело изготовлено.

Для того чтобы растянуть пружину (рис. 7.4), к ней нужно приложить внешнюю силу F , модуль которой пропорционален удлинению пружины. Зависимость модуля внешней силы от координаты x изображается на графике прямой линией (рис. 7.5).

По площади треугольника на рис. 7.5 можно определить работу, совершенную внешней силой, приложенной к правому свободному концу пружины: $A = kx^2/2$. Такой же результат получим, вычислив работу через интеграл, написанный выше.

Этой же формулой выражается работа, совершенная внешней силой при сжатии пружины.

Работа сил трения. Движущееся тело теряет свою энергию не только преодолевая сопротивление окружающей среды, но и из-за наличия трения. При относительном движении одного тела по поверхности другого тела взаимодействуют друг с другом, что проявляется через силу трения. Сила трения затрудняет их перемещение относительно друг друга. Эта сила всегда направлена вдоль поверхности соприкосновения в сторону, противоположную движению.

Различают сухое и жидкое (или вязкое) трение.

Сухое трение возникает между поверхностями твердых тел в отсутствие смазки.

Жидким (вязким) называется трение между твердым телом и жидкой или газообразной средой или ее слоями. Сухое трение, в свою очередь, подразделяется на трение скольжения и трение качения.

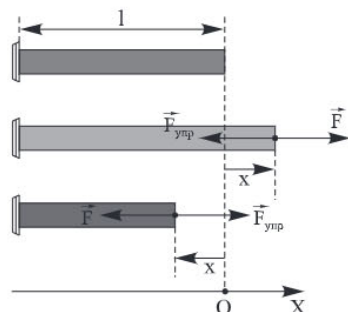


Рис. 7.4. Деформация растяжения ($x > 0$) и сжатия ($x < 0$)

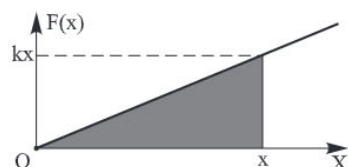


Рис. 7.5. Зависимость модуля внешней силы от координаты при растяжении пружины

Сила трения скольжения не зависит от площади соприкасающихся поверхностей. При движении брусок, лежащий на своей большой по площади грани, будет иметь такую же силу трения скольжения, как если его положить на самую маленькую грань.

Основная причина возникновения силы трения скольжения — мельчайшие неровности поверхностей двух тел, за которые тела цепляются друг за друга при движении. Если бы не было силы трения скольжения, то тело, приведенное в движение кратковременным действием на него силы, продолжало бы двигаться равномерно. Однако поскольку сила трения скольжения существует и она направлена против движения тела, то тело постепенно останавливается.

Вторая причина возникновения силы трения скольжения — межмолекулярные взаимодействия на соприкасающихся поверхностях двух тел. Такое взаимодействие может возникнуть только на очень гладких, хорошо отполированных поверхностях, когда молекулы разных тел оказываются очень близко друг к другу и притягиваются. Из-за этого движение тела тормозится.

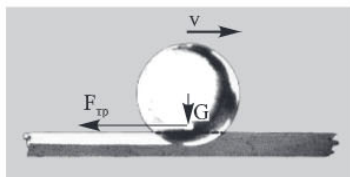


Рис. 7.6

Сила трения качения намного меньше силы трения скольжения. Причина — в контакте между движущимся телом и поверхностью. При качении колесо как бы вдавливают, подминает под себя поверхность, отталкивается от нее (см. рис. 7.6). Катящемуся колесу не приходится цеплять множество мелких неровностей поверхности, как при скольжении тел. Чем тверже поверхность, тем меньше сила трения качения.



В 1857 году в Германии создали эффективное устройство, получившее впоследствии широчайшее распространение на всех железных дорогах мира. Этим устройством явился ручной тормозной башмак, укладываемый на рельс перед движущимися вагонами и оказывающий значительное тормозное воздействие при наезде на него колеса. Тормозной эффект основан на замене трения качения вагона трением скольжения тормозного башмака по рельсу.

Сила трения покоя окружает нас повсеместно. Все предметы, которые лежат на других телах, удерживаются силой трения покоя. Причины силы трения покоя такие же, как у силы трения скольжения.

Силы трения покоя даже хватает, чтобы удерживать предметы на наклонных поверхностях. Благодаря силе трения покоя возможны такие формы движения, как ходьба и езда. Когда человек, делая шаг, отталкивается от земли, подошва ботинка стремится продвинуться назад, в сторону противоположную движению человека. А сила трения, действующая со стороны земли на подошву, направлена против движения подошвы. В этом случае сила трения действует противоположно направлению движения подошвы (но по направлению движения человека). Если трение достаточно для того, чтобы нога не проскальзывала, то нога во время толчка перемещаться не будет: подошва движется назад, голова остается на месте, человек падает.

Гийом Амонтон (1663–1705) и Шарль Кулон (1736–1806), о котором речь впереди, ввели понятие коэффициента трения как отношение силы трения к нагрузке, придав ему значение физической константы, полностью определяющей силу трения для любой пары контактирующих материалов. В простейших случаях сила трения F и нормальная нагрузка (или сила нормального давления) N связаны соотношением $|F| \leq \mu N_{\text{норм}}$, обращаемым в равенство только при наличии относительного движения. Это соотношение называется законом Амонтона–Кулона. Сила трения всегда меньше силы нормального давления.

До сих пор написанная ими формула (см. далее) для силы трения является единственной формулой, фигурирующей в учебниках по физике, и служит базой для традиционных технических расчетов.

Коэффициент трения μ определяется материалами, из которых изготовлены поверхности взаимодействующих тел (его значение для разных случаев трения приводится в справочниках).

Рассмотрим законы сухого трения (рис. 7.7).

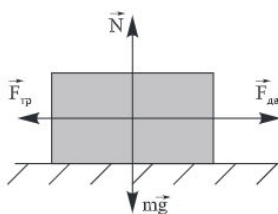


Рис. 7.7

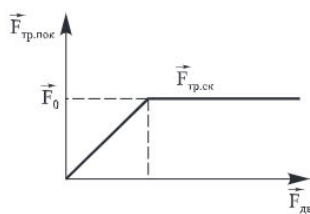


Рис. 7.8

Поддействуем на тело, лежащее на неподвижной плоскости, внешней силой $F_{\text{дв}}$, постепенно увеличивая ее модуль. Вначале брусок будет оставаться неподвижным, значит, внешняя сила $F_{\text{дв}}$ уравнивается некоторой силой $F_{\text{тр}}$, направленной по касательной к трущейся поверхности, противоположной силе $F_{\text{дв}}$. В этом случае $F_{\text{тр}}$ и есть сила трения покоя.

Когда модуль внешней силы, а следовательно, и модуль силы трения покоя превысит значение F_0 , тело начнет скользить по опоре — трение покоя $F_{\text{тр,пок}}$ сменится трением скольжения $F_{\text{ск}}$ (рис. 7.8): $F_{\text{тр}} = \mu N$, где μ — коэффициент трения скольжения. Оценить силу F_0 можно в простом опыте, показанном на рис. 7.9.

Трение качения возникает между шарообразным телом и поверхностью, по которой оно катится. Сила трения качения подчиняется тем же законам, что и сила трения скольжения, но коэффициент трения μ здесь значительно меньше.

Коэффициент трения μ — величина безразмерная. Он зависит от материалов соприкасающихся тел и от качества обработки поверхностей. При скольжении сила трения направлена по касательной к соприкасающимся поверхностям в сторону, противоположную относительной скорости (рис. 7.9). При этом работа силы трения равна произведению силы трения на длину траектории S (величину перемещения): $A_{\text{тр}} = -F_{\text{тр}}S$.

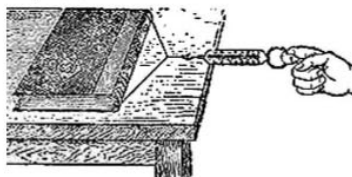


Рис. 7.9. При равномерном движении тела (книги) динамометр показывает силу тяги, равную силе трения

Работа силы тяжести. Если тело равномерно поднимается, то есть движется с постоянной скоростью в направлении, противоположном направлению действия силы тяжести, то, согласно общей формуле работы, над телом совершается работа $A = Fs$, где F — равна по величине весу тела mg . Тогда $A = mgs = mgh$ (h — высота подъема тела). При движении тела по вертикали вниз сила тяжести совпадает по направлению с перемещением и $A = mgh$. При переходе с высоты h_1 над каким-то уровнем, от которого мы начинаем отсчет высоты, до высоты h_2 над тем же уровнем, тело совершает перемещение, по абсолютной величине равное $h_1 - h_2$.

Работа силы тяжести равна $A = mg(h_1 - h_2)$. Высоты h_1 и h_2 не обязательно отсчитывать от поверхности Земли. Для начала отсчета высот можно выбрать любой уровень, ведь в формулу для работы входит разность высот, а она не зависит от того, откуда начинать их отсчет.

Если тело движется вертикально вверх, то сила тяжести направлена против движения тела и ее работа отрицательна. При подъеме тела на высоту h над тем уровнем, с которого оно брошено, сила тяжести совершает работу, равную $A = -mgh$.

Если после подъема вверх тело возвращается в исходную точку, то работа на таком пути, начинающемся и кончающемся в одной и той же точке (на замкнутом пути) на пути «туда и обратно», равна нулю. Это одна из особенностей силы тяжести: работа силы тяжести на замкнутом пути равна нулю.

Потенциальная энергия. С понятием работы тесно связано одно из наиболее важных понятий в науке — энергия. Нельзя дать краткого, строгого и полного определения энергии. Для вопросов, рассматриваемых в этой части, можно ограничиться таким определением: энергия — это способность совершать работу. Определение неполное и не применимое ко всем видам энергии. Но зато это вполне достаточно для энергии механических систем. Связь между энергией и работой является фундаментальной. Понятие потенциальной энергии в четкой форме мы находим у Гельмгольца. Оно появилось в 1847 году в его книге «О сохранении силы».

Выше мы рассмотрели несколько примеров совершения работы: при сжатии пружины, при подъеме и падении тела. Интуитивно ясно, что сжатая пружина обладает способностью произвести работу (собственно, это имеет место в часах), а подвешенный за веревку камень при ее обрыве может привести как к разрушению, так и к производству полезной работы (как это имеет место, например, при забивке свай в грунт).

Поэтому в этих случаях мы говорим, что тело обладает потенциальной энергией. Потенциальной (от лат. *potentia* — возможность) энергией называется энергия, которая определяется взаимным положением взаимодействующих тел или частей одного и того же тела.

Потенциальная энергия тела, поднятого на некоторую высоту над нулевым уровнем, равна работе силы тяжести при падении тела с одной высоты (уровня) до другой. Обозначим потенциальную энергию через E_p . Тогда работа силы тяжести будет выражаться через потенциальную энергию следующим образом: $A = E_{p2} - E_{p1}$.

Если тело падает с высоты h до нулевого уровня, то работа силы тяжести просто равна потенциальной энергии: $A = E_p$.

Следовательно, потенциальная энергия тела, поднятого на некоторую высоту над нулевым уровнем, равна работе силы тяжести при падении тела с этой высоты до нулевого уровня.

Потенциальная энергия зависит от положения тела относительно нулевого уровня, то есть от координат тела. Ведь высота как раз и есть координата тела, отсчитываемая от нулевого уровня. Отметим, что тело обладает энергией потому, что оно взаимодействует с Землей. Не будь Земли, не будь силы притяжения к Земле, не было бы и потенциальной энергии. Поэтому о потенциальной энергии говорят, что это энергия взаимодействия.

Потенциальная энергия, строго говоря, относится не к одному отдельно взятому телу, а к системе тел. В нашем случае эту систему составляют Земля и поднятое над ней тело.

Работа силы упругости равна изменению потенциальной энергии упруго деформированного тела (пружины), взятому с противоположным знаком. Пружина производит работу за счет запасенной потенциальной энергии (как при сжатии, так и при растяжении): $A = kx_1^2/2 - kx_2^2/2$. Если $x_1 = 0$ (недеформированная пружина), то потенциальную энергию в этой точке $U(0)$ можно принять равной нулю.

Тогда изменение потенциальной энергии между значениями x_1 и $x_2 = x$ будет $U(x) = kx^2/2$. Это будет потенциальная энергия сжатой или растянутой пружины на длину x от положения равновесия (рис. 7.10).

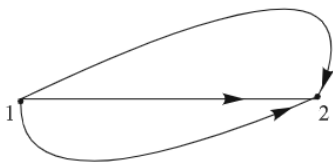
Замечание. Остановимся на одном важном понятии — *консервативной силе*. Консервативная сила — это такая сила, работа которой над телом при его перемещении по любой замкнутой траектории (когда тело возвращается в исходное положение) всегда равна нулю. Работа против сил трения при скольжении всегда отрицательна (сила трения противоположна перемещению). Поэтому, когда тело перемещается по замкнутому пути из точки 1 в точку 2 и обратно из точки 2 в точку 1, полная работа, совершаемая силой трения, никогда не будет равна нулю, она всегда отрицательна. Таким образом, работа, совершаемая неконсервативной силой, не является обратной, как в случае консервативной силы. Различие между консервативными и неконсервативными силами важно потому, что потенциальная энергия может быть определена только для консервативной силы. Если рассматривать систему тел (а именно, как мы видели, потенциальная энергия связана с действием на тело силы, вызванной другим телом), то для нее имеет место закон сохранения энергии. Полная механическая энергия консервативной системы сохраняется постоянной. Это называется законом сохранения энергии в системе, где действуют только консервативные силы.

Потенциальная энергия — скалярная физическая величина, убыль которой равна работе консервативной силы, характеристикой которой она является. Итак,



Зависимость потенциальной энергии пружины от ее деформации

Рис. 7.10. Потенциальная энергия упругодеформированной пружины



работа силы тяжести не зависит от формы траектории тела; она определяется лишь начальным и конечным положениями тела.

Кинетическая энергия. Чтобы сообщить телу ускорение и заставить его двигаться с определенной скоростью, нужно совершить работу. Между изменением скорости тела и работой, совершенной приложенными к телу силами, существует связь. Эту связь проще всего установить, рассматривая движение тела вдоль прямой линии под действием постоянной силы.

Рассмотрим случай, когда тело массой m под действием постоянной силы F (она может быть равнодействующей нескольких сил) перемещается на расстояние s вдоль одной прямой в одну сторону (F и s параллельны). В этом случае работу силы можно определить как $A = Fs$. Модуль силы по второму закону Ньютона равен $F = ma$, а модуль перемещения s при равноускоренном прямолинейном движении связан с модулями начальной v_1 и конечной v_2 скорости и ускорения a выражением $s = (v_2^2 - v_1^2)/2a$.

Это выражение показывает, что работа, совершенная силой (или равнодействующей всех сил), связана с изменением квадрата скорости (а не с самой скоростью).

Физическая величина, равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости, называется кинетической энергией тела:

$$E_k = 1/2 mv^2.$$

Работа приложенной к телу равнодействующей силы равна изменению его кинетической энергии: $A = E_{k2} - E_{k1}$. Это утверждение называют теоремой о кинетической энергии. Теорема о кинетической энергии справедлива и в общем случае, когда тело движется под действием изменяющейся силы, направление которой не совпадает с направлением перемещения.

8. Великий закон природы — закон сохранения энергии. Закон сохранения импульса в упругих столкновениях. Бильярд и законы классической физики. Неупругие соударения. Частично упругие соударения. Симметрия и законы физики.

Выше мы установили, что энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , равна работе, которую должна совершить сила, приложенная к покоящемуся телу, чтобы сообщить ему эту скорость: $A = mv^2/2 = E_k$. Поэтому если тело движется со скоростью v , то для его полной остановки необходимо совершить работу. Рассмотрим простой пример.

Пусть тело, поднятое над Землей, обладает потенциальной энергией $u_1 = mgh_1$ и скоростью v_1 , направленной вниз. В результате свободного падения тело переместилось в точку с высотой h_2 ($u_2 = mgh_2$), при этом скорость его возросла от v_1 до v_2 . Следовательно, его кинетическая энергия возросла от $mv_1^2/2$ до $mv_2^2/2$.

Из уравнения кинематики имеем

$$h_1 - h_2 = (v_2^2 - v_1^2)/2g.$$

Умножим обе части равенства на mg , получим

$$mgh_1 - mgh_2 = A = (1/2)mv_2^2 - (1/2)mv_1^2.$$

Далее это выражение перепишем следующим образом:

$$mgh_1 + (1/2)mv_1^2 = mgh_2 + (1/2)mv_2^2.$$

Полученное равенство демонстрирует закон сохранения механической энергии. *Если в замкнутой системе не действуют силы трения и силы сопротивления, то сумма кинетической и потенциальной энергии всех тел системы остается величиной постоянной.*

Многовековая практика людей показывает, что энергия может быть преобразована из одного вида в другой. В повседневной жизни мы наблюдаем непрерывное перетекание энергии из одного вида в другие. Подбросив мяч, мы сообщаем ему кинетическую энергию. Поднявшись на высоту h , мяч приобретает потенциальную энергию, в процессе падения возрастает его кинетическая энергия, а в момент удара о землю мяч, подобно пружине, сжимается, приобретая потенциальную энергию деформации, и т. д. Всякий раз, когда энергия от одного тела передается другому, совершается работа.

Сохранение механической энергии — это частный случай более общего закона. Если учесть неконсервативные силы, например такие, как сила трения, то мы приходим к более общей формулировке закона сохранения энергии. *При любых процессах энергия не увеличивается и не уменьшается. Энергия может превращаться из одного вида в другой и передаваться от одного тела к другому, но ее полная величина сохраняется постоянной.*

Важность понятия энергии состоит в том, что энергия — сохраняющаяся величина. То есть в любом процессе энергия может преобразоваться из одного вида в другой, но полная энергия не возрастает и не убывает. Это экспериментально установленный физиками девятнадцатого века факт. В установлении этого факта главенствующая роль принадлежит трем ученым: Дж. Джоулю, Г. Гельмгольцу и Роберту Майеру, человеку трагической судьбы (подробнее см. в книге Кессельмана В. С. «На кого упало яблоко». Ломоносовъ, 2014). С момента открытия закона сохранения энергии прошло уже больше двух столетий. За это время мир кардинально изменился, ушли в небытие прежние идеалы и идеологии. Но закон сохранения энергии остался незбытым. Сегодня в его справедливости нет никаких сомнений: по существу, его доказала вся техническая практика человечества.

Кроме закона сохранения энергии в физике рассматриваются и ряд других законов сохранения. И среди них — закон сохранения импульса. Этот закон широко применяется для описания движения двух и более тел.

Сохранение импульса. Столкновения. Открывший этот закон Декарт в одном из своих писем писал: «Я принимаю, что во Вселенной, во всей созданной материи есть известное количество движения, которое никогда не увеличивается, не уменьшается, и, таким образом, если одно тело приводит в движение другое, то теряет столько своего движения, сколько его сообщает».

Если закон сохранения энергии вводит в физику фундаментальное понятие энергии, то закон сохранения импульса — понятие количества движения (импульса). Импульсом называют произведение скорости тела на его массу: $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$.

Так как скорость — величина векторная, то и импульс — векторная величина и имеет направление скорости. А поскольку скорость зависит от системы отсчета, при рассмотрении импульса необходимо всегда указывать систему отсчета, в которой происходит движение.

Из определения импульса следует, что у быстро движущегося тела импульс больше, чем у тела той же массы, движущегося с меньшей скоростью. И наоборот, у тела большей массы импульс больше, чем у более легкого, имеющего ту же скорость. Эти эффекты человек наблюдает в повседневной жизни.

Чтобы изменить импульс тела в любую сторону (увеличить или уменьшить), на него надо подействовать силой. Это учитывал еще Ньютон при выводе своего второго закона. При этом произведение mv он называл количеством движения.

На языке современной физики второй закон аналитически можно записать так:

$$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt,$$

где \mathbf{F} — результирующая сила, приложенная к материальной точке. Подставив выражение для импульса, получим выражение второго закона в более общем виде, чем у Ньютона, так как оно включает в себя случай переменной массы:

$$\mathbf{F} = d(m\mathbf{v})/dt.$$

Если масса постоянна, написанное выражение переходит в привычную форму:

$$m d\mathbf{v}/dt = m\mathbf{a}.$$

Если имеется система, в которой взаимодействуют n частиц с массами m_1, m_2, \dots, m_n , имеющими скорости $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$, тогда полный импульс системы частиц запишется следующим образом:

$$\mathbf{P} = m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 + \dots + m_n\mathbf{v}_n = \sum \mathbf{p}_i.$$

В случае когда результирующая внешняя сила, действующая на систему, равна нулю, импульс системы остается постоянным:

$$d\mathbf{P}/dt = 0$$

и, следовательно, $\mathbf{P} = \text{const}$. Это есть закон сохранения импульса.

Его можно сформулировать следующим образом: *полный импульс замкнутой системы тел сохраняется постоянным.*

Хотя закон сохранения импульса следует из второго закона Ньютона, он имеет более общий характер, чем закон Ньютона.

Так, в микроскопическом мире атомов второй закон Ньютона не всегда выполняется, а великие законы сохранения энергии и импульса выполняются.

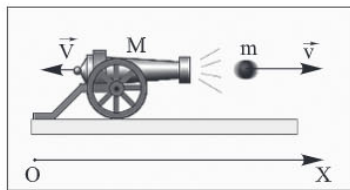
Подчеркнем, что закон сохранения импульса имеет место в изолированной (замкнутой) системе тел. Такой системой называется механическая система, на каждое из тел которой не действуют внешние силы. В изолированной системе проявляются внутренние силы, то есть силы взаимодействия между телами, входящими в систему. Закон сохранения импульса во многих случаях позволяет находить скорости взаимодействующих тел даже тогда, когда значения действующих сил неизвестны.

Рассмотрим вначале задачу, иллюстрирующую применение закона сохранения импульса на простом примере стрельбы из орудия.

Пример 1. На платформе установлено орудие. Общая масса платформы с орудием 19 т. Ствол орудия расположен горизонтально. Чему равна скорость снаряда массой 50 кг, если платформа откатилась со скоростью 0,5 м/с.

Решение. При стрельбе из орудия возникает отдача — снаряд движется вперед, а орудие — откатывается назад. Снаряд и орудие — два взаимодействующих

тела. Скорость, которую приобретает орудие при отдаче, зависит только от скорости снаряда и отношения масс. Запишем закон сохранения для нашего случая в проекции на ось X , вдоль которой производится выстрел. $P_{\text{снар.}x} = P_{\text{оруд.}x}$. Решаем уравнение в общем виде. Учтем, что после выстрела платформа с орудием стала легче на массу снаряда, но эта масса много меньше массы орудия, и мы ее можем не учитывать. Тогда $m_{\text{снар}}v_{\text{снар}} = m_{\text{оруд}}v_{\text{оруд}}$. Отсюда $v_{\text{снар}} = (m_{\text{оруд}}/m_{\text{снар}})v_{\text{оруд}}$.



Подставляем величины в общее решение, после вычислений получим скорость снаряда 190 м/с. Заметим, что в приведенном примере для определения скорости вылета снаряда использованы только начальное и конечное состояния системы и совершенно выпали из рассмотрения сложные процессы, происходившие между этими двумя состояниями.

Пример 2. Реактивное движение. Под *реактивным движением* понимают движение тела, возникающее при отделении от тела его части с некоторой относительно тела скоростью. При этом появляется так называемая реактивная сила, толкающая тело в сторону, противоположную направлению движения отделяющейся от него части тела. Реактивное движение совершает ракета (рис. 8.1). Основной частью реактивного двигателя является камера сгорания. В одной из ее стенок имеется отверстие — реактивное сопло, предназначенное для выхода газа, образующегося при сгорании топлива. До работы двигателя импульс ракеты и горючего был равен нулю, следовательно, и после включения двигателей геометрическая сумма импульсов ракеты и истекающих газов равна нулю: $mv_1 + Mv_2 = 0$, где m и v_1 — масса и скорость выбрасываемых газов, M и v_2 — масса и скорость ракеты. В проекции на ось Oy : $Mv_2 - mv_1 = 0$; $v_2 = (m/M)v_1$ — скорость ракеты. Эта формула справедлива при условии небольшого изменения массы M . Главная особенность реактивного движения состоит в том, что ракета может как ускоряться, так и тормозиться и поворачиваться без какого-либо взаимодействия с другими телами в отличие от всех других транспортных средств.

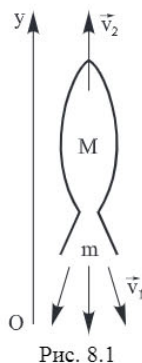


Рис. 8.1

Столкновения и импульс силы. Столкновениями между двумя телами называют такие взаимодействия, которые происходят за очень короткое время, и силы взаимодействия между сталкивающимися телами при этом столь велики, что можно пренебречь всеми остальными силами. Столкновение двух частиц называют упругим, если оно не сопровождается изменением их внутреннего состояния. При применении к такому столкновению закона сохранения энергии можно не учитывать внутренней энергии частиц. Столкновения, сопровождающиеся изменением внутреннего состояния тел, называются неупругими. При абсолютно неупругом ударе механическая энергия частично или полностью переходит во внутреннюю энергию тел (например, в тепло).

Замечание. Необходимо отметить, что в физике под столкновениями понимают процессы взаимодействия между телами (частицами) в широком смысле слова, а не только в буквальном — как соприкосновение тел. Сталкивающиеся тела на большом расстоянии

свободны. Проходя друг мимо друга, тела взаимодействуют, причем могут происходить различные процессы: соединение в одно тело (абсолютно неупругий удар), возникновение новых тел, и, наконец, может иметь место упругое столкновение, при котором тела после некоторого сближения вновь расходятся без изменения своего внутреннего состояния.

Когда происходит столкновение, сила взаимодействия от нулевого значения в момент контакта возрастает до большой величины, а затем вновь резко падает до нулевого значения.

В течение бесконечно малого промежутка времени dt импульс изменяется на величину $dp = F dt$.

Из второго закона Ньютона следует, что результирующая сила, действующая на тело, равна скорости изменения его импульса:

$$dp/dt = F(t).$$

Проинтегрировав это равенство по времени, на временном отрезке от t_1 до t_2 , в течение которого происходит столкновение, получим

$$p_2 - p_1 = \int F dt.$$

Таким образом, изменение импульса тела $\Delta p = p_2 - p_1$ равно импульсу силы, действующей на него. В случае одновременного действия нескольких сил сумма их импульсов равна импульсу их равнодействующей за то же время. Если действующая сила постоянна, задача упрощается. Импульс силы в этом случае равен произведению F на время действия силы: $\Delta p = F \Delta t$.



Рис. 8.2

Подчеркнем, что импульс, приобретаемый телом, зависит не только от действующей на тело силы, но и от продолжительности ее действия. Это можно проиллюстрировать, например, в опыте с выдергиванием листа бумаги из-под бутылки: мы оставим ее стоящей практически неподвижной, если сделаем это рывком (рис. 8.2). Сила трения скольжения, действующая на бутылку в течение очень малого промежутка времени, то есть небольшой импульс силы, вызывает соответ-

ственно малое изменение импульса бутылки (рисунок из статьи: Гольдфарб Н., Новиков В. Импульс тела и системы тел // Квант. 1977. Т. 17. № 12. С. 52–58).

Рассмотрим взаимодействие двух тел. До взаимодействия импульс первого тела был p_1 , импульс второго тела — p_2 ; после взаимодействия первое тело будет иметь импульс \tilde{p}_1 , второе — \tilde{p}_2 . Принцип передачи импульса означает, что изменение импульса первого тела равно изменению импульса второго тела, взятому с обратным знаком. Отсюда имеем $\tilde{p}_1 - p_1 = -(\tilde{p}_2 - p_2)$ (здесь символом \sim обозначены значения импульсов тел после столкновения). Это соотношение можно переписать в таком виде: $p_1 + p_2 = \tilde{p}_1 + \tilde{p}_2$. Равенство выражает закон сохранения импульса: *суммарный импульс замкнутой системы двух тел до взаимодействия равен суммарному импульсу тел после взаимодействия*. Импульс только передается, он не возникает из ничего и не исчезает бесследно.

Закон сохранения импульса имеет место даже в случае, когда действуют внешние силы. Требование лишь одно: чтобы изменение импульса, обусловленное силой взаимодействия при столкновении, было много больше изменения импульса, обусловленного внешними силами.

Тела (частицы), участвующие в столкновении, характеризуются (до и после столкновения) импульсами, энергиями. Процесс столкновения сводится к изменению этих величин в результате взаимодействия. Законы сохранения энергии и импульса позволяют достаточно просто устанавливать соотношения между различными физическими величинами при столкновении тел. Важно здесь то обстоятельство, что зачастую законы сохранения могут быть использованы даже в тех случаях, когда действующие силы неизвестны, например в случае ударного взаимодействия частиц.

С ударным взаимодействием тел нередко приходится иметь дело в обыденной жизни, в технике и в физике (особенно в физике атома и элементарных частиц). Во время столкновения тел между ними действуют кратковременные ударные силы, величина которых, как правило, неизвестна. Поэтому нельзя рассматривать ударное взаимодействие непосредственно с помощью законов Ньютона. Применение законов сохранения энергии и импульса во многих случаях позволяет исключить из рассмотрения сам процесс столкновения и получить связь между скоростями тел до и после столкновения, минуя все промежуточные значения этих величин.

Согласно закону сохранения энергии полная энергия сталкивающихся тел также будет сохраняться. При этом может переходить в различные формы. В некоторых столкновениях сохраняется полная кинетическая энергия двух частиц. Такие столкновения называются упругими, и для таких столкновений будет иметь место равенство $1/2 m_1 v_1^2 + 1/2 m_2 v_2^2 = 1/2 m_1 \tilde{v}_1^2 + 1/2 m_2 \tilde{v}_2^2$. То есть полная кинетическая энергия до столкновения в точности равна полной кинетической энергии после столкновения.

Упругие столкновения в одном измерении. Рассмотрим случай лобового столкновения двух частиц, когда все происходит по одной прямой. Удар будем считать абсолютно упругим. При этом надо помнить, что такой удар является моделью, поскольку в реальной жизни столкновение тел всегда сопровождается трением, остаточными деформациями, излучением звуковых волн и другими процессами, которые сопровождаются потерями механической энергии. Однако в некоторых случаях эти потери настолько малы, что ими можно пренебречь. Например, столкновение бильярдных шаров можно считать абсолютно упругим.

Предположим, что до столкновения шары, массы которых m_1 и m_2 , двигались вправо (координата x возрастает) со скоростями v_1 и v_2 соответственно. Скорости шаров после соударения равны соответственно u_1 , u_2 . Из закона сохранения импульса имеем $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2$.

Для случая упругого столкновения, который здесь рассматривается, сохраняется также и энергия:

$$1/2 m_1 v^2 + 1/2 m_2 v_2^2 = 1/2 m_1 u_1^2 + 1/2 m_2 u_2^2.$$

Таким образом, мы получили два уравнения с двумя неизвестными. Если массы шаров известны, а также заданы скорости шаров до столкновения, тогда можно найти скорости шаров после столкновения.

Опуская промежуточные преобразования, получим

$$u_2 = v_1(2m_1/(m_1 + m_2)) + v_2(m_2 - m_1)/(m_1 + m_2),$$

$$u_1 = v_1(m_1 - m_2)/(m_1 + m_2) + v_2(2m_2/(m_1 + m_2)).$$

Рассмотрим несколько частных случаев.

1. Массы шаров одинаковы: $m_1 = m_2$.

При этом имеем $u_2 = v_1$ и $u_1 = v_2$. В этом случае частицы (шары) обмениваются скоростями. Если до столкновения второй шар покоился ($u_1 = 0$), тогда $u_2 = v_1$, $u_1 = 0$. То есть первая частица полностью теряет свою скорость и останавливается, в то время как вторая приобретает скорость, которую имела первая частица до столкновения. Эффект, известный хорошо игрокам в бильярд.

2. Частица 2 до соударения покоилась ($v_2 = 0$). Ситуация, часто встречающаяся на практике. В этом случае получаем

$$u_2 = v_1(2m_1/(m_1 + m_2)) \quad \text{и} \quad u_1 = v_1(m_1 - m_2)/(m_1 + m_2).$$

Рассмотрим отдельно два случая.

а) Частицы одинаковой массы. В этом случае мы приходим к уже рассмотренному выше случаю.

б) Масса налетающей частицы много больше массы покоящейся ($m_1 \gg m_2$). Легко видеть из приведенных соотношений, что в этом случае $u_2 \approx 2v_1$ и $u_1 \approx v_1$. Таким образом, налетающая частица большой массы практически сохраняет свою скорость, а покоящаяся приобретает почти удвоенную скорость налетающей частицы.

в) Теперь случай, когда на покоящееся тело большой массы налетает легкая частица (или легкое тело сталкивается с очень тяжелым): $u_2 \approx 0$ и $m_2 \gg m_1$. В этом случае массивное тело остается практически в покое, а налетающее отскакивает с той же скоростью, которую оно имело до столкновения.

Это имеет место, например, когда шар сталкивается со стенкой. Шар отразится от стены с сохранившейся по модулю скоростью. Рассмотренные выше случаи иллюстрирует таблица 1.

Таблица 1

	$m_1 = m_2$	$m_1 > m_2$	$m_1 < m_2$
До столкновения			
После столкновения			

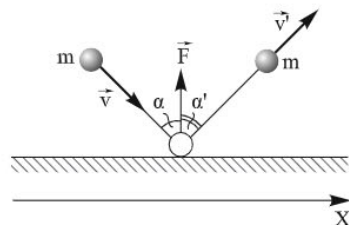


Рис. 8.3

Упругие столкновения в двух измерениях. В случае двух и более измерений законы сохранения энергии и импульса также применимы. Однако в этих случаях необходимо учитывать векторный характер импульса.

Рассмотрим упругое столкновение шара со стенкой.

Чтобы определить угол, под которым шар отразится от стенки, воспользуемся законом сохранения импульса. Возникающая в момент

столкновения сила реакции стены перпендикулярна ее плоскости, и поэтому проекция ее на ось X равна нулю. Проекция начального импульса на ось X равна $mv_x \cos(90 - \alpha) = mv_x \sin \alpha$, а проекция импульса после столкновения $mv_x \sin \alpha'$.

По закону сохранения импульса: $mv_x \sin \alpha = mv_x \sin \alpha'$. Принимая во внимание и закон сохранения кинетической энергии $1/2mv^2 = 1/2m\dot{v}^2$, получим, что $\sin \alpha = \sin \alpha'$. А значит, равны и углы. То есть шар отразится от стенки под тем же углом: угол падения равен углу отражения.

Обсуждая теорию столкновений шаров, нельзя не рассказать немного о бильярде, где рассматриваемая теория нашла непосредственное применение.

Игра построена исключительно на точности удара и законах классической физики. Поэтому понятна инициатива профессора Чешского университета города Оломоуц, преподавателя физики Ричарда Корак. Он стал инициатором введения нового спецкурса для студентов, который назывался «Игра на бильярде». Господин Корак объяснил, что игра на бильярде, с использованием зрительного кода, поможет студентам лучше усвоить читаемый им курс по кинематике и теории динамических систем.

Декан факультета не только поддержал нововведение, а отдал распоряжение об оборудовании специального бильярдно-физического кабинета.

А впервые о математическом базисе бильярдной игры заговорил Гаспар Густав Корнолис в своей книге «Математическая теория явлений бильярдной игры» в 1835 году. Он использовал в своей работе элементы теории вероятностей, теории пределов и общего анализа. Однако особого интереса у современников книга не вызвала: ни у математиков, ни у бильярдистов. Прошло более полутора столетий, и математический бильярд развился в свою теорию, породив несколько побочных. «Теория бильярдных» сегодня — неотъемлемая часть эргодической теории и теории динамических систем, имеет важнейшее применение в физике.

Неупругое соударение. Если при столкновении частиц кинетическая энергия не сохраняется, то такие столкновения называются неупругими. В таких столкновениях часть начальной кинетической энергии преобразуется в другие формы, например в тепловую. Если в результате столкновения два тела «слипаются», то есть движутся далее как единое целое, то такие столкновения называются полностью неупругими. При таких столкновениях необязательно превращение кинетической энергии в другие. При этом имеет место сохранение полной энергии, а также сохраняется вектор полного импульса.

Рассмотрим пример абсолютно неупругого удара для случая попадания пули (или снаряда) в баллистический маятник.

Изобрел такой маятник в 1707 году Робинс. Прибор представлял собой массивную деревянную колоду, свободно подвешенную на крюке. Когда в маятник попадала мушкетная пуля, по размаху его колебаний можно было определить ее кинетическую энергию. С помощью маятника Робинс впервые определил начальную скорость пули, которая оказалась равной 1139 милям в час.

Современные исследования подтверждают, что и мушкетные пули, и пушечные ядра той эпохи действительно имели большую начальную скорость — вероятно, от 1000 до 1200 миль в час. Это лишь половина скорости современной винтовочной пули, однако значительно быстрее скорости звука (750 миль в час). Маятник представляет собой ящик с песком массой M , подвешенный на веревках (рис. 8.4). Пуля массой m , летящая горизонтально со скоростью v , попадает в ящик и застревает в нем. По отклонению маятника можно определить скорость

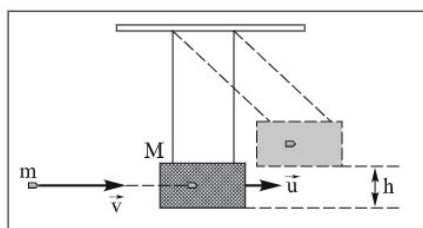


Рис. 8.4. Баллистический маятник

пули. Обозначим скорость ящика с застрявшей в нем пулей через u . Тогда по закону сохранения импульса в проекции на горизонтальную ось

$$mv = (m + M)u; \quad u = m/(m + M)v.$$

При застревании пули в песке произошла потеря механической энергии:

$$\begin{aligned} \Delta E &= mv^2/2 - (M + m)u^2/2 = \\ &= M/(M + m)mv^2/2. \end{aligned}$$

Отношение $M/(M + m)$ — доля кинетической энергии пули, перешедшая во внутреннюю энергию системы: $\Delta E/E = M/(M + m) = 1/(1 + m/M)$. Эта формула применима не только к баллистическому маятнику, но и к любому неупругому соударению двух тел с разными массами. При $m \ll M$ почти вся кинетическая энергия пули переходит во внутреннюю энергию. При $m = M$ отношение $\Delta E/E = 1/2$. То есть во внутреннюю энергию переходит половина первоначальной кинетической энергии. Наконец, при неупругом соударении движущегося тела большой массы с неподвижным телом малой массы ($m \gg M$) отношение $\Delta E/E \rightarrow 0$. Дальнейшее движение маятника можно рассчитать с помощью закона сохранения механической энергии:

$$1/2 (M + m) u^2 = (M + m)gh; \quad u^2 = 2gh,$$

где h — максимальная высота подъема маятника. Из этих соотношений следует

$$v = (M + m)/m\sqrt{2gh}.$$

Измеряя на опыте высоту h подъема маятника, можно определить скорость пули v .

Частично упругое соударение (лобовое центральное). В реальных процессах более или менее значительная часть энергии растрачивается на создание небольших деформаций и преодоление сил внутреннего трения.

Вследствие потери энергии скорости тел после частично упругого соударения будут меньше, чем после абсолютно упругого соударения. Часть работы, затраченной на деформацию тел при неупругом соударении $\Delta E = E_1 - E_2$, снова превращается в кинетическую энергию, а именно:

$(E_1 - E_2)k^2$. Здесь k — так называемый коэффициент восстановления. Коэффициент восстановления k является в определенном смысле мерой упругости тела, и его можно определить экспериментально.

Для этого достаточно бросить шарик на пластинку из того же материала и определить высоту подскока.

Если k — коэффициент восстановления, h_1 — высота, с которой падает шарик, h_2 — высота подскока шарика, тогда можно показать, что $k = u/v$ (u , v — скорости после и до удара о плиту). Так как $v = \sqrt{2gh}$, получаем $k = h_2/h_1$. Для тел из дерева $k = 1/2$, из стали $\sim 5/9$, из слоновой кости $\sim 8/9$, из стекла $\sim 15/16$.

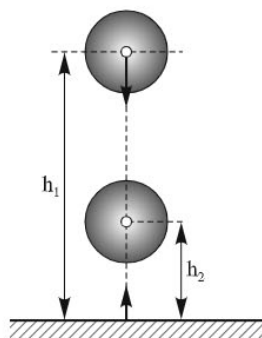


Рис. 8.5

Следует отметить, что законы сохранения (не только рассмотренные выше) тесно связаны с законами симметрии. Это особенно отчетливо стало понятно физикам в прошлом веке.

Симметрия и законы физики. Симметрия является одним из фундаментальных свойств природы, представление о ней складывалось в течение жизни сотен поколений людей. Само понятие «симметрия», связанное с понятием красоты или гармонии, пришло из Древней Греции (5 в. до н. э.). Греческое слово *συμμετρία* означает нечто гармоничное, однородное, соразмерное, пропорциональное в объекте. Со времен Пифагора симметрия была для людей реальным выражением объектов и явлений природы, а не абстрактным, отвлеченным понятием.

В физике симметрия законов определяется следующим образом: если физические законы, вернее выражающие их математические уравнения, не меняются (вид уравнений остается неизменным) при определенных преобразованиях, которым может быть подвергнута система (физический объект), то считается, что эти законы обладают симметрией (или инвариантны) относительно этих преобразований. Фундаментальное значение принципа симметрии в науке ярко выражено Марией Кюри: «Принцип симметрии является одним из немногих великих принципов, которые господствуют в физике».

Самая простая из симметрий — однородность и изотропность пространства. Слово «изотропность» означает независимость свойств объектов от направления. Однородность пространства означает, что каждый физический прибор должен работать одинаково в любом месте, если не изменяются окружающие физические условия. Однородно не только пространство, но и время. Ход времени определяется относительной скоростью различных процессов в природе. Ход часов можно определить числом периодов колебания света, излучаемого атомом за время перемещения стрелки на одно деление; скорость космического корабля можно сравнить со скоростью света или звука в воздухе.

Любое измерение интервала времени означает сравнение скоростей разных процессов. Равномерность хода времени означает, что во всякое время, и сегодня, и через год, *относительная скорость* всех процессов в природе одинакова. Все физические явления идут одинаково, когда бы они не начались — минуту или миллиард лет назад. Электроны в атомах далеких звезд движутся в том же ритме, что и на Земле, — частота испускаемого ими света такая же, несмотря на то что свет был испущен миллиарды лет тому назад. Равномерность хода времени установлена с колоссальной точностью на примере излучения атомов.

Важный тип симметрии — это так называемая Т-симметрия. Суть ее заключается в том, что при изменении направления течения времени на противоположное закон, описывающий движение частицы, не меняется. Примером такого правила может служить второй закон Ньютона, связывающий силу и ускорение. Чтобы понять, почему это так, представим фильм, который проигрывают задом наперед — это и будет изменение направления течения времени на противоположное. По экрану задом едут машины, пьются люди. Вместе с тем делают они это на той же скорости, что и при правильном просмотре фильма, — изменилось только направление. С точки зрения физики это означает, что скорость изменила знак. Ускорение, то есть скорость изменения скорости, остается тем же — по сути, ровно потому, что минус на минус дает плюс (изменились одина-

ково знаки скорости и времени). Этот факт и влечет инвариантность второго закона Ньютона.

В механике обратимость времени прямо видна из уравнений.

Симметрии, о которых мы рассказали, на научном языке формулируются так: *все законы природы инвариантны относительно операции переноса в пространстве и времени и относительно поворотов в пространстве.*

В 1924 году нидерландский физик Хендрик Антон Лоренц обнаружил, что это свойство существует и в электродинамических явлениях. Анри Пуанкаре показал, что результаты Лоренца означают инвариантность уравнений электродинамики относительно поворотов в четырехмерном пространстве, где кроме трех координат есть еще одна — временная. Симметрия, объединяющая пространство и время, — это и есть преобразования Лоренца. Эйнштейн обнаружил, что эта симметрия всеобщая, что все явления природы не изменяются при таких поворотах.

Однако только в 1918 году такая связь между симметриями и законами природы была математически установлена немецким математиком Эми Нётер.

Эми Нётер (1882–1935) окончила университет в Эрлангене. В 1916 году переехала в Геттинген, считавшийся математической столицей мира. Будучи уже выдающимся математиком, Нётер как женщина не получила академической должности и до 1922 года читала университетский курс алгебры вместо его официального руководителя Д. Гильберта (с его согласия). Гильберт пытался сделать Нётер приват-доцентом Геттингенского университета, но все его попытки провалились из-за предрассудков профессуры, в основном в области гуманитарных наук. Стала известна фраза Гильберта: «Не понимаю, почему пол кандидата служит доводом против избрания ее приват-доцентом. Ведь здесь университет, а не мужская баня!» В 1933 году после прихода фашистов к власти Нётер была вынуждена покинуть Германию и переехала в США, где преподавала в женском колледже Брин-Мор.

В соответствии с теорией Нётер было доказано, что все законы сохранения связаны с симметриями природы. Теорема Эмми Нётер утверждает, что каждой непрерывной симметрии физической системы соответствует некоторый закон сохранения. На равноправии места (однородность пространства) покоится закон сохранения импульса. На равноправии направлений (изотропность пространства) — законы сохранения момента количества движения. Далее, сдвиг во времени не меняет физических законов, то есть все моменты времени объективно равноправны. Отсюда следует, что можно любой момент времени взять за начало отсчета. Период колебаний маятника «ходиков» не изменится, если отсчитать его в полдень или в полночь, т. е. законы физики не зависят от выбора начала отсчета времени. На этом свойстве времени основан основной закон природы — закон сохранения энергии. Когда в 30-х годах изучался радиоактивный распад, оказалось, что энергия вылетающих при распаде электронов меньше разности энергий ядер до и после распада. Как будто нарушался закон сохранения энергии! (см. с. 439). Некоторые физики заколебались, потеряли уверенность в универсальности этого закона. Но большинство из них твердо верили в его незыблемость и предположили, что вместе с электронами вылетает нейтральная частица — нейтрино, унося излишек энергии. И оказались правы! Энергия сохраняется с той же точностью, с какой соблюдается однородность времени.

Неудивительно, что законы сохранения энергии, импульса, углового момента соблюдаются во всех явлениях природы, они есть следствие такого свойства нашего мира, как симметрия пространства и времени.

Тест на симметричность является проверкой на правильность физикатеоретика, получившего свое уравнение с претензией на фундаментальность.

Симметрия обладает признаком всеобщности, поэтому связанные с ней законы сохранения фундаментальны. В физике к настоящему времени установлены связи множества законов сохранения с соответствующими симметриями. «Симметрий» так много, что в них можно запутаться. Но вот что необходимо учесть: симметрии интересны не просто как занятный факт. Они интересны тем, что за каждой из них стоит какой-нибудь физический закон.

Классическая механика в действии

Широкое использование методов классической механики Ньютона: от газов до твердых тел. Получены ответы на вопросы: почему вода в насосах колодезников не поднимается выше 10 метров?, отчего не тонут тяжелые суда? Найдены удобные способы измерения температуры.

9. *Истоки гидростатики. Закон Паскаля. Давление в жидкостях и газах. Условия плавания тел. Непростые истории с атмосферным давлением. Опыты Торричелли и Герике. Интересные эффекты: поверхностное натяжение, капиллярность.*

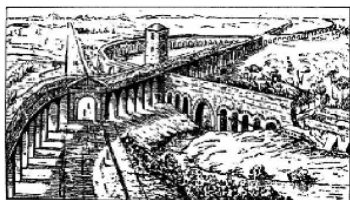


Рис. 9.1. Римский водопровод (после реставрации)

Жизнь человечества всегда была, есть и всегда будет связана с водой. Еще в глубокой древности наши предки научились использовать реки и моря в своих целях. Первые гидротехнические сооружения были возведены тысячелетия тому назад в Египте, Риме, Месопотамии и Средней Азии. А в Греции был изобретен непосредственный предок современной канализации — акведук (системы для подъема и подачи воды). Во времена Троянской войны в Древнем Риме уже существовал водопровод, протяженность которого составляла 436 километров. Однако никаких сведений о проведении каких-либо гидравлических расчетов найдено не было.

Первым официальным научным трудом в области гидростатики, который сохранился до наших дней, является трактат Архимеда, который называется «О плавающих телах». Он был написан примерно за 250 лет до нашей эры, когда

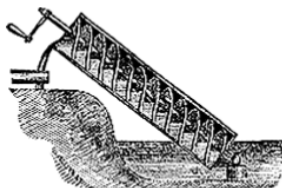


Рис. 9.2. Схема водоподъемного винта

этим же математиком был открыт закон о равновесии тел, погруженных в жидкость. Об этом мы рассказывали выше. Архимед изобрел машину для поливки полей — «улитку», или водоподъемный винт.

Машина состоит из винта внутри полой трубы. Она была изобретена Архимедом в то же время, около 250 лет до н. э., либо ранее. Винт можно представить как наклонную плоскость, наведенную на цилиндр. Винт вращается обычно с помощью ветряного колеса либо вручную. В то время как поворачивается нижний конец трубы, он собирает некоторый объем воды. Это количество воды будет скользить вверх по спиральной трубе во время вращения вала, пока наконец вода не выльется из вершины трубы, снабжая ирригационную систему.

Такая «улитка» быстро распространилась в долине Нила, у водоемов. Вскоре она нашла применение в других странах, расположенных по берегам Средиземного моря.

Построением и использованием плавательных средств человечество занималось с древнейших времен. Особое развитие оно получило в бассейне Средиземноморья благодаря финикийцам, египтянам и древним грекам. Занимая острова и прибрежные территории, греческие города-государства широко использовали морские пути сообщения. Водоизмещение судов достигало, как правило, десятков тонн. Кроме парусного снаряжения, коммерческие корабли во многих случаях имели весла, что позволяло им двигаться и во время штиля. Средняя скорость хода у них была все же незначительна. Хороший торговый корабль мог с утра до полудня пройти расстояние от Афона до Лемна, это около 60 км, что дает скорость в $41/2$ узла (несколько более 8 км/ч). В исключительных случаях скорость достигала и 7 узлов. Так что ученые могли добраться из Афин в знаменитую Александрийскую библиотеку (километров триста) на корабле, как отмечалось выше, менее чем за трое суток. Вполне приемлемо, хотя и не очень комфортно по теперешним меркам.



Рис. 9.3. Древнегреческая бирема, VI в. до н. э. (рисунок на античной вазе)

Такое географическое положение настоятельно требовало создания надежных плавательных средств. В кораблестроении возникал ряд практических задач, не поддававшихся решению на основе одного только здравого смысла. Техническая практика древних цивилизаций дала богатый эмпирический материал, явившийся необходимой предпосылкой теоретической мысли.

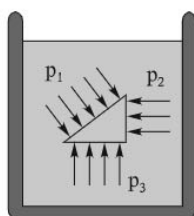
Свое дальнейшее развитие данная область получила уже в XIV–XVII веках. Именно к этому периоду относятся труды знаменитого Леонардо да Винчи, который занимался изучением движения воды в реках и озерах, а также изобрел центробежный насос и возводил гидротехнические сооружения. В области теоретической гидростатики Леонардо знал принцип сообщающихся сосудов для жидкостей различной плотности, а также знал основной принцип гидростатики, ныне известный как закон Паскаля. Согласно историку науки Дюэму этот закон Паскаль узнал от Леонардо да Винчи через Джованни Батисто Бенедетти и Марино Мерсенна, с которым Паскаль вел переписку. Обратимся к закону Паскаля.

Закон Паскаля. Блез Паскаль сделал много открытий в физике. Рассказанное далее о работах Паскаля — это лишь небольшая часть того, что сделал этот великий человек. Наиболее известен закон, названный его именем, о передаче давления в жидкостях и газах: *давление в жидкости или газе передается во всех направлениях одинаково и не зависит от ориентации площадки, на которую оно действует.*

Вначале остановимся на результатах опытов Паскаля, а затем подробно рассмотрим некоторые математические



Blaise Pascal



Закон Паскаля
 $p_1 = p_2 = p_3$

действующие на грани призмы, должны быть уравновешены. Это произойдет только в том случае, если давления, то есть силы, действующие на единицу поверхности каждой грани, одинаковы: $p_1 = p_2 = p_3 = p$.



А давит ли вода вверх? Рассмотрим простой опыт, доказывающий, что вода давит и вверх.

Вырежем из плотного гладкого картона кружок такого диаметра, чтобы он с запасом закрывал отверстие лампового стекла. Приложим его к торцу стекла и погрузим в воду, как показано на рис. Чтобы кружок не отпадал при погружении, его можно придержать ниткой или просто прижать пальцем. Погрузив стекло до некоторой глубины, можно видеть, что кружок хорошо держится и сам, не прижимаемый ни пальцем, ни нитью: его подпирает вода, давящая снизу вверх.



В 1648 году Паскаль выполнил свой знаменитый опыт. Он вставил в закрытую бочку, наполненную водой, трубку диаметром 1 см^2 , длиной 5 м и, поднявшись на балкон второго этажа дома, вылил в эту трубку кружку воды. Когда вода в ней поднялась до высоты ~ 4 метра, давление воды увеличилось настолько, что в крепкой дубовой бочке образовались щели, через которые во все стороны потекла вода.

Паскаль убеждается: да, сила, разорвавшая бочку, вовсе не зависит от количества воды в трубке. Все дело в высоте, до которой трубка была заполнена. Так проявляется удивительное свойство воды — передавать давление, создаваемое на ее

поверхности (в бочке) по всему объему, каждой точке стенки или дна бочки. Опыт Паскаля иллюстрирует тот факт, что на жидкость, как и на любое тело на Земле, действует сила тяжести. Каждый слой жидкости создает давление на другие слои. По закону Паскаля, это давление передается в любом направлении. Это означает, что давление существует и внутри жидкости, и оно зависит от высоты столба жидкости. Сила, вызывающая это давление, называется *гидростатической силой*, ее мы подробнее рассмотрим ниже. Для измерения этой силы Паскаль создал прибор, который называют *гидростатическими весами Паскаля*.

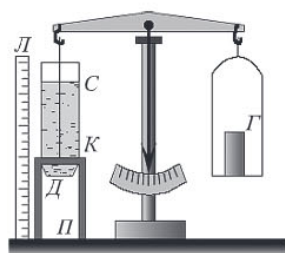


Рис. 9.4. Гидростатические весы Паскаля

В подставке *П*, сквозь которую проходит кольцевой патрубок *К*, можно периодически герметично закреплять сосуды *С* любой формы, не имеющие дна. Под-

вижным дном этих сосудов служит подвешенная на коромысле равноплечих весов плоская круглая площадка D , расположенная вблизи нижнего отверстия патрубка K . Эта площадка прижимается к торцу патрубка силой, вызываемой тем, что на чашку весов, подвешенную на другом их коромысле, ставится гиря G . К подставке $П$ прикреплена линейка $Л$, по которой определяют высоту h жидкости в сосуде, закрепленном на подставке. Если в сосуд наливают жидкость, на пластинку начинает действовать сила давления. И если эта сила больше, чем вес гири, которая стоит на другой чашке весов, пластинка отрывается от сосуда. Опыты проводились с сосудами различной формы. Но дно всех сосудов имело одинаковую площадь. У сосуда цилиндрической формы пластинка отрывалась от дна, когда вес жидкости сравнивался с весом гири. Но у сосуда с расширяющейся кверху формой это происходило при весе, большем веса гири, а у сосуда, сужающегося кверху, вес воды был меньше веса гири. Такая зависимость давления, производимая жидкостью на дно сосуда от формы сосуда, получила название *гидростатический парадокс*.

Объясняется гидростатический парадокс тем, что, поскольку гидростатическое давление всегда нормально к стенкам сосуда, сила давления на наклоненные стенки имеет вертикальную составляющую, которая компенсирует вес излишнего против цилиндра объема жидкости в расширяющемся кверху сосуде и вес недостающего против цилиндра объема.

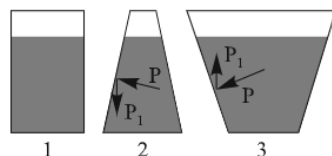


Рис. 9.5. К объяснению гидростатического парадокса

А теперь остановимся подробнее на понятии давления в жидкости и газе.

Давление в жидкостях и газах. В разделе механики мы уже встречались с понятием давления. Давление равно силе, действующей на единицу площади поверхности в перпендикулярном к поверхности направлении:

$$P \text{ (давление)} = F/A.$$

Здесь A — площадь поверхности. Силы давления — это силы упругости сжатых жидкости или газа. Чем сильнее сжаты жидкость или газ, тем больше и силы давления. На основе опыта было получено, что жидкости и газы создают давление во всех направлениях. В любой точке внутри покоящейся жидкости (или газа) давление одинаково во всех направлениях. Если бы это было не так, то, например, внутри покоящейся жидкости маленький кубик двигался бы, так как результирующая сила, действующая на противоположные грани, не равнялась бы нулю.

Важным свойством покоящейся жидкости является то, что сила, вызванная давлением, действует всегда перпендикулярно поверхности, с которой она соприкасается. И этот эффект можно понять: если бы сила имела составляющую, параллельную поверхности, то по третьему закону Ньютона сила реакции поверхности тоже имела бы параллельную составляющую. Тогда под действием этой составляющей силы жидкость могла бы течь, тем самым нарушилось предположение о неподвижности жидкости.

Изменение давления с глубиной. Давление внутри жидкости на некоторой глубине обусловлено весом столба жидкости над выбранной точкой. Опытным путем легко убедиться, что на одной и той же поверхности уровня (во всех его точках) манометр (прибор, измеряющий давление, см. ниже) покажет одно и то

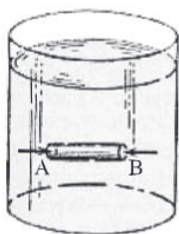


Рис. 9.6. Так как горизонтальный цилиндр AB находится в равновесии, то давления в точках A и B равны

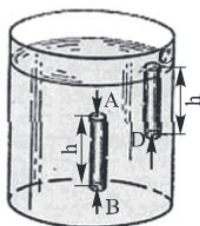


Рис. 9.7. Разность сил давления в точках B и A уравнивает силу тяжести, действующую на цилиндр AB

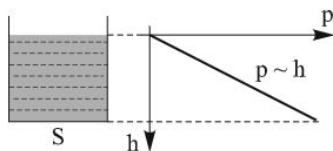


Рис. 9.8. Давление в жидкости пропорционально глубине

же значение, то есть на одной и той же поверхности уровня мы увидим, что его показание не изменяется: $P_A = P_B$ (см. рис. 9.6).

Поскольку проекция силы тяжести на горизонтальное направление равна нулю, вдоль горизонтальной оси действуют только силы давления на основания цилиндра. Горизонтальные плоскости — это поверхности равного давления. Их иногда называют поверхностями уровня. Свободная поверхность жидкости есть одна из поверхностей уровня. Давление во всех ее точках одинаково. В открытом сосуде оно равно атмосферному давлению.

Но на разных уровнях давление неодинаково и зависит от глубины погружения тела в жидкость h . Посмотрим на рис. 9.7, на котором показаны два элемента жидкости в виде тонких цилиндров, находящиеся в равновесии в жидкости на разной глубине.

Определим условия равновесия цилиндра. На цилиндр действуют несколько сил. Вдоль горизонтали сила давления на боковую поверхность дает вертикальную составляющую, равную нулю. По вертикали действуют три силы: сила, действующая на верхнее основание, направленная вниз и равная $P_A S$ (здесь S — площадь основания); сила, действующая на нижнее основания, направленная вверх и равная $P_B S$; сила тяжести, действующая на жидкость в объеме, направленная вниз. Объем цилиндра равен Sh , а его вес — $\rho g Sh$, где ρ и g — плотность жидкости и ускорение силы тяжести соответственно. Предполагается, что вариациями плотности для жидкостей (или газов) можно пренебречь. В равновесии векторная сумма этих трех сил равна нулю, отсюда получим, что $\Delta P = P_A - P_B = \rho gh$. Таким образом, разность давлений в двух точках жидкости равна весу столба жидкости с площадью поперечного сечения, равной единице, и с высотой, равной разности глубин погружения точек.

Для цилиндрического объема жидкости с поверхностями C и D давление на верхнее основание равно внешнему (в частности, атмосферному). Поэтому $\Delta P = P_D - P_0$. Значит, $P_D = P_0 + \rho gh$. Величина P_0 является одинаковой для всех точек объема жидкости, поэтому можно сказать, что давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, передается всем точкам этой жидкости и по всем направлениям *одинаково*. Это и есть закон Паскаля, рассмотренный выше.

Между 1651 и 1654 гг. Паскаль написал свои замечательные «Трактаты о равновесии жидкостей и о весе массы воздуха», опубликованные уже после его смерти, в 1663 году. Там открытый им закон о зависимости давления жидкости от высоты он применил к гидравлическому прессу, идея которого высказывалась еще Бенедетти и Стевином: «Сосуд, наполненный водой, является новым механи-

ческим инструментом, то есть новым механизмом для увеличения сил в желаемой степени» (Pascal B. Trattato sull'equilibrio del liquid! Torino, 1958. P. 39). (Есть русский перевод в сборнике «Начала гидростатики». М.–Л., 1933.). И дальше в своем «Трактате» Паскаль пишет: «...Ясно, что сместить на один дюйм сто фунтов воды — все равно что сместить на сто дюймов один фунт воды» (там же, р. 40, 42). Так находит применение одно из основных свойств жидкостей, благодаря которому они используются во многих технических устройствах, — их несжимаемость. Давление жидкости в гидравлических системах используется подобно тому, как металлический прут может служить рычагом для выигрыша в силе. Способность жидкости увеличивать силу подобие рычага можно увидеть на примере простого гидравлического пресса. Он представляет собой несложную машину с двумя поршнями, которые находятся в цилиндрах, (малом и большом), соединенных между собой при помощи трубы. Цилиндры пресса заполняются маслянистой жидкостью. Важно помнить, что в такой полностью закрытой системе давление, в силу закона Паскаля, везде одинаковое значение. Так что, когда к малому поршню прилагается какая-либо сила, в большом поршне создается еще большая сила, потому что одна и та же сила распределяется на большую площадь.

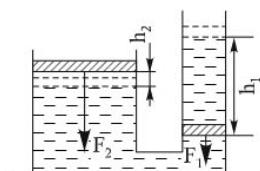


Рис. 9.9. Перемещение поршней обратно пропорционально их площадям, а значит, и силам, на них действующим

Гидравлический пресс является преобразователем силы, подобно рассмотренным ранее простым машинам; его можно назвать гидравлической простой машиной.

Гидравлический пресс, по сути, представляет собой сообщающиеся сосуды разного сечения. Сообщающиеся сосуды — это сосуды, соединенные между собой (трубкой) или имеющие общее дно. Такие сосуды применялись еще в Древней Греции, например, при устройстве фонтанов. В восемнадцатом веке

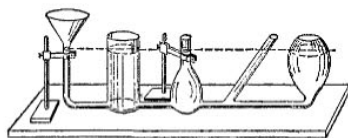


Рис. 9.10

сообщающиеся сосуды стали прибором для исследования поведения жидкости (рис. 9.10). Возьмем ряд сосудов различной формы, соединенных в нижней части трубками. Если наливать жидкость в один из них, жидкость перетечет по трубкам в остальные сосуды и установится во всех сосудах на одном уровне (рис. 9.10). Во всех сообщающихся сосудах вода стоит на одном уровне.

Рассмотрим для простоты два сосуда. Учтем, что давление на свободных поверхностях жидкости в сосудах одно и то же; оно равно атмосферному давлению. Давление жидкости в I сосуде определяется соотношением $p_1 = \rho gh_1$, где h_1 — высота столба жидкости в I сосуде. Давление жидкости во II сосуде $p_2 = \rho gh_2$, где h_2 — высота столба во II сосуде. Так как система открытая, то давления равны и $p_1 = p_2$. Откуда имеем $h_1 = h_2$. Таким образом, все свободные поверхности принадлежат одной и той же поверхности уровня и, следовательно, должны находиться в одной горизонтальной плоскости. Закон этот первым опубликовал Блез Паскаль, и он носит его имя. Иногда его приписывают Э. Торричелли.

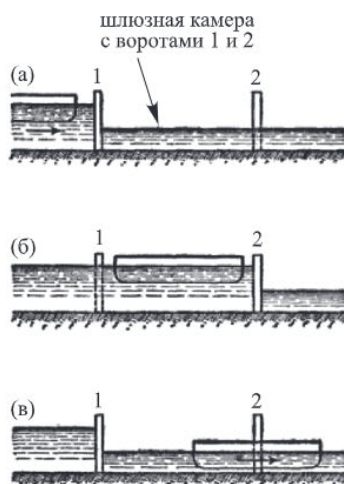


Рис. 9.11. Схема работы шлюза:
(а)–(в) последовательность
открытия шлюзовых ворот

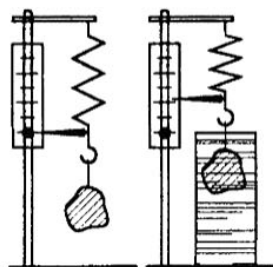


Рис. 9.12. Демонстрация
закона Архимеда

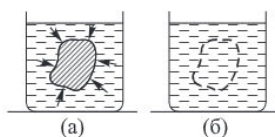


Рис. 9.13. (а) Тело находится в жидкости; (б) тело
заменено жидкостью

глубокой древности. Шлюзы рек и каналов также работают по принципу сообщающихся сосудов. В смежных шлюзовых камерах, отделенных друг от друга шлюзовыми воротами, вода стоит на разных уровнях. Под воротами проходит канал, соединяющий обе камеры; его можно открывать и закрывать. При открывании канала обе камеры превращаются в сообщающиеся сосуды, и вода, перетекая из камеры с более высоким уровнем в камеру с более низким, устанавливается на одном уровне в обеих камерах. Тогда можно открыть шлюзовые ворота и перевести судно из одной камеры в другую. Таким образом, при помощи шлюзов перемещают судно из одного водоема в другой, находящийся на другом уровне. В случае большой разницы в уровнях водоемов устраивают целый ряд шлюзовых камер, работающих одна за другой последовательно.

Возвращаясь к закону Архимеда, можно понять, как появляется выталкивающая сила, действующая на погруженное тело. Возникновение выталкивающей силы объясняется тем, что нижние слои жидкости сжаты сильнее, чем верхние, и поэтому давление на нижнюю часть тела больше, чем на его верхнюю часть.

Действительно, в жидкость, как и на все тела на Земле, действует сила тяжести. Поэтому каждый слой жидкости, находящейся в сосуде, своим весом давит на другие слои, и это давление, по закону Паскаля, передается во всех направлениях. То есть внутри жидкости существует давление, и на одном и том же уровне оно одинаково во всех направлениях. С глубиной давление жидкости возрастает.

Простой опыт демонстрирует сказанное. Если на крючок динамометра подвесить тело и отметить его показания, а затем тело опустить в воду и снова отметить показания, то увидим уменьшение показаний динамометра (см. рис. 9.13, а, б). Значит, на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная показаниям динамометра и направленная вертикально вверх. Значение этой силы и установил Архимед.

Попробуем вывести его закон. На рис. 9.13, а изображено тело, помещенное в жидкость. На это тело со стороны жидкости действует некая сила гидростатического давления. Для нахождения этой силы вместо вычисления сложных интегралов проведем мысленный эксперимент: уберем тело и рассмотрим жидкость в объеме V , который занимала

погруженная часть тела (б). На эту жидкость действуют сила тяжести $mg = \rho Vg$ и сила гидростатического давления F . Выделенный объем находится в равновесии, следовательно, силы, действующие на жидкость в этом объеме, равны: $F = \rho Vg$. Мы нашли силу, действующую на поверхность жидкости, заполняющей объем V . Но поверхность тела, погруженного в жидкость, совпадает с поверхностью жидкости в нашем мысленном эксперименте, следовательно, найденное выражение и есть «выталкивающая» сила — сила Архимеда $F_A = \rho gV$. Это равенство и носит название «закон Архимеда». Он справедлив также и в газах. Закон формулируется следующим образом: *на тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу того количества жидкости, которое вытеснено погруженной частью тела.*

Сила Архимеда обеспечивает плавание тел.

Рассмотрим условия, обеспечивающие плавание. Возможны следующие три случая:

$F_g > F_A$ — тело тонет (F_g равна весу тела);

$F_g = F_A$ — тело плавает в жидкости;

$F_g < F_A$ — тело всплывает до тех пор, пока не начнет плавать.

Другая формулировка (где ρ_t — плотность тела, ρ_s — плотность среды, в которую оно погружено):

$\rho_t > \rho_s$ — тело тонет;

$\rho_t = \rho_s$ — тело плавает в жидкости;

$\rho_t < \rho_s$ — тело всплывает до тех пор, пока не начнет плавать.

Рассмотренная выше картина выталкивания объясняет, почему судно, сделанное из стали, которая значительно плотнее воды, остается на плаву. Дело в том, что объем вытесненной судном воды равен объему погруженной в воду стали плюс объему воздуха, содержащегося внутри корпуса судна ниже ватерлинии.

Если усреднить плотность оболочки корпуса и воздуха внутри нее, получится, что плотность судна (как физического тела) меньше плотности воды, поэтому выталкивающая сила, действующая на него в результате направленных вверх импульсов удара молекул воды, оказывается выше гравитационной силы притяжения Земли, тянущей судно ко дну, — и корабль плавает.

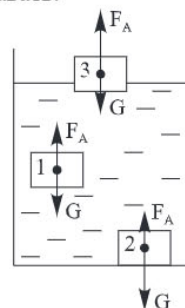


Рис. 9.14.
К вопросу
о плавании тел

Сказанное относится и к человеку в воде. Погружение в воду на каждый 1 м дает увеличение гидростатического давления на $0,1 \text{ кг/см}^2$. Например, пловец, погрузившийся под воду на 5 м, испытывает давление $0,5 \text{ кг/см}^2$ (сверхатмосферное). Когда тело пловца погружено в воду и неподвижно, на него действуют только сила тяжести тела и выталкивающая сила воды. Сила тяжести постоянна по величине и приложена к общему центру тяжести тела. При этом центр тяжести может смещаться при изменении позы пловца. Выталкивающая сила возникает по закону Архимеда: обусловлена разностью гидростатического давления на нижнюю и верхнюю поверхность тела, погруженного в воду, и всегда направлена вверх. По величине она равна весу воды в объеме погруженной части тела. Плаваемость человека зависит и от вдоха. При глубоком вдохе пловца, как правило, обладают положительной плаваемостью (объем увеличивается), а при полном выдохе — отрицательной. Плаваемость тела в более плотной морской воде повышается. Например, в Мертвом море плотность воды так велика, что человек не тонет, может лежать на поверхности воды и читать газету.

Измерение давления и единицы давления. Существует множество приборов для измерения давления. Для измерения атмосферного давления такие приборы называются барометрами.

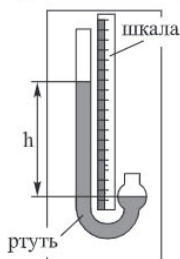


Рис. 9.15

Жидкостные барометры с непосредственным отсчетом столба жидкости. На рис. 9.15 показан ртутный барометр. Он состоит из заполненной ртутью U-образной стеклянной трубки, один конец которой запаян, а на другом находится открытый резервуар с ртутью. Барометр имеет шкалу с миллиметровыми делениями, по которой непосредственно измеряют атмосферное давление в миллиметрах ртутного столба. Оно численно равно высоте столба ртути между ее уровнями в закрытом и открытом коленях барометра. Разница в диаметрах левой и правой частей трубки не влияет на результат измерения. Не обязательно также заполнять трубку жидкостью до уровня, точно совпадающего с нулевой отметкой на шкале, так как при отсчете показаний учитывается только разность уровней по количеству делений шкалы. Такие барометры весьма точные, однако они громоздки, хрупки, а пары ртути вредны для здоровья людей.

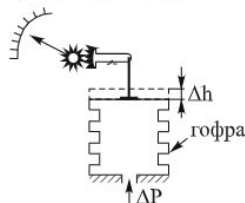


Рис. 9.16. Схема барометра-анероида

В анероиде жидкости нет (греч. «анероид» — безводный). Принцип действия: уравнивание измеряемого давления силами упругих деформаций чувствительных элементов (трубчатая пружина — трубка Бурдона, мембрана, сильфон). Он показывает атмосферное давление, действующее на гофрированную тонкостенную металлическую коробку, в которой создано разрежение. При понижении атмосферного давления коробка слегка расширяется, а при повышении — сжимается и воздействует на прикрепленную к ней пружину.

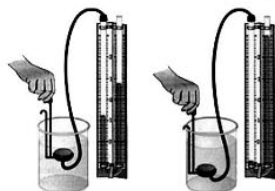


Рис. 9.17

Внутри жидкости давление измеряют *жидкостным манометром*. Принцип его действия такой же, как анероида (см. рис. 9.17). Чем глубже погружают в жидкость коробочку, тем больше становится разность высот столбов жидкости в коленях манометра, тем, следовательно, и большее давление производит жидкость. Если установить коробочку прибора на какой-нибудь глубине внутри жидкости и поворачивать ее пленкой вверх, вбок и вниз, то показания манометра

при этом не будут меняться. Так и должно быть, ведь на одном и том же уровне внутри жидкости давление по всем направлениям одинаково.

Существует много *единиц измерения давления*. Официально признанной системой единиц измерений является СИ. Единицей измерения давления в ней является Паскаль, Па (Pa) — $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Производные от этой единицы — $1 \text{ кПа} = 1000 \text{ Па}$ и $1 \text{ МПа} = 1\,000\,000 \text{ Па}$. В различных отраслях техники используются следующие единицы: миллиметр ртутного столба (мм рт. ст. или Торр), физическая атмосфера (атм.), техническая атмосфера (1 ат. = 1 кгс/кв. см), бар. Соотношения между этими единицами приведены в таблице 2.

Таблица 2

Величина	МПа	Бар	мм рт. ст.	атм.
1 МПа	1	10	7500,7	9,8692
1 бар	0,1	1	750,07	0,9869
1 мм рт. ст.	133,32 Па	0,00133	1	0,00136
1 атм	0,10133	1,0133	760	1
1 кгс/см ²	0,098066	0,98066	735,6	0,96784
1 PSI	6,8946 кПа	0,068946	51,715	0,068045

Значение давления может отсчитываться от 0 (абсолютное давление) или от атмосферного (избыточное давление).

Выше мы рассматривали жидкости и упоминали воздух. Действительно, основные понятия и законы, полученные для жидкости, справедливы и для газов. Жидкости и газы — два из четырех агрегатных состояний или фаз вещества. Еще два — это твердые тела, рассматривавшиеся ранее, и плазма. Жидкости, в отличие от твердых тел, не сопротивляются напряжениям сдвига и потому не сохраняют определенную форму. Они принимают форму сосуда, в котором находятся. Но, как и твердые тела, практически не поддаются сжатию, для их сжатия требуется большая сила. Газы не обладают ни определенной формой, ни определенным объемом. Они заполняют, в отличие от жидкости, весь объем предоставленного ему сосуда, в котором находятся. Обе рассматриваемые фазы способны течь. Провести строгую грань между фазами порой довольно трудно. Куда отнести, например, густой мед? С изменением внешних условий, например температуры, вещество из одной фазы может переходить в другую. Типичный пример — вода.



Рис. 9.18. Изменение агрегатного состояния вещества в различных процессах

На поверхность твердого тела, погруженного в газ, действуют силы давления газа, равнодействующая которых направлена вверх. Это выталкивающая сила газа. Точно так же, как это сделано выше для жидкости, можно доказать, что выталкивающая сила равна весу газа в объеме погруженного в газ тела. Возникновение этой силы объясняется так же, как и для жидкостей: нижние слои газа сжаты сильнее, чем верхние, и поэтому давление на нижнюю часть тела больше, чем на его верхнюю часть.

Обнаружить существование выталкивающей силы в газе можно в следующем опыте. Поместим под колокол воздушного насоса рычаг, на одном конце которого укреплен большой полый стеклянный шар, а на другом — уравновешивающая его маленькая гирька (рис. 9.19). Откачивая воздух из колокола, увидим, что равновесие рычага нарушится и шар начнет опускаться. Это объясняется тем, что при откачке воздуха устраняется выталкивающая сила: на тело

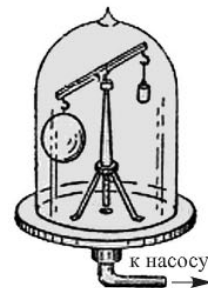


Рис. 9.19. При откачивании воздуха из-под колокола шар перетягивает гирьку

в пустоте действует только сила тяжести. Так как для большого шара выталкивающая сила больше, чем для гирьки, то после удаления воздуха шар перевешивает гирьку. Выталкивающую силу воздуха приходится принимать во внимание при точном определении массы тела путем взвешивания, вводя соответствующую поправку как для взвешиваемого тела, так и для гирек.

Если архимедова сила окажется больше силы тяжести, действующей на тело, то тело взлетит. На этом принципе основано воздухоплавание.

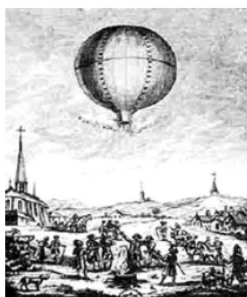


Рис. 9.20. Первый полет монгольфьера 5 июня 1783 г. (Википедия)

Воздухоплавание имеет историю намного менее короткую, чем плавание судов. Но история его не менее увлекательна. В июне 1783 года братья Жозеф и Жак Монгольфье подняли с площади Аннонэ воздушный шар, наполненный теплым воздухом. Когда шар надулся от теплого воздуха до размера трехэтажного дома, все увидели на нем надпись: «AD ASTRA» — по латыни «К звездам». Полет произвел на зрителей большое впечатление, и вскоре весть об этом эксперименте облетела всю Европу. 1 декабря того же года Физики Жак Шарль (1746–1823) и Франсуа Робер (1737–1819) в Тюильри в присутствии 400 000 зрителей предприняли первый полет в гондole воздушного шара (рис. 9.20), наполненного водородом.

Чтобы воздушный шар поднимался выше, его надо наполнить газом, плотность которого меньше, чем у воздуха. Это может быть водород, гелий или нагретый воздух. Поскольку бумажное покрытие не могло удержать водород, воздушный шар был изготовлен из тонкой шелковой ткани, покрытой латексом. Водород получили, воздействуя серной кислотой на железные опилки. Чтобы полностью надуть шар диаметром 4 м, потребовалось несколько дней и было израсходовано 227 кг кислоты и 454 кг железа. Воздушный шар приземлился в 28 км от места старта. Он так напугал местных жителей, что те разорвали аэростат в клочья.

Для того чтобы определить, какой груз может поднять воздушный шар, надо знать его подъемную силу. Подъемная сила воздушного шара равна разности между архимедовой силой и действующей на шар силой тяжести:

$$F_{\text{под}} = F_A - (F_{\text{оболочки}} + F_{\text{газа внутри}} + F_{\text{груза}}).$$

Чем меньше плотность газа, заполняющего воздушный шар данного объема, тем меньше действующая на него сила тяжести и потому тем больше возникающая подъемная сила. При нагревании воздуха от 0 до 100 градусов Цельсия его плотность уменьшается только в 1,37 раз. Поэтому подъемная сила шаров, заполненных теплым воздухом, оказывается небольшой. Плотность же водорода в 14 раз меньше плотности воздуха, и подъемная сила шара, наполненного водородом, более чем в три раза превышает подъемную силу нагретого воздуха того же объема. Водород, однако, горит и образует с воздухом легко воспламеняющуюся смесь. Негорючим и одновременно легким газом является гелий.

Подобно расширению действия закона Архимеда на газы, можно для газов распространить и закон Паскаля. Закон Паскаля утверждает, что производимое внешними силами давление в какое-то место газа передается по газу без измене-

ния в любую точку. Об этом Паскаль писал в упомянутом выше «Трактате». Закон Паскаля означает, что если, например, надавить на газ с силой в 10 Н и площадь этого давления будет 10 см², то давление в месте приложения силы увеличится на $p = F/S = 10 \text{ Н}/0,001 \text{ м}^2 = 10\,000 \text{ Па}$ и на эту величину увеличится давление во всех местах газа. То есть давление передается без изменений в любую точку газа (см. рис. 9.21).

Интересной страницей в истории исследования газов была проблема пустоты (вакуума). Запрещение пустоты в аристотелевской физике связано с тем, что скорость движущегося тела в пустоте должна быть бесконечной, а там, где появляется такого рода бесконечность, кончается всякая возможность познания. В духе вышесказанного средневековый Парижский университет подошел к христианизации положения «Природа не терпит пустоты». В 1277 году богословы Сорбонны, возглавляемые епископом Парижа Э. Тампье, пришли к заключению, что отрицание всякой возможности существования вакуума «ограничило бы всемогущество Божие». Специальным постановлением пустота была отнесена к категории *causus divini* — явлений, не существующих в природе, но возможных для Бога. По статусу Парижского университета студенты давали клятву строго следовать догмам в вопросах, затрагивающих откровения.

Схоластика в вопросах о возможности существования пустоты господствовала до конца эпохи Возрождения. «Всякое пустое пространство Бог наполняет своей сущностью, устрояя всякое ничто», — так высказывался ученый-теолог Афанасий Кирхер (1602–1680), современник Торричелли и Герики. Но жизнь заставляла усомниться в отсутствии пустоты. При сооружении фонтанов во Флоренции обнаружилось, что засасываемая насосами вода не желает подниматься выше 34 футов (больше 10 метров, в тогдашних мерах — 18 локтей). На это обратили внимание итальянские колодезники. Вот как про этот рассказывает персонаж «Бесед» Галилея: «Я видел, сказал один собеседник Сагрето, что однажды колодец, где помещен был насос для накачки воды кем-то, кто таким образом думал воду доставать в большем количестве или с меньшим трудом, чем просто ведрами. Насос обладал поршнем с верхним клапаном, так что поднималась вода всасыванием, а никак не давлением, как производится это в насосе с нижним клапаном. До того периода времени, пока был колодец до определенной высоты наполнен водою, насос подавал и всасывал ее отлично, но как только она опускалась чуть ниже уровня, он переставал работать. Первый раз, заметив такой случай, я подумал, что испорчен насос, и для починки позвал мастера. Однако он заявил, что было все исправно, просто опустилась вода до той глубины, с которой не может быть вверх поднята. Он при этом прибавил, что никакими аппаратами, поднимающими всасыванием воду, невозможно ее поднять выше, нежели восемнадцать локтей. Будут ли узкими или широкими насосы — остается предельная высота без изменений». Недоумевающие строители обратились за помощью к престарелому Галилею, который шуточно ответил, что, вероятно, природа перестает бояться пустоты на высоте более 34 футов, но все же предложил разобраться в этом своим ученикам — Торричелли (1608–1647) и Вивини

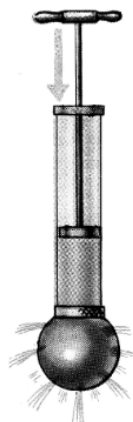


Рис. 9.21. Демонстрация действия закона Паскаля для газов

(1622–1703). Обобщая результаты исследований, Торричелли решительно порвал со схоластическими рассуждениями о «боязни пустоты», выполнив свой знаменитый опыт с ртутью (рис. 9.22). Наличие столба ртути в трубке является следствием давления атмосферы. Эти мысли Торричелли со всей ясностью изложил в письме к Риччи, написанном в 1644 году: «...Тщетна была бы попытка приписать именно пустоте действие, которое явно происходит от другой причины.... На поверхность жидкости, находящейся в чашке, действуют своей тяжестью

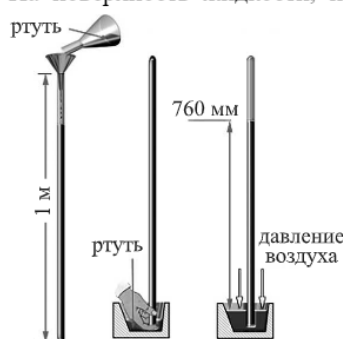


Рис. 9.22. Схема проведения опыта Эванджелиста Торричелли с ртутью



Рис. 9.23. Торричелли изобретает барометр (со старинного рисунка)

50 миль воздуха. Что же удивительного, если ртуть, не имея ни стремления, ни отвращения находиться в стеклянном сосуде, проникает туда и поднимается настолько, чтобы уравновесить тяжесть наружного воздуха, который ее выталкивает». В своем сочинении «Opera geometrica» (Флоренция, 1644) Торричелли сделал вывод: «Мы погружены на дно безбрежного моря воздушной стихии, которая, как известно из неоспоримых опытов, имеет вес, причем он наибольший вблизи поверхности Земли, где он составляет одну четырехсотую часть веса воды». Описание опыта Торричелли с трубкой, наполненной ртутью, приводится во всех учебниках по физике. Этот опыт прост и нагляден (рис. 9.22).

А значит, где-то там, в недостижимой высоте, воздуха может и не быть, там пусто. С тех пор безвоздушное пространство над свободной поверхностью жидкости в герметически закрытом сверху сосуде именуется «торричеллиевой пустотой».

Но «пустота» победы еще не одержала. Борьба против учения о боязни пустоты не закончилась опытом Торричелли. Гипотеза о силах, удерживающих ртутный столб, жила еще долго после смерти Торричелли. Уж очень эта «пустота» не укладывалась в здравый смысл. Несмотря на простоту и убедительность описанных опытов, для окончательного изгнания «боязни пустоты» не хватало еще одного существенного элемента. А все дело в «торричеллиевой пустоте». Она смущала ученых, которые резонно считали, что эта пустота как раз и обладает свойствами удерживать столбик жидкости. Последний тянется в пустоту под действием каких-то неизвестных еще факторов. Неизвестно каких, но долженствующих быть. А то что же еще может удерживать тяжелую ртуть? Таковы были основы умозаключений сторонников *homo vasculi* (боязни пустоты). Чтобы разбить аргументацию сторонников пресловутой боязни пустоты, нужно было получить «торричеллиеву пустоту» каким-то другим путем и показать, что она не имеет приписываемых ей свойств. Только тогда есть надежда, что поверят. Это было сделано Герике (1602–1686) в нескольких знаменитых опытах. Герике был изобретательным экспериментатором и, узнав в 1650 году об открытии Торричелли, загорелся желанием лично убедиться в возможности образования пустоты. Для этой цели он заполнил вин-

ную бочку водой, подсоединил к ней насос и попытался выкачать жидкость. Как только началась откачка, ободы треснули. Опыт с более прочной бочкой закончился тем же.

Третий опыт Герики провел уже с медным сосудом. Постепенно выдвигаемый из насоса поршень шел сначала легко, потом все труднее, а затем, по словам самого Герики, «внезапно, ко всеобщему ужасу, шар со страшным шумом разлетелся на мелкие куски, как если бы он был сброшен с высочайшей башни». Результатом этого эксперимента стало не только подтверждение существования вакуума, открытого Торричелли, но и изобретение воздушного насоса. Ну и, конечно, нельзя не упомянуть опыт со знаменитыми «магдебургскими полушариями».

Вот как сам Герике описывает этот опыт: «Я заказал два медных полушария приблизительно в $\frac{3}{4}$ магдебургских локтя в диаметре, или, точнее, — так как мастера не очень-то заботятся о строгом соблюдении заказанных размеров, — в шестьдесят семь сотых локтя. Обе половины были совершенно одинаковы. Одна половина была снабжена краном, или, скорее, клапаном, посредством которого мог извлекаться внутренний воздух из шара. Кроме того, на обоих полушариях были железные кольца с пропущенными через них веревками для впрягания лошадей. Затем я заказал кожаное кольцо, пропитанное раствором воска в терпентине, чтобы оно не пропускало воздуха. Это кольцо было положено между полушариями и из них был быстро выкачан воздух. При этом полушария оказались прижатыми к кожаному кольцу настолько сильно, что шестнадцать лошадей либо вовсе не могли разорвать их, либо разрывали с великим трудом. Когда разрыв происходил, то слышался звук вроде ружейного выстрела. Когда в пустоту полушарий вводился воздух, то разнять их было очень легко».

Такой опыт выполнялся и в камеральных условиях, в школьных классах (см. рис. 9.24).

Если следовать историческим фактам, то следует отметить, что свой знаменитый впоследствии опыт Торричелли поручил осуществить Вивiani. Торричелли продумал опыт, Винченцо Вивiani впервые опрокинул трубочку в чашу. В постановку опыта Торричелли он вложил почти все свое состояние. Мало того, был в нем главным действующим лицом. Фактически Вивiani, а не Торричелли наглядно продемонстрировал, поигрывая стеклянной трубочкой со ртутью, существование атмосферного давления. Заслуга же Торричелли состояла в его теоретических прогнозах и толковом обосновании результатов проведенного Вивiani эксперимента с выходом на «торричеллиеву пустоту».

Опыт Торричелли стал известен всей Европе благодаря уже неоднократно упоминавшемуся французскому математику, физiku и философу Марену Мерсенну (1588–1648): в 1644 году Риччи написал ему о нем, и вскоре сообщение о результатах Торричелли стало сенсацией в кругу французских ученых, особенно оно заинтересовало Паскаля. С помощью «трубки Торричелли» в 1664 году Паскаль доказал существование давления атмосферы. Это было очень важное открытие, потому что до Торричелли и Паскаля никто не знал о действительном

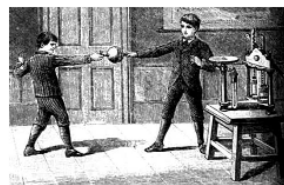


Рис. 9.24. Опыт с «магдебургскими полушариями» в классе

существовании атмосферного давления и связи его с погодой. Декарт (1595–1650) сразу же предложил идею измерения атмосферного давления на различных высотах, которая также была реализована Паскалем в 1648 году. По просьбе Паскаля его зять Флорен Перье провел серию экспериментов у горы Пюи-де-Дом в Клермоне и описал результаты (разница в высоте столбика ртути на вершине и у подножия горы составила 3 дюйма 1 1/2 линии) в письме Блезу. В Париже на башне Сен-Жак (высота 52 м) опыты повторяет уже сам Паскаль, полностью подтвердив данные Перье. В честь этих открытий на башне был установлен памятник ученому. Было показано, что атмосферное давление уменьшается с увеличением высоты подъема над Землей. В «Рассказе о великом эксперименте равновесия жидкостей» (1648) Паскаль привел следствия, вытекающие из этого опыта: «теперь есть возможность узнать, находятся ли два места на одном уровне, то есть одинаково ли они удалены от центра земли, или которое из них расположено выше, как бы ни были они далеки друг от друга». Паскаль отмечал также, что все явления, приписываемые ранее «боязни пустоты», на самом деле следствия давления воздуха. Обобщая полученные результаты, Паскаль сделал вывод, что давление воздуха есть частный случай равновесия жидкостей и давления внутри них. Паскаль подтвердил предположение Торричелли о существовании атмосферного давления.

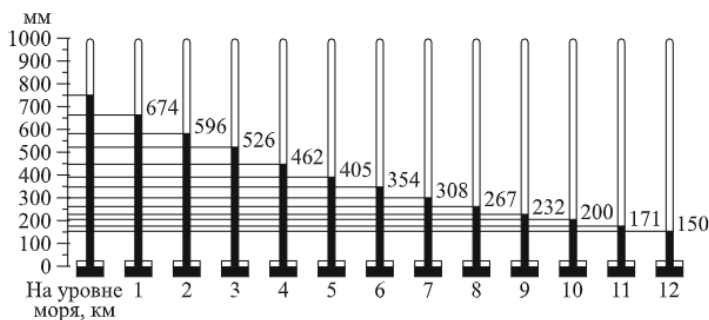


Рис. 9.25. Высота столба ртути в барометре на различных высотах

С высотой давление падает. Это объясняется тем, что с увеличением высоты толщина сжимающего слоя атмосферы уменьшается. Однако в отличие от давления в жидкостях, в которых оно линейно зависит от расстояния, изменение атмосферного давления происходит гораздо быстрее, что объясняется быстрым уменьшением плотности атмосферы с увеличением высоты. А еще дальше от Земли должна быть пустота. Об этом докладывал еще Кеплер.

Результаты работ, оконченных Паскалем еще в 1653 году, появились в печати только в 1663 году. В заключении, которое завершало его сочинение, Паскаль пишет, что эксперименты являются тем истинным учителем, за которым надо следовать в физике, и что все толкования Аристотеля и его комментаторов не могут опровергнуть результатов «опыта на горе».

Но здравый смысл вопрошал: «если есть пустота, то как же могут взаимодействовать тела»? Поэтому опять возобладал пресловутый здравый смысл. В соответствии со здравым смыслом и логикой в мире не может быть пустоты. Эта мысль Аристотеля продолжала оставаться господствующей. А если пустоты

нет, то что же есть? И принимали, что имеется некая невидимая и невесомая среда, находящаяся между частицами, а также пронизывающая безграничное пространство Вселенной. Аристотель назвал эту среду эфиром. А так как его философия победила, то именно эфир продолжал, как и в древности, доминировать как среда, заполняющая Мироздание и, естественно, пронизывающая любое вещество. Античность завещала эфир Средним векам, и в европейской науке эфир продолжает будоражить умы ученых. Об этом мы поговорим в дальнейшем.

Перед тем как перейти к рассказу о законах движущейся жидкости, расскажем немного о явлении, которое весьма интересовало ученых с давних времен.

Пытливые люди наблюдательны. Наблюдая за жидкостью, они обнаружили ряд интересных эффектов, интересовавших ученых с давних времен. Опишем эти эффекты.

Если стеклянная трубка, столь же узкая внутри, как волос (от лат. *capillus*), погружается в воду, то жидкость поднимается внутри трубки до высоты большей, чем снаружи. Эффект не мал: высота поднятия около 3 см в трубке с каналом в 1 мм. Это обнаруженное кажущееся нарушение законов гидростатики было достижением науки XVII века.

Первооткрывателем капиллярных явлений считается Леонардо да Винчи. Однако первые аккуратные наблюдения капиллярных явлений на трубках и стеклянных пластинках были проделаны Фрэнсисом Хоксби в 1709 году. Но лишь в 1804 году Томас Юнг обосновал теорию капиллярных явлений на принципе поверхностного натяжения, к рассмотрению которого мы и переходим.

Поверхностное натяжение. Отличительной особенностью жидкости является наличие у нее свободной поверхности. Эта особенность жидкости приводит к эффекту так называемого поверхностного натяжения. Одним из следствий этого эффекта является то, что для увеличения площади поверхности жидкости — ее растяжения — нужно проделать механическую работу по преодолению сил поверхностного натяжения. Следовательно, если жидкость оставить в покое, она стремится принять форму, при которой площадь ее поверхности окажется минимальной. Простой опыт демонстрирует наличие силы поверхностного натяжения. Возьмите стакан с водой, скрепку и маленький листок тонкой бумаги. Опустите листок на воду, чтобы он плавал, сверху на него положите скрепку. После этого аккуратно опустите листок вниз в воду, не дотрагиваясь до скрепки. Бумага утонет, а скрепка останется плавать на поверхности. Скрепка тяжелее воды, но поверхностное натяжение не дает ей утонуть. В жизни явление поверхностного натяжения встречается, например, на траве в виде капель росы; на кухне, когда на горячую сковороду попадает вода или масло; мыльный пузырь тоже результат действия силы поверхностного натяжения.

Если в мыльный раствор опустить проволочную рамку, одна из сторон которой подвижна, то вся она затянется пленкой жидкости.

Силы поверхностного натяжения стремятся сократить поверхность пленки. Для равновесия подвижной стороны рамки к ней нужно приложить внешнюю силу $F_{\text{вн}} = F$.

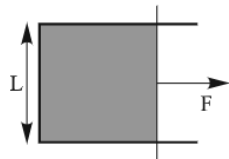


Рис. 9.26. Подвижная сторона проволочной рамки в равновесии находится под действием внешней силы F и результирующей силы поверхностного натяжения

Если под действием этой силы перекладина переместится на Δx , то будет произведена работа $\Delta A_{\text{вн}} = F_{\text{вн}}\Delta x = \gamma\Delta S$, где $\Delta S = 2L\Delta x$ — приращение площади поверхности обеих сторон мыльной пленки. Так как модули сил $F_{\text{вн}}$ и $F_{\text{н}}$ одинаковы, можно записать, $F_{\text{н}}\Delta x = \gamma 2L\Delta x$, где γ — так называемый коэффициент поверхностного натяжения. Отсюда $\gamma = F_{\text{н}}/2L$. Таким образом, коэффициент поверхностного натяжения γ может быть определен как *модуль силы поверхностного натяжения, действующей на единицу длины линии, ограничивающей поверхность*. В таблице 3 приведены значения γ для воды при разных температурах. Следует отметить довольно слабую зависимость γ от температуры.

Таблица 3. Поверхностное натяжение воды в контакте с воздухом в зависимости от температуры 0–100 °С

Температура (°С)	Поверхностное натяжение, γ , 10^{-2} (Н/м)
0	7,56
5	7,49
10	7,42
20	7,28
30	7,12
40	6,96
50	6,79
60	6,62
70	6,44
80	6,26
90	6,08
100	5,89

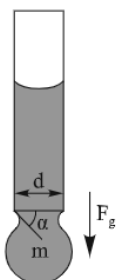


Рис. 9.27

Пример. Экспериментальное определение величины поверхностного натяжения.

На рис. 9.27 капля задерживается на конце трубки за счет силы поверхностного натяжения. Сила эта пропорциональна длине границы между жидкостью и трубкой и записывается следующим образом: $F = 2\pi R\gamma$, где γ — коэффициент поверхностного натяжения, измеряемый в ньютонах на метр, Н/м, а R — радиус трубки.

Капля не отрывается, очевидно, пока эта сила способна нейтрализовать силу тяжести, действующую на каплю в вертикальной проекции, то есть $F_g = mg = 2\pi R\gamma \sin \alpha$.

При увеличении массы капли, то есть при ее росте, угол α будет стремиться к 90° , и, в состоянии равновесия сил, формула примет вид $mg = 2\pi R\gamma$.

Отсюда получим возможность определить опытным путем величину коэффициента поверхностного натяжения: $\gamma = mg/2\pi R$.

Надо учесть, что место отрыва обычно немного ниже конца трубки и отрыв происходит в месте формирования так называемой шейки, где диаметр несколько меньше, чем диаметр трубки, но там, где не требуется очень большая точность, этим обычно пренебрегают.

Опыт Плато. Жозеф Антуан Фердинанд Плато (1801–1883), профессор Гентского университета по кафедре физики и анатомии, в течение жизни занимался множеством различных проблем, в частности, изобрел стробоскоп. По-видимому, эти проблемы считал важными, чем поставленный им опыт с «невесомой» каплей. Но история рассудила иначе и прочно соединила его имя именно с этим опытом. Опыт широко известный, классический, демонстрируемый почти во всех лекционных курсах физики. В прозрачный сосуд наливается водный раствор спирта и затем туда с помощью пипетки вводится капля масла. Концентрацию раствора можно сделать такой, чтобы плотность раствора и масла была одинаковой. В этом случае капля масла, не растворяющаяся в спиртовом растворе, вне зависимости от ее объема приобретает форму сферы и повиснет в растворе. Сферическая форма капли в опыте Плато объясняется тем, что вследствие равенства плотности вещества капли и среды сила тяготения, действующая на каплю, оказывается равной выталкивающей архимедовой силе. Таким образом, удастся исключить действие силы тяжести. При этом условия силами, определяющими поведение жидкости (масла), становятся силы поверхностного натяжения. В результате действия этих сил вместо пленки, растекающейся по поверхности раствора, масло собирается в каплю, имеющую правильную сферическую форму.

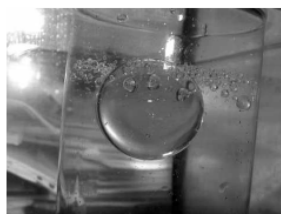


Рис. 9.28. Опыт Плато наглядно показывает, как под действием сил поверхностного натяжения жидкость превращается в шар

Поверхностное натяжение важно для питьевой воды. Чтобы это понять, необходимо ответить на вопрос о том, почему горячая вода отмывает грязь лучше, чем холодная? Это связано с тем, что с ростом температуры воды снижается ее поверхностное натяжение (см. таблицу 3). Чем ниже поверхностное натяжение воды, тем лучшим растворителем она является. Искусство водоподготовки состоит в том, чтобы снизить поверхностное натяжение воды до физиологической нормы без увеличения ее температуры, без добавления в нее кондиционеров и без нарушения других параметров воды.

Капиллярность. В жизни мы часто наблюдаем явление растекания жидкости по поверхности твердого тела, которое в физике получило название *смачивания*. Так, например, вода смачивает стекло, дерево, кожу и многие другие вещества. Если, однако, опустить в воду пластину, изготовленную не из стекла, а, например, из воска или парафина, то, вынув эту пластину из воды, мы найдем ее сухой. Это означает, что вода не смачивает воск и парафин. Вода не смачивает также все жирные поверхности. Несмачиваемость объясняется тем, что молекулы жидкости сильнее притягиваются друг к другу, чем к молекулам твердого тела. Когда жидкость не смачивает твердое тело, она не растекается по его поверхности тонкой пленкой, а собирается в круглые капельки. Такие капельки (или шарики) образует, например, ртуть на стекле. Не смачивается ртутью и чугун.

Явления смачивания и несмачивания учитывают и используют на практике. Мы вытираемся полотенцами, сделанными из ткани, смачиваемой водой. Хорошее смачивание необходимо при крашении и стирке, обработке фотографических материалов, нанесении лакокрасочных покрытий, склеивании различных материалов и т. д. Водоплавающие птицы смазывают при помощи клюва свои перья жиром, выделяемым особой железой. Поэтому их перья не смачиваются водой, а пух, находящийся под перьями, остается сухим. Благодаря этому птица не мерзнет в холодной воде и удерживается на ее поверхности.

Смачиванием обусловлено такое явление, как *капиллярность*. Заключается оно в том, что под действием молекулярных сил смачивающая жидкость поднимается вверх по очень тонким трубкам, называемым капиллярами. Латинское слово «капиллус» означает «волос». Отсюда и название тонких трубок — «капилляры». Их диаметр составляет миллиметр и менее.

Вот простой опыт, демонстрирующий явление капиллярности. Для нашего опыта возьмите два стакана. Один из них наполните водой и поставьте повыше. Другой стакан, пустой, поставьте ниже.

Опустите в стакан с водой конец полоски чистой материи, а ее второй конец — в нижний стакан. Вода, воспользовавшись узенькими промежутками между волокнами материи, начнет подниматься, а потом под действием силы тяжести будет стекать в нижний стакан. Полоска материи и играет роль очень простого насоса.

В природе капилляры встречаются довольно часто. Многие из окружающих нас тел имеют пористое строение: они пронизаны множеством мелких, иногда незаметных для глаз, капилляров. К таким телам относятся дерево, бумага, кожа, почва, ткань, вата, различные строительные материалы. Вода и другие смачивающие их жидкости, соприкасаясь с такими телами, «втягиваются» в их капилляры и начинают перемещаться по всем направлениям внутри тел. Именно поэтому так быстро намокают кусочки ваты (или сахара), едва коснувшись воды. По этой же причине влага легко проникает в обычные кирпичи, а керосин поднимается по фитилю керосиновой лампы.

Капиллярные явления играют существенную роль в водоснабжении растений и перемещении влаги в почве. В сухую погоду почва ссыхается, и в ней образуются трещины — капилляры. По ним вода поднимается из-под земли вверх и испаряется. Поверхность земли из-за этого высыхает еще больше. Для сохранения влаги внутри земли верхний слой почвы разрыхляют. При этом капилляры разрушаются, и вода остается в почве. И наоборот, когда почва слишком влажная, ее укатывают. Капилляры в ней делаются тоньше, и глубина, с которой поднимается по ним жидкость, увеличивается. Поднимаясь наверх, вода испаряется, и почва постепенно высыхает.

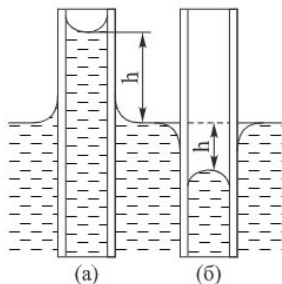


Рис. 9.29. Капиллярные явления: (а) поднятие жидкости, смачивающей стенки капилляра; (б) опускание жидкости, не смачивающей стенки капилляра поверхностного натяжения, а также от краевого угла θ

Чем тоньше капилляр, тем на большую высоту в нем поднимается смачивающая его жидкость. Капиллярностью объясняют свойство горных пород поднимать воду в мельчайших пустотах выше общего уровня воды, наперекор силе тяжести. В песках средней крупности с диаметром зерен от 0,5 до 1 мм капиллярность достигает такой силы, что может поднимать воду до 0,4 м. В более мелком песке или песке с примесью глины — до 1 м., а в чистых глинах — даже до 2 м.

Если жидкость находится в узкой трубке (капилляре), влияние стенок простирается на всю поверхность жидкости и она образует мениск на всем своем протяжении. Пусть стенки трубки смачиваются жидкостью (например, вода и стекло). Тогда вода, проликаясь в трубку, образует вогнутый мениск.

Угол между касательной к поверхности жидкости и поверхностью твердого тела называется краевым углом (угол θ на рис. 9.30). В случае когда $\theta < 90^\circ$, жидкость смачивает твердое тело. Когда $\theta > 90^\circ$, смачивание не происходит.

Высота подъема (опускания) жидкости h в капилляре зависит от величины и радиуса капилляра r . Для получения формулы для определения высоты h , воспользуемся формулой для силы поверхностного натяжения: $2\pi r \gamma \sin(90 - \alpha) = 2\pi r \gamma \cos \theta$. Эта сила уравнивается весом столбика жидкости, который можно принять за цилиндр высотой h и объемом $\pi r^2 h$. Исходя из условия равновесия, запишем следующую цепочку равенств: $2\pi r \gamma \cos \theta = mg = \pi r^2 h \rho g$, где ρ — плотность жидкости. Отсюда получаем следующее выражение для h : $h = 2\gamma \cos \theta / \rho g r$.

Очевидно, что чем меньше радиус трубки, тем на большую высоту поднимается в ней жидкость.

Кроме того, высота поднятия растет с увеличением коэффициента поверхностного натяжения жидкости. При отсутствии смачивания $\theta > 90^\circ$ и $\cos \theta < 0$ и уровень жидкости в капилляре опускается на величину h . При полном смачивании $\theta = 0$, радиус мениска равен радиусу капилляра. Отношение $2\gamma/r$ называется давлением Лапласа, который тоже «приложил руку» к объяснению явления капиллярности.

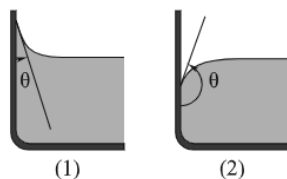


Рис. 9.30. Краевые углы смачивающей (1) и несмачивающей (2) жидкостей

Теорией поверхностного натяжения занимались многие ученые, но только Лапласу удалось достигнуть в этой теории известной законченности, сообщить ей истинно научную основу. Лаплас опубликовал свои первые работы в этой области в двух небольших сочинениях (1806–1807), за которыми последовал ряд более подробных статей в периодических изданиях. Эта теория в своей окончательной форме появилась в четвертом томе «Небесной механики», поскольку Лаплас рассматривал капиллярность как частный случай всемирного тяготения. Лаплас видит в капиллярности явление взаимного сцепления частиц жидкости и их прилипания к частицам твердых стенок трубки, причем эти силы проявляются лишь при неизмеримо малых расстояниях между частицами. Чем больше сила прилипания по сравнению с силой сцепления, тем выше поднимается жидкость по трубке и тем более вогнутой оказывается форма мениска (поверхности жидкости в капилляре). Отношение этих сил Лаплас численно определяет по «краевому углу». Это была первая правильная мысль о так называемых молекулярных силах, получившая впоследствии в физике широчайшее развитие и практическое применение.

Формулы, выведенные Лапласом, дали простой закон, подтверждающийся на практике: высоты поднятия одной и той же жидкости в разных трубках обратно пропорциональны их диаметру.

Мы рассказали основные открытия для покоящейся жидкости. Но жидкость может находиться в движении. Тому множество примеров в природе. Законы движущейся жидкости (гидродинамики) человечество постигало в течение всей своей истории, совершенствуя двигатели кораблей, создавая водяные мельницы, водопроводные каналы и много чего другого. Первым научным трудом считается труд Архимеда «О плавающих телах». В XIV веке появился научный труд Леонардо да Винчи «О движении воды и речных сооружениях», в котором он изложил свои наблюдения и опыт при постройке гидротехнических сооружений

в Милане, Флоренции и других городах Италии. Но в отличие от гидростатики гидродинамика как наука сложилась только в середине XVIII века. Несмотря на свое название («гидро» — вода, «динамика» — движение), она изучает не только движение жидкости, но и движение газа, хотя на первый взгляд между ними очень много различий. Создание гидродинамики, да и других областей физики, основано на развитии идей Ньютона, распространение основных положений его механики на всю физику.

10. *Жидкость течет по-разному. Основное уравнение течения жидкости. Уравнение Бернулли. Закон Торричелли. Измерение давления в движущейся жидкости. Вязкое течение жидкости. Турбулентность.*

Несмотря на простоту законов, описывающих покоящуюся жидкость, получить законы движения текущей жидкости оказалось непростой задачей. Движущаяся жидкость долгое время скрывала от ученых свои тайны. И до сих пор не удается объяснить все аспекты поведения даже такой распространенной жидкости, как вода. Понятно поэтому, что исследование движущихся жидкостей началось, по существу, лишь в начале девятнадцатого века, хотя само зарождение гидродинамики как науки началось после открытия Ньютоном своих законов. Эти законы стали отправной точкой для математического описания движения жидкости. Однако описание жидкости с помощью законов Ньютона требует рассмотрения движения каждой частицы жидкости. При этом расчет оказывается чрезвычайно сложным и громоздким. Поэтому, как и в других разделах физики сплошных сред, прежде всего осуществляется переход от реальной среды, состоящей из большого числа отдельных частиц, к абстрактной *сплошной среде*, для которой и записываются уравнения движения. То есть вместо того, чтобы следить за траекторией движения каждой частицы в жидкости, переходят к описанию параметров движения жидкости в каждой точке пространства, выражая скорость и плотность для каждой точки как функции времени.

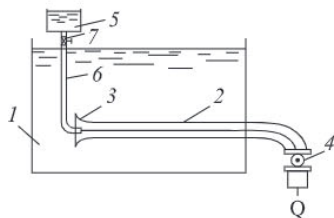


Рис. 10.1. Схема стенда Рейнольдса: 1 — бак; 2 — стеклянная труба; 3 — мундштук; 4 — кран; 5 — резервуар с раствором; 6 — трубочка; 7 — краник

Типы течения жидкостей. В 1883 году английским ученым О. Рейнольдсом была собрана лабораторная установка (рис. 10.1, infobos.ru), на которой были получены важные результаты. Установка состояла из бака (1), стеклянной горизонтальной трубы (2) диаметром d , частично находящейся в баке. В начале трубы имелся мундштук (3) (патрубок) с плавным переходом с большого входного отверстия на отверстие трубы. На конце трубы за пределами бака находился кран (4), с помощью которого можно было регулировать расход воды и среднюю скорость в стеклянной трубе. Над баком был установлен небольшой резервуар (5), заполняемый раствором анилиновой краски. К резервуару была присоединена тонкая трубочка (6), конец которой входил в мундштук по оси трубы. Для регулирования пуска раствора краски через трубочку в стеклянную трубу имелся краник (7). Раствор анилиновой краски имел практически

одинаковую плотность с водой, находящейся в баке. Опыты заключались в том, что при открытии крана на трубе устанавливались определенные расход (количество жидкости, протекающей в единицу времени через поперечное сечение потока) и скорость жидкости (скорость движения прямо пропорциональна расходу жидкости). Одновременно пускался из резервуара (5) раствор краски, который выходил из трубочки (6) в трубу (2). При достаточно малой скорости в трубе струйка раствора образовывала внутри потока воды устойчивую несмешивающуюся окрашенную тонкую струйку.

Данный опыт демонстрировал существование струйчатого характера движения жидкости. При увеличении средней скорости наблюдалось такое же движение окрашенной струйки.

Течение жидкости, которому соответствует устойчивый струйчатый характер, называется *ламинарным движением*. Название движения произошло от латинского слова *lamina* — слой. Ламинарный режим соответствует относительно малым скоростям и слоистому движению жидкости. Частички жидкости не перемешиваются друг с другом, и линии тока (см. далее) параллельны оси движения потока. Открывая кран больше, увеличивая тем самым скорость, можно было наблюдать изменение характера движения жидкости: струйка приобретает некоторый волнистый характер, и местами струйка может иметь разрывы. Следовательно, в этот промежуток времени будет происходить нарушение струйчатого движения воды. При дальнейшем увеличении скорости частички этой струйки начинают перемешиваться с потоком воды. Частички раствора движутся в произвольном направлении, и при этом не наблюдается определенной закономерности их движения. Они имеют различные перемещения по пути движения. В результате перемешивания частиц вся масса воды, движущейся в трубе, становится несколько окрашенной. Такое движение можно считать беспорядочным. Движение, при котором наблюдается беспорядочный характер движения частичек жидкости по весьма сложным траекториям, называется турбулентным движением (от латинского слова *turbulentus* — вихревой, беспорядочный). В результате этого происходит интенсивное перемешивание различных слоев жидкости (рис. 10.4).

Таким образом, опыты показывают, что возможны два режима (вида) движения жидкости: ламинарный и турбулентный.

Ламинарным называют слоистое течение без перемешивания частиц жидкости и без пульсаций скоростей и давлений. При ламинарном движении жидкости в прямой трубе постоянного сечения все линии тока направлены параллельно оси трубы, то есть поперечные перемещения жидкости отсутствуют. Такое движение

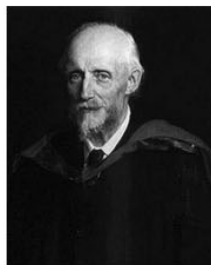


Рис. 10.2. Осборн Рейнольдс (Википедия)

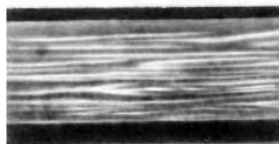


Рис. 10.3. Фотография ламинарного течения

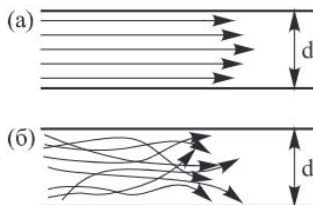


Рис. 10.4. Схематичное изображение ламинарного (а) и турбулентного (б) течения в плоском слое
([vmede.org vmede.org/sait/?page=10&id=Medbiofizika](http://vmede.org/vmede.org/sait/?page=10&id=Medbiofizika))

является вполне упорядоченным и при постоянном давлении строго установившимся.

Турбулентное течение сопровождается интенсивным перемешиванием жидкости и пульсациями скоростей и давлений. При таком движении векторы скоростей имеют не только осевые, но и нормальные к оси трубы составляющие, поэтому вместе с основным продольным движением жидкости вдоль трубы происходят поперечные перемещения (перемешивание) и вращение отдельных объемов жидкости. Этим объясняются пульсации скоростей и давлений.

Рейнольдс выполнил несложный эксперимент и получил много важной информации. И здесь необходимо отметить, сколь искусны были физики в прошлом.

Уравнение неразрывности. Перейдем к рассмотрению идеальной жидкости. Это означает, что мы будем пренебрегать силами вязкости, то есть внутренним трением, которое приводит к тому, что различные слои жидкости движутся с разными скоростями. Жидкость считается несжимаемой, а единственная поверхностная сила, действующая на жидкость, — сила нормального давления — однозначно определяется плотностью и температурой.

В такой жидкости (газе) в установившемся ламинарном потоке траектория, по которой движется данная частица, называется линией тока. *Линия тока* —

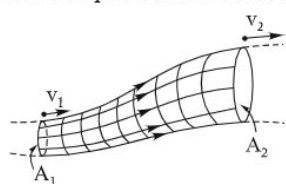


Рис. 10.5. Трубка тока

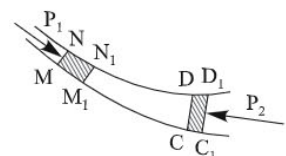


Рис. 10.6

касательная, которая указывает направление скорости частицы жидкости в данный момент времени. Элемент жидкости в этот момент находится в точке касания. Линии тока образуют некоторую трубчатую поверхность, проходящую через произвольный замкнутый контур, называемый трубкой тока (см. рис. 10.5). В соответствии с определением линий тока жидкость не может втекать или вытекать через боковую поверхность трубки тока.

Рассмотрим теперь ламинарное течение жидкости в пределах трубки тока с целью выяснить, как зависит скорость течения от поперечных размеров трубки тока. Рассмотрим трубку тока с бесконечно малым сечением S . В ней скорость жидкости u одинакова во всех точках одного и того же поперечного сечения и направлена вдоль оси трубки тока. Масса жидкости, протекающей за время dt через поперечное сечение трубки (массовый расход), $dm = \rho u S dt$ (ρ — плотность жидкости). Если течение стационарное, то для двух поперечных сечений можно написать $\rho_1 u_1 S_1 = \rho_2 u_2 S_2$. Таким образом, как следует из написанного и рис. 10.6, масса, сосредоточенная в объеме MNM_1N_1 , перемещается по течению жидкости в другое место, занимая объем CDC_1D_1 , при этом ее количество остается неизменным.

Написанное равенство называется уравнением неразрывности (или непрерывности) и выражает так называемый принцип непрерывности. В классической физике этот принцип хорошо известен в применении к жидкости или газу как закон сохранения массы (количества частиц), в электродинамике — как закон сохранения заряда. Его физический смысл означает неуничтожаемость той или иной субстанции, которая не может возникнуть из ничего и исчезать в никуда.

Если жидкость несжимаема, то есть $\rho_1 = \rho_2$, то $u_1/u_2 = S_2/S_1$. Это будет уравнением неразрывности для несжимаемой жидкости. Из уравнения следует, что в месте, где сечение трубки тока (или реальной трубы) больше, скорость меньше по сравнению с сечением меньшего размера. Это можно видеть, наблюдая за течением воды в реке: в узком месте, в ущелье, течение быстрое, в то время как на равнине мы видим медленное течение. Такая обратная зависимость между скоростью и площадью является важным следствием уравнения неразрывности и применяется в технике, например, при тушении пожара для получения сильной и дальнейшей струи воды.

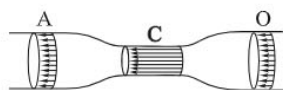


Рис. 10.7. Движение жидкости в трубе с разными сечениями. Длина стрелок изображает среднюю скорость течения жидкости

Написанное уравнение неразрывности можно применить и для реальных жидкостей, имеющих заметную вязкость. В этом случае скорости u_1 и u_2 надо считать как средние в соответствующих сечениях. Тогда закон неразрывности будет формулироваться так: средние скорости потока обратно пропорциональны площадям соответствующих сечений.

Уравнение Бернулли. Проведем простой опыт. Возьмем два листочка бумаги (можно один, а вместо второго листочка можно использовать стену). Продуем между ними воздух. Листочки начнут сближаться и могут слипнуться. Отчего это происходит? А почему самолеты весом несколько сот тонн, разогнавшись, отрываются от взлетно-посадочной полосы и устремляются ввысь? Эти и многие другие явления находят свое объяснение в законе, открытом швейцарским математиком Даниилом Бернулли (1700–1782). Обратимся к стационарному движению идеальной жидкости в поле силы тяжести. Рассмотрим тонкую трубку тока и выделим в ней два произвольных сечения. Для общности положим, что эти сечения находятся на разных высотах (h_1 и h_2), а их площади различны (A_1 и A_2) (рис. 10.9).

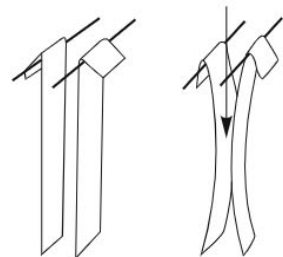


Рис. 10.8

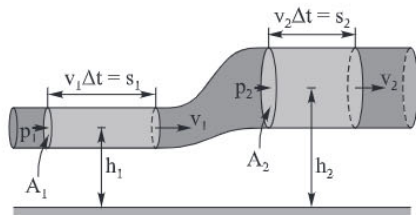


Рис. 10.9. Параметры сечений в трубке тока (Википедия)

Вследствие уравнения неразрывности будут различны и скорости течения жидкости в этих сечениях (v_1 , v_2). Жидкость, находящаяся слева от A_1 , создает давление P_1 и заставляет жидкость перемещаться вправо на расстояние s_1 . В свою очередь, под действием давления жидкость во втором сечении перемещается на расстояние s_2 . Рассчитаем совершаемые при этом работы. Жидкость, находящаяся слева от первого сечения A_1 , совершает работу $W_1 = F_1 s_1 = P_1 s_1$, а в сечении A_2 совершается работа силой, противоположно направленной к перемещению (что приводит к знаку минус): $W_2 = -P_2 s_2$. При этом совершается работа также в поле силы тяжести. Эту работу запишем в виде $W_T = -mg(h_2 - h_1)$. Знак минус учитывает то обстоятельство, что движение направлено вверх, против силы тяжести.

Полная работа, совершаемая над жидкостью, равна $W = W_1 + W_2 + W_T$. Подставляя выражения для работ, полученные выше, имеем

$$W = P_1 s_1 - P_2 s_2 - mgh_2 + mgh_1.$$

Ранее (см. с.71 и далее) мы нашли связь между работой и энергией: совершенная над системой работа равна изменению ее кинетической энергии. Отсюда следует, что

$$1/2 mv_2^2 - 1/2 mv_1^2 = P_1 A_1 s_1 - P_2 A_2 s_2 - mgh_2 + mgh_1.$$

Учтем далее, что $\rho A_1 s_1 = \rho A_2 s_2$ есть масса m жидкости в равных объемах. Поделив обе части на $A_1 s_1$ и сделав ряд преобразований, окончательно получим

$$P_1 + 1/2 \rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + 1/2 \rho v_2^2 + \rho gh_2.$$

Полученное уравнение и есть уравнение Бернулли. Любопытно, что книга Даниила «Гидродинамика», где приведен этот закон, была опубликована в 1738 году, практически одновременно с книгой Иоганна Бернулли, его отца, «Гидравлика». По взаимной договоренности между сыном и отцом была, однако, специально датирована 1732 годом, чтобы в случае чего в семье не возникло недоразумений относительно приоритета в открытиях.

Площади сечений A_1 и A_2 были выбраны произвольно вдоль трубки тока, поэтому уравнение Бернулли можно записать в виде $p + 1/2 \rho v^2 + \rho gh = \text{const}$ в любой точке жидкости (вдоль линий тока). В левой части написанного соотношения присутствуют три члена — различные давления, составляющие в сумме полное давление. В нем ρgh — знакомое нам гидростатическое давление, p — статическое давление и $1/2 \rho v^2$ — динамическое давление (вызванное движением жидкости). Из закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения потока, из-за возрастания скорости, а значит динамического давления, статическое давление падает.

В свете закона Бернулли понятно поведение листочков бумаги в опыте, описанном в начале этого параграфа. Давление воздуха в пространстве левее и правее листочков бумаги равно атмосферному давлению. Направив воздушный поток между листочками, мы тем самым в этом скоростном потоке воздуха создаем область пониженного давления в соответствии с законом Бернулли, в результате чего возникает разность давлений в пространстве между листками и с внешней стороны листков. Эта разность давлений является причиной «слипания» листочков.

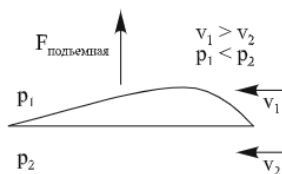


Рис. 10.10

В случае с самолетом воздух обтекает крыло самолета снизу медленнее, чем сверху. Это связано с конфигурацией крыла (см. рис. 10.10). Воздушный поток разрезается надвое передней кромкой крыла, и часть его обтекает крыло вдоль верхней поверхности, а вторая часть — вдоль нижней. Чтобы двум потокам сомкнуться за задней кромкой крыла, не образуя вакуума, воздух, обтекающий верхнюю поверхность крыла, должен двигаться быстрее относительно самолета, чем воздух, обтекающий нижнюю поверхность, поскольку ему нужно преодолеть большее расстояние. И тут в действие вступает эффект, открытый Даниилом Бернулли. И благодаря этому эффекту обратной зависимости давления от скорости давление воздуха снизу, направленное вверх, оказывается больше давления сверху, направленного вниз.

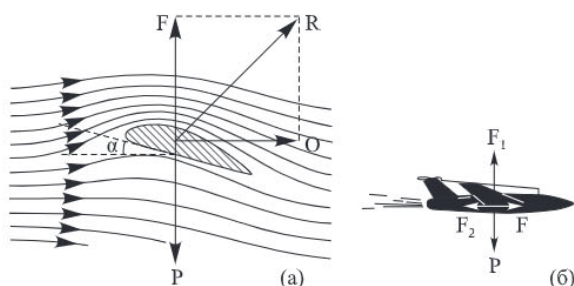


Рис. 10.11. Подъемная сила крыла (а) и силы, действующие на самолет (б)

В результате, по мере набора самолетом скорости, возрастает направленная вверх разность давлений, и на крылья самолета действует нарастающая по мере разгона подъемная сила. Как только она начинает превышать силу гравитационного притяжения самолета к земле, самолет в буквальном смысле взмывает в небо. Эта же сила удерживает самолет в горизонтальном полете: на крейсерской скорости и высоте подъемная сила уравнивает силу тяжести.

Закон Торричелли. Закон Торричелли, также известный как теорема Торричелли, — это теорема в гидродинамике, связывающая скорость жидкости, вытекающей через отверстие, с высотой жидкости над отверстием. Формула Торричелли утверждает, что скорость v истечения жидкости через отверстие в тонкой стенке, находящееся в емкости на глубине h от поверхности, такая же, как и у тела, свободно падающего с высоты h , то есть $v = \sqrt{2gh}$, где g — ускорение свободного падения.

Для доказательства этого закона воспользуемся законом Бернулли, который утверждает, что $p + 1/2\rho v^2 + \rho gh = \text{const}$, где h — высота жидкости над точкой, для которой записывается уравнение Бернулли. Пусть отверстие находится на высоте $h = 0$. У поверхности жидкости в резервуаре давление равно p — атмосферному. Скорость жидкости v в верхней части резервуара можно считать равной нулю, так как уровень поверхности жидкости понижается очень медленно по сравнению со скоростью истечения жидкости через отверстие. На выходе из отверстия $h = 0$ и p также равно атмосферному давлению. Приравняв левые части уравнения Бернулли, записанные для поверхности жидкости в резервуаре и для жидкости на выходе из отверстия, получим $gh + p/\rho = v^2/2 + p/\rho$. Откуда получаем $v = \sqrt{2gh}$.

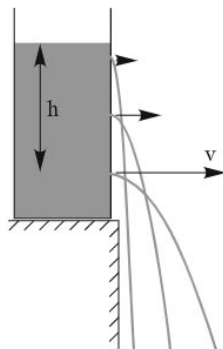


Рис. 10.12

Эта формула была получена в словесной форме Эвангелиста Торричелли в 1643 году и опубликована в его сочинении *Opera geometrica*, вышедшем в 1644 году. Позже было показано, что эта формула является следствием закона Бернулли.

Измерение давления в движущейся жидкости. В соответствии со сказанным выше в текущей жидкости различают статическое давление и динамическое давление. Причиной статического давления, как и в случае неподвижной жидкости,

является сжатие жидкости. Статическое давление проявляется в напоре на стенку трубы, по которой течет жидкость. Динамическое давление обуславливается скоростью течения жидкости. Чтобы обнаружить это давление, надо затормозить жидкость, и тогда оно, как и статическое давление, проявится в виде напора. Сумма статического и динамического давлений называется полным давлением. Полное давление измеряют трубкой, плоскость отверстия которой расположена перпендикулярно линиям тока. Такой прибор называется трубкой Пито. Попав

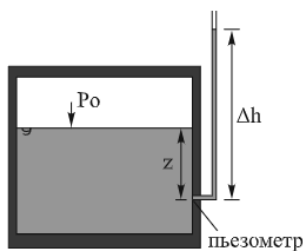


Рис. 10.13

в отверстие трубки Пито, жидкость останавливается. Высота столба жидкости ($h_{\text{полн}}$) в манометрической трубке будет соответствовать полному давлению жидкости в данном месте трубы. Для измерения гидростатического давления применяют довольно простой прибор, называемый пьезометром. Пьезометры, используемые для давления в жидкостях, представляют собой обычно трубку малого диаметра (обычно около нескольких миллиметров), которая одним концом соединяется с сосудом, в котором измеряется давление.

Вязкость. Выше мы рассматривали так называемые идеальные жидкости. Идеальная жидкость — воображаемая жидкость, в которой, в частности, отсутствует сопротивление сдвигу (то есть она обладает абсолютной текучестью и полным отсутствием сил сцепления между частицами, а значит — вязкости). Реальные жидкости, как правило, близки к идеальным в смысле несжимаемости — нужны очень высокие давления (в сотни и тысячи атмосфер), чтобы сжимаемость реальной жидкости стала заметной. Однако реальные жидкости могут весьма значительно сопротивляться сдвигу, а это есть свойство вязкости.

Эффекты трения и вязкости, как причины уменьшения скорости проточной воды, были рассмотрены в труде «Philosophiae Naturalis Principia Mathematica» сэра Исаака Ньютона. Он высказал гипотезу о трении в движущейся жидкости, ввел понятие о вязкости жидкости. Вязкость есть результат действия сил внутреннего трения, возникающих при движении соприкасающихся слоев жидкости (газа) друг относительно друга. Например, если размешать жидкость в стакане, то ее движение постепенно прекратится из-за наличия сил вязкости. Наличие вязкости отчетливо проявляется при ее движении по капиллярам. Когда две жидкости равного объема помещены в идентичные капиллярные вискозиметры (прибор для определения динамической или кинематической вязкости вещества) и двигаются самотеком, вязкой жидкости требуется больше времени для протекания через капилляр. Если одной жидкости требуется для вытекания 200 секунд, а другой — 400 секунд, вторая жидкость в два раза более вязкая, чем первая, по шкале кинематической вязкости.

Таким образом, вязкость — мера этого внутреннего трения.

При перемещении силы внутреннего трения направлены по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая сила. Со стороны же слоя, движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила. Рассмотрим это явление на следующем опыте (рис. 10.14).

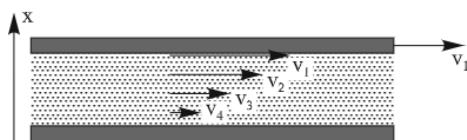


Рис. 10.14. Течение вязкой жидкости между пластинами

Поместим слой жидкости между двумя параллельными твердыми пластинами. «Нижняя» пластина закреплена. Если двигать «верхнюю» пластину с постоянной скоростью v_1 , то с такой же скоростью будет двигаться самый «верхний» 1-й слой жидкости, который считаем «прилипшим» к «верхней» пластине. Этот слой влияет на нижележащий непосредственно под ним 2-й слой, заставляя его двигаться со скоростью v_2 , причем $v_2 < v_1$. Каждый слой (выделим n слоев) передает движение нижележащему слою с меньшей скоростью. Слой, непосредственно «прилипший» к «нижней» пластине, остается неподвижным. Слои взаимодействуют друг с другом: n -й слой ускоряет $(n + 1)$ -й слой, но замедляет $(n - 1)$ -й слой. Таким образом, наблюдается изменение скорости течения жидкости в направлении, перпендикулярном поверхности слоя (ось x). Такое изменение характеризуют производной dv/dx , которую называют *градиентом скорости*.

Силы, действующие между слоями и направленные по касательной к поверхности слоев, называются *силами внутреннего трения*, или *вязкости*. Эти силы пропорциональны площади взаимодействующих слоев S и градиенту скорости. Для многих жидкостей силы внутреннего трения подчиняются *уравнению Ньютона*:

$$F_{\text{тр}} = \eta dv/dx S, \quad \eta = \text{const.}$$

Коэффициент пропорциональности η называют коэффициентом внутреннего трения, или *динамической вязкостью* (или просто *вязкостью*) (размерность η в СИ: Па·с).

В газе также возникают силы вязкости. Они связаны с тем, что молекулы газа участвуют одновременно в двух движениях: упорядоченном и хаотическом тепловом, причем среднее значение модуля скорости теплового хаотического движения молекул обычно значительно превышает скорость упорядоченного движения, то есть скорость течения. Для воздуха при комнатной температуре и атмосферном давлении коэффициент вязкости η составляет $1,85 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Примерами жидкостей с небольшой вязкостью могут служить бензин, вода ($\eta = 0,1$ Па·с при тех же условиях), с большой вязкостью — глицерин ($\eta = 1,48$ Па·с), масло, смола.

В таблицах 4–5 приведены значения вязкости для ряда жидкостей и газов. Следует отметить, что для газов коэффициент вязкости η пропорционален температуре ($\eta \sim T$) и не зависит от давления, в то время как для жидкости, напротив, с увеличением температуры η уменьшается.

Жидкости и газы, для которых выполняется написанный выше закон (прямая пропорциональность между силой трения и скоростью), называются *ньютоновскими*. Для неньютоновских жидкостей коэффициент η сам зависит от скорости. Примерами таких жидкостей может служить кровь (содержащая взвешенные частицы), различные суспензии.

Таблица 4. Вязкость жидкостей (при 18 °С)

Вещество	Вязкость, 10^{-3} кг/(м·с)
Анилин	4,6
Ацетон	0,337
Бензол	0,673
Бром	1,02
Вода	1,05
Глицерин	1400
Масло машинное легкое	113
Ртуть	1,59
Спирт этиловый	1,22

Таблица 5. Вязкость газов (при 0 °С)

Вещество	Вязкость, 10^{-5} кг/(м·с)
Азот	1,67
Аммиак	0,93
Водород	0,84
Воздух	1,72
Гелий	1,89
Кислород	1,92
Метан	1,04
Углекислый газ	1,40
Хлор	1,29

Мы уже отмечали, что наблюдаются два вида движения жидкости. В одних случаях жидкость течет слоями, которые скользят друг относительно друга, не перемешиваясь. Это движение называется ламинарным (слоистым). Ламинарное течение стационарно. При увеличении скорости или поперечных размеров потока жидкости возникает перемешивание жидкости. Уже упоминавшийся английский ученый Рейнольдс установил, что характер течения жидкости определяется безразмерной величиной, называемой числом Рейнольдса: $Re = \rho v l / \eta$, где ρ — плотность жидкости, v — средняя скорость потока, η — коэффициент вязкости и l — характерный для поперечного сечения сосуда размер (например, радиус трубы). Как следует из приведенной формулы, число Re обратно пропорционально величине вязкости. При малых значениях числа Рейнольдса наблюдается ламинарное течение. Начиная с некоторого определенного значения Re , называемого критическим, течение приобретает турбулентный характер. Если число Re у жидкости находится в пределах нескольких сотен, то поток совершенно ламинарный, то есть спокойно течет, без завихрений. Но если это значение растет, тогда в потоке возникают завихрения, он становится турбулентным (см. рис. 10.15).

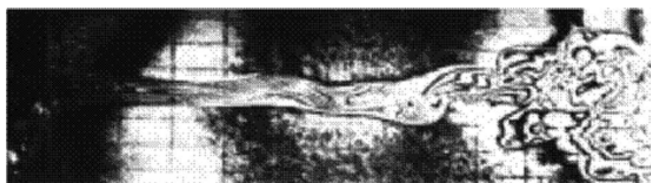


Рис. 10.15. Оптическое изображение текущей струи жидкости ($Re = 250$); хорошо видно, что течение от ламинарного режима через переходный трансформируется в турбулентный

Если какое-либо тело движется относительно вязкой среды, то на него со стороны этой среды действует сила *лобового сопротивления*, зависящая от скорости движения и направленная противоположно этой скорости. Эта сила препятствует движению тел в жидкостях и газах. Сила лобового сопротивления обусловлена наличием вязкости и складывается из сопротивления трения и сопро-

тивления давления. Сопротивление трения возникает из-за того, что частицы среды обволакивают движущееся тело и двигаются вместе с ним, вовлекая в движение соседние слои среды. Сопротивление давления вызывается образованием позади тела вихревой области с пониженным давлением, эта составляющая лобового сопротивления преобладает при больших скоростях движения и сильно зависит от формы тела. Для небольших значений Re сила лобового сопротивления среды возникает только из-за наличия трения. В 1851 году Джордж Стокс получил выражение для силы трения (также называемой силой лобового сопротивления, действующей на сферические объекты с очень малыми числами Рейнольдса (например, очень маленькие частицы) в непрерывной вязкой жидкости. В этом случае для движущегося относительно среды шара радиуса r величина силы лобового сопротивления F_c равна: $F_c = 6\pi\eta rv$, где v — скорость движения шара относительно среды. Это и есть закон Стокса.

При больших значениях числа Рейнольдса в потоке позади движущегося тела возникает турбулентное движение. При этом, как показывает опыт, лобовое сопротивление пропорционально уже квадрату скорости, а не скорости в первой степени, как в законе Стокса. То есть резко увеличивается с ростом скорости.

Числа Рейнольдса важны при аэродинамических испытаниях для моделирования потоков в различных жидкостях и газах, поскольку их поведение зависит не от реальной вязкости, плотности, скорости и линейных размеров элемента потока, а лишь от их соотношения, выражаемого числом Рейнольдса. К примеру, можно поместить в аэродинамическую трубу уменьшенную модель самолета и так подобрать скорость потока, чтобы число Рейнольдса соответствовало реальной ситуации полномасштабного самолета в полете. А можно на компьютере смоделировать весь процесс.

Число Рейнольдса — пример так называемого критерия подобия. Критерий подобия — безразмерная величина, составленная из размерных физических параметров, определяющих рассматриваемое физическое явление. Равенство всех одноименных критериев подобия для двух физических явлений и систем — необходимое и достаточное условие их физического подобия. На этом основана теория подобия, которая устанавливает критерии подобия различных физических явлений, позволяющие с их помощью изучать свойства самих явлений.

На этом заканчиваем рассмотрение жидкостей и переходим к изучению газов. Газообразное состояние — самое распространенное состояние вещества во Вселенной. С точки зрения изучения газы оказались наиболее простым объектом в физике. Открытие атмосферного давления в середине XVII века послужило отправной точкой для начала глубоких, всесторонних исследований свойств газа. Эти исследования были обусловлены также растущими нуждами промышленности, которая нуждалась в химическом производстве, а в дальнейшем начала использовать силу пара в тепловых машинах. Именно при изучении различных явлений в газах были получены фундаментальные результаты в физике, а на рубеже XIX–XX веков были пересмотрены многие сложившиеся представления классической физики. Об этом подробный рассказ впереди.

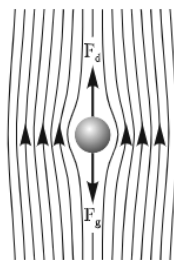


Рис. 10.16. Линии обтекающего потока, лобовое сопротивление F_d , сила тяжести F_g (Википедия)

11. Макроскопическое описание газа. Путешествие по температурной шкале. Газовый термометр. Газовые законы. Закон Клайперона. Давление смеси газов.

До середины XVII века газы еще не различались и считались лишь разными видами воздуха. Фламандский натуралист Ян Ван-Гельмонт (1579–1644), по-видимому, первый показал, что следует признать существование ряда различных воздухообразных тел, которые он назвал газами (франц. *gaz*, от греч. *chaos* — хаос). Далее изучением газов занялись химики (заметим, что термин «физик» в значении «ученый» появился середине XIX века).

Путешествуя по физике, мы уже не раз могли отметить, что изучение какого-либо явления, предмета начинается с исследования, изучения его внешних свойств, которые могут быть объяснены на основе простых средств. Особенно это характерно для газов, их поведение изучалось через величины, которые могут быть измерены непосредственно с помощью наших органов чувств. Здесь основным базовым понятием является температура.

Температура. Закон идеального газа. Представления о температуре вошли в науку посредством наших чувственных восприятий. Наши ощущения позволяют различать качественно градации тепла и холода, но количественная мера, пригодная для науки, должна быть основана на объективных физических явлениях и фактах.

Изобретателем термометра принято считать Галилея. Однако в его собственных сочинениях нет описания этого прибора, но его ученики, Нелли и Вивияни, засвидетельствовали, что уже в 1597 году он устроил нечто вроде термобароскопа (термоскоп, от греческих слов «термо» — тепло, «скопео» — смотрю), называемого далее термоскопом. Термоскоп представлял собой небольшой стеклянный шарик с припаянной к нему стеклянной трубкой. Шарик слегка нагревали и конец трубки опускали в сосуд с водой. Через некоторое время воздух в шарике охлаждался, его давление уменьшалось, и вода под действием атмосферного давления поднималась в трубке вверх на некоторую высоту h . В дальнейшем, при потеплении давление воздуха в шарике увеличивалось, уровень воды в трубке понижался, при охлаждении же вода в ней поднималась. При помощи термоскопа можно было судить только об изменении степени нагретости тела: числовых значений температуры он не показывал, так как не имел шкалы.



Рис. 11.1. Демонстрация термоскопа (старинная гравюра)

Кроме того, уровень воды в трубке зависел не только от температуры, но и от атмосферного давления. Позднее флорентийские ученые усовершенствовали термоскоп Галилея, добавив к нему шкалу из бусин и откачав из шарика воздух. По существу, эксперимент Галилея демонстрировал изменение плотности воздуха в зависимости от его температуры, но для понимания этого факта необходимо было сначала прийти к понятию веса воздуха, которое появилось спустя почти 50 лет. Но этот опыт был важен для дальнейших исследований. Термоскоп фактически явился прообразом термометра, и, чтобы подойти к его изобретению, Гали-

лей должен был радикально пересмотреть существующие в то время представления о тепле и холоде. Он учил, а позже (1623) и прямо написал в «Saggiatore» («Пробирщик»), что холод не является положительным качеством, а есть лишь отсутствие тепла, холод пребывает не в материи, а в чувствительном теле.

В основе измерения температуры (термометрии) лежит то обстоятельство, что вещество под действием температуры изменяется. Так, большинство материалов при нагревании расширяются. Это явление было использовано при создании первых измерительных приборов температуры — термометров.

Еще в 1703 году парижский академик Г. Амонтон (1663–1705) сконструировал воздушный (газовый) термометр. Этот усовершенствованный воздушный термометр, измерял не расширение, а увеличение упругости воздуха, приведенного к одному и тому же объему при разных температурах под давлением ртути в открытое колено; барометрическое давление и его изменения при этом принимались во внимание. Нулем такой шкалы должна была служить «та значительная степень холода», при которой воздух теряет всю свою упругость (то есть современный абсолютный нуль), а второй постоянной точкой — температура кипения воды, температура при этом определялась с помощью манометрической трубки, присоединенной к газовому резервуару постоянного объема. Термометр Амонтона представлял собой U-образную стеклянную трубку, более короткое колено которой заканчивалось резервуаром, содержащим воздух; в длинное колено наливалась ртуть в количестве, необходимом для поддержания постоянства объема воздуха в резервуаре. По высоте столба ртути определялась температура. Любопытно, что с этим инструментом, встреченным весьма неодобрительно, Амонтон пришел фактически к понятию абсолютного нуля, который, по его данным, соответствовал $-239,5^{\circ}$. Интересно отметить, что с рождения Амонтон был практически глух, поэтому никогда не посещал университетов и математику, физику, геодезию, прикладную и небесную механику, а также архитектуру и рисование изучил самостоятельно.

Прибор Амонтона, интересный в теоретическом отношении как прототип современных водородных термометров, был неудобен для практических целей.

Уже в первой половине XVIII столетия начались количественные тепловые измерения, доведенные до высокой степени точности в теплофизических опытах Лапласа и Лавуазье. Это время было отмечено интенсивными попытками ученых создать удобные и точные приборы для измерения температуры. Общий ход решения был примерно ясен: сначала надо было взять несколько объектов, температура которых могла бы быть принята за эталон для установления контрольных (реперных) точек, с которыми можно было бы сравнить температуру изучаемого образца.

Еще флорентийские академики открыли, что в смеси воды со льдом один и тот же термометр всегда показывает одно и то же. Отсюда и возникло понятие о состояниях (точках) с постоянной температурой. Температура смеси не зависит от соотношения количества воды и количества льда. При точности измерений температуры в XVII веке нельзя было заметить, изменяется ли температура смеси при изменении барометрического давления. Открытие вто-



Рис. 11.2. Образец флорентийского термометра

рой постоянной точки — температуры кипения воды — потребовало гораздо больше времени.

В XVII веке ученые начали измерять температуру термометром, а многие люди украшали термометром свои жилища. Отсюда старания стеклодувов создать возможно более нарядные термометры, порой в ущерб их прямому назначению. Температура кипения заметным образом зависит от барометрического давления. В 1724 году это окончательно установил стеклодув Г. Д. Фаренгейт (1686–1736).

Шкала Фаренгейта. Данцигский (Гданьский) стеклодув Фаренгейт (1686–1736) с 1709 года изготавливал спиртовые термометры с постоянными реперными точками. С 1714 года он начал изготавливать ртутные термометры. Точку замерзания воды Фаренгейт принимал за 32° , точку кипения воды — за 212° . За нуль температуры Фаренгейт принимал точку замерзания смеси воды, льда и нашатыря или поваренной соли. Интересно, что точку кипения воды он назвал только в 1724 году в печатной публикации. Пользовался ли он ею раньше, неизвестно. Существует несколько версий происхождения его шкалы. По одной из них, Фаренгейт изначально принял за 0°F температуру плавления (замерзания) смеси льда и поваренной соли в равных количествах, а за 100°F — нормальную температуру человеческого тела (однако Фаренгейт ошибся в последнем измерении: нормальная температура человеческого тела составляет $97,9^{\circ}\text{F}$). Существует версия, согласно которой за 100 градусов температурной шкалы Фаренгейт принял температуру тела своей жены, которая в момент измерения была нездорова — именно этим и обусловлено смещение стоградусной точки на $2,1^{\circ}\text{F}$, а не погрешностью самого измерения. Так ли это было на самом деле, мы, наверное, никогда не узнаем. Фаренгейт полагал также, что температура (по его шкале) никогда не бывает отрицательной.

В 1731 году французский естествоиспытатель Рене де Реомюр (1683–1757) предложил температурную шкалу, основанную на использовании спирта, обладающего свойством расширяться. За нижнюю реперную точку была принята точка замерзания воды. Градус Реомюра произвольно определил как одну тысячную от объема, который занимает спирт в резервуаре и трубке термометра при нулевой точке. При нормальных условиях точка кипения воды по этой шкале составляет 80 .

Шкала Цельсия. Проверкой шкалы Реомюра занялся Цельсий, что в конечном итоге привело к созданию всем известной шкалы температуры. Однако идея использовать в качестве основных точек шкалы точки замерзания и кипения воды принадлежит вовсе не Цельсию (а флорентийским ученым, см. выше). Ее выдвинул еще 1694 году Карло Ренальдини (1615–1698). Почти через полвека (1742) астроном Цельсий (1701–1744) предложил сделать шкалу 100 -градусной. Только 0 у Цельсия соответствовал кипению воды, а 100° — ее замерзанию! Трудно было бы нам сейчас определять температуру по такой перевернутой шкалой. Но нам повезло: в 1750 году астроном Мартин Штремер (1707–1770) (по некоторым данным, Карл Линней в 1745 году) скорректировал направление шкалы в привычную нам сторону.

В этой шкале имеются две постоянные точки: 0°C — температура сосуществования воды и льда, 100°C — температура кипения чистой воды при нормальном атмосферном давлении (рис. 11.3). Расстояние между этими так на-

зываемыми реперными точками шкалы, поделенное на 100 равных частей, называется градусом температуры (лат. «градус» — шаг, ступень).

Температура по шкале Фаренгейта связана с температурой по шкале Цельсия следующими формулами:

из шкалы Цельсия в шкалу Фаренгейта —

$$t_F = t_C \cdot 9/5 + 32.$$

из шкалы Фаренгейта в шкалу Цельсия —

$$t_C = (t_F - 32) \cdot 5/9.$$

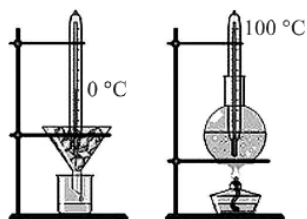


Рис. 11.3

Но этими тремя типами шкал не ограничивалось их общее количество. Если верить «Пирометрии» Ламберта, к концу XVIII века общее количество шкал достигло девятнадцати! К счастью, за два следующих века выжили не все. Потребовалось более ста лет, чтобы из хаоса шкал для измерения температуры вырвались вперед три лидера: Фаренгейт, Реомюр и Цельсий, и еще сто лет для того, чтобы градусы Цельсия стали международным стандартом в научных кругах.

О четвертой шкале (самой правой на рис. 11.4) речь ниже.

Шкала Цельсия уверенно лидирует по популярности во всем мире, однако и о шкале Фаренгейта забыли еще не все. Шкала Фаренгейта используется до сих пор в США.

Используемые в быту температурные шкалы — как Цельсия, так и Фаренгейта — не являются абсолютными и поэтому неудобны при проведении экспериментов.

Газовый термометр. Вещества расширяются при нагревании в широком диапазоне температур не совсем одинаковым образом. Поэтому если разные типы термометров, описанных выше (калиброванные, например, как в случае термометра Цельсия), покажут одинаковую температуру в реперных точках, то в промежуточных могут отличаться, несмотря на тщательно проведенную калибровку. Чтобы уменьшить эффект такого расхождения, необходимо выбрать некоторый стандартный тип термометра, чтобы эти промежуточные температуры можно было измерить точно. Единство измерений температуры стало возможным лишь век спустя благодаря усилиям английского физика У. Томсона (Кельвина) (1824–1907). Он вошел в историю физики тем, что ввел так называемую абсолютную шкалу температуры (см. далее). Томсон отмечал, что температура в термометрах, описанных выше, зависит от выбора тела, тепловое расширение которого используется для измерений. А нельзя ли создать такую шкалу температур, которая бы не зависела от физических свойств вещества термометра? Томсон решил эту задачу. Им был создан так называемый газовый термометр. Газовые термометры имеют то преимущество, что температура, определяемая с их помощью, при малых плотностях и давлениях газа не зависит от природы используемого газа. Все газы при малых плотностях и давлениях ведут

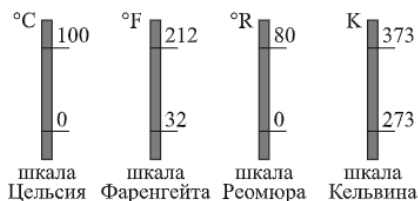


Рис. 11.4. Температурные шкалы

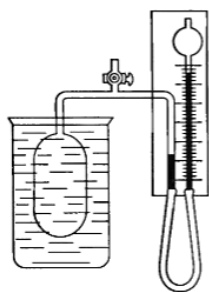


Рис. 11.5. Газовый термометр

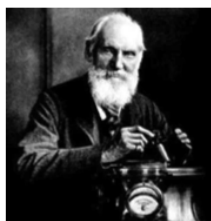


Рис. 11.6. У. Томсон (лорд Кельвин) (1824–1907)

себя одинаковым образом, и в пределе, когда давление газа стремится к нулю, газовый термометр постоянного объема при заполнении его любым газом дает возможность измерить одну и ту же точную температуру, а шкала газового термометра хорошо совпадает с абсолютной шкалой температур. Газовый термометр постоянного объема (рис. 11.5) состоит из термометрического тела — порции газа, заключенной в заполненный газом баллон неизменного объема, соединенный тонкой трубкой с устройством для измерения давления.

Измеряемая физическая величина (термометрический признак), обеспечивающая определение температуры, — давление газа при некотором фиксированном объеме. Постоянство объема достигается тем, что вертикальным перемещением левой трубки уровень в правой трубке манометра доводится до одного и того же значения (опорной метки), и в этот момент производится измерения разности высот уровней жидкости в манометре. Учет различных поправок (например, теплового расширения стеклянных деталей термометра, адсорбции газа и т. д.) позволяет достичь большой точности измерения температуры, составляющей тысячные доли градуса Кельвина. Газовые термометры используют для градуировки других видов термометров, например жидкостных. Они более удобны на практике, однако шкала жидкостного термометра, проградуированного по

газовому, оказывается, как правило, неравномерной. Это связано с тем, что плотность жидкостей нелинейным образом зависит от их температуры.

Газовые законы. Рассматриваемые ниже законы представляет собой то, что в физике принято называть уравнением состояния вещества, поскольку они описывают характер изменения свойств вещества при изменении внешних условий. При этом для описания состояния газа достаточно задать три макроскопических параметра: объем V , давление p и температуру T . Изменение одного из этих параметров вызывает изменение остальных. Соотношение между тремя этими параметрами называется *уравнением состояния*. В большинстве случаев при переходе газа из одного состояния в другое меняются все его параметры. Так происходит, например, когда газ сжимается под поршнем в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, в результате чего температура газа и его давление растут, а объем уменьшается.

Если одновременно изменяются объем, давление и температура, то на опыте трудно установить какие-либо закономерности. Однако в некоторых случаях изменения одного из параметров газа относительно малы или вообще отсутствуют. В этом случае удастся изучить некоторые закономерности в поведении газа.

Проще сначала рассмотреть газ неизменной массы ($m = \text{const}$), зафиксировать значение одного из макропараметров (V , p или T) и рассмотреть изменение при этом двух других.

Процессы, при которых один из параметров p , V или T остается постоянным при данной массе газа, называют изопроцессами (*isos* в переводе с греческого означает «равный»).

Законы, описывающие изопроцессы в идеальном газе (определение которого ниже), были открыты экспериментально разными учеными.

1. Изотермический процесс. Закон Бойля–Мариотта.

Изотермический процесс — это изопроцесс, происходящий при постоянной температуре: $T = \text{const}$. Для осуществления изотермического процесса надо сосуд, наполненный газом, привести в контакт с термостатом, прибором для поддержания постоянной температуры (см. с. 158). Изотермическим процессом приближенно можно считать процесс медленного сжатия или расширения газа в сосуде с поршнем. Термостатом в этом случае служит окружающая среда.

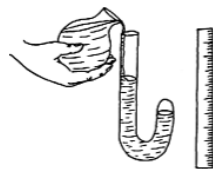


Рис. 11.7. Опыт Р. Бойля

Закон экспериментально открыли независимо друг от друга английский химик и физик Роберт Бойль (1662) и французский физик Эдм Мариотт (1676). Закон Бойля–Мариотта касается изменяющихся параметров газа постоянной массы. Бойль и Мариотт проводили в целом сходные опыты, не имевшие принципиальных отличий. В частности, Бойль использовал изогнутую стеклянную трубку, которую заполнял ртутью через ее открытый конец, тогда как второй был запаян. Изгиб делил трубку на два неравных колена — длинное с открытым концом и короткое с запаянным концом. На стеках сосудов были нанесены деления, посредством которых можно было учесть объем содержащегося в них газа. По мере прибавления ртути в длинном колене жидкий металл оказывал все большее давление на воздух, который оказался «запертым» в коротком колене с запаянным концом. Поэтому Бойль и его молодой ассистент в Оксфорде Ричард Таунли имели возможность наблюдать процесс сжатия воздуха по мере возрастания давления. Рассчитать давление было нетрудно, поскольку объем добавленной в трубку ртути был ученому прекрасно известен. Измерения показали, что при неизменной температуре изменение давления обратно пропорционально изменению объема: $p \sim 1/V$.

Таким образом, закон Бойля–Мариотта утверждает следующее: для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления на объем есть величина постоянная:

$$pv = \text{const, или (для двух состояний)} p_1v_1 = p_2v_2.$$

График изотермического процесса строится в координатах (v, p) при $T = \text{const}$.

С математической точки зрения изотермы — гиперболы.

Из закона Бойля–Мариотта следует, что при постоянной температуре, если изменилось давление газа, изменится и его объем (и наоборот), но при этом произведение pv останется постоянным.

Рассматриваемый закон Бойль впервые описал в 1662 году в работе «В защиту учения относительно эластичности и веса воздуха» и скромно назвал его гипотезой.

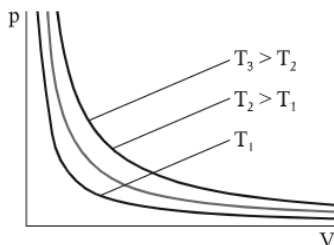


Рис. 11.8. Изотермы закона Бойля–Мариотта

Закон Бойля–Мариотта справедлив лишь в области небольших давлений. При существенном сжатии он уже перестает действовать. Так, воздух отступает от действия закона уже при сжатии до давления 20 260 кПа (примерно в 200 раз больше атмосферного). Его плотность превосходит плотность воздуха при нормальном давлении в 190 раз. Дальше отступления от закона Бойля–Мариотта становятся все более существенными.

Впрочем, и другие газовые законы, которые рассматриваются ниже, справедливы также при низких давлениях и температурах, близких по значению к норме. Под нормой, а точнее нормальными условиями, в физике понимаются условия с температурой $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и атмосферным давлением в 1 атм (101,3 кПа).

2. Изобарический процесс. Закон Шарля–Гей-Люссака. Один из пионеров воздухоплавания Жак Александр Сезар Шарль пришел в науку в результате своего увлечения строительством монгольфьеров — больших воздушных шаров, заполненных разогретым воздухом, которые тогда только-только появились. Ему принадлежит также идея наполнения таких шаров водородом. Закон, носящий его имя, был им сформулирован в 1787 году после ряда опытов с кислородом, азотом, водородом и углекислым газом. Шарль установил, что, если давление не слишком велико и поддерживается постоянным, объем газа увеличивается с ростом температуры почти по линейному закону. Используя найденные значения объема газа при различных температурах и одном и том же давлении, можно построить график зависимости v от t . Эта зависимость изобразится прямой линией-изобарой, как и должно быть согласно этому закону.

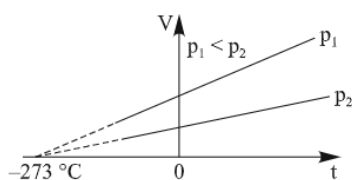


Рис. 11.9. Изобары закона Шарля

Различным давлениям соответствуют разные изобары (рис. 11.9). Так как с ростом давления объем газа при постоянной температуре уменьшается (закон Бойля–Мариотта), то изобара, соответствующая более высокому давлению p_2 , лежит ниже изобары, соответствующей более низкому давлению p_1 . Из графика рис. 11.9 следует, что прямая при своем продолжении пересечет линию нулевого объема в точке $t = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$. И такую величину мы получим для любого газа, для которого справедлив закон Шарля. Отсюда следует вывод, что если бы газ удалось охладить до температуры $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$, то его объем был бы равен нулю. Что невозможно, то есть температура $T = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$, которая называется абсолютным нулем, недостижима! (В действительности это следует из третьего начала термодинамики (см. с. 172).)

Абсолютный нуль температуры лежит в основе шкалы температур, называемой абсолютной или шкалой Кельвина. О ней мы упоминали выше. Выяснилось, что газовый термометр показывает одно и то же значение температуры вне зависимости от того, каким газом заполнен. Например, водородом, кислородом, воздухом или каким-либо другим газом. Поэтому газовый термометр условились считать эталонным (образцовым) термометром. В шкале Кельвина температура отсчитывается от абсолютного нуля (об этом далее), а один кельвин равен $1/273,16$ расстояния от абсолютного нуля до тройной точки (состояния, при котором лед, вода и водяной пар находятся в равновесии). Абсолютный нуль определен как 0 K , что равно примерно $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому абсолютная температура (T) выражается в градусах стоградусной шкалы (t) следующим образом: $T(^{\circ}\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273$.

Описываемый закон мы назвали законом Шарля, который в 1787 году эту зависимость установил, но своих результатов не опубликовал. Следуя исторической справедливости, его следует назвать законом Шарля–Гей-Люссака. (Сам Гей-Люссак в работе 1802 года отмечал, что Шарль за 15 лет до него заметил, что при нагревании давление газа равномерно возрастает.) Обратимся к опытам Гей-Люссака. В 1802 году Ж. Гей-Люссак (1778–1850) исследовал расширение газов и открыл зависимость изменения объема газа от температуры (закон Гей-Люссака). Работал ученый в тяжелых условиях. Лабораторией Гей-Люссаку служило сырое полуподвальное помещение. Ученый, предохраняясь от сырости, работал в деревянных башмаках. Схематически прибор Гей-Люссака показан на рис. 11.10. Исследуемый газ находится в стеклянном баллончике, соединенном с длинной стеклянной трубкой. Газ заперт небольшой каплей ртути в трубке. Так как трубка расположена горизонтально, то давление в баллончике все время остается равным атмосферному. Температура газа с помощью специального нагревателя увеличивается от 0 до 100 °С. За изменением объема можно следить по перемещению капельки ртути.

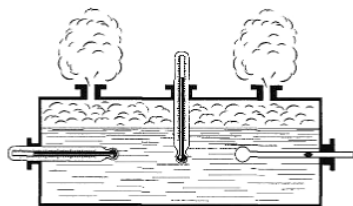


Рис. 11.10. Схема опыта Гей-Люссака

В опыте рассматривались относительные изменения объема газа. Пусть при температуре $t_0 = 0$ °С объем газа равнялся v_0 , а при температуре t он равен v . Тогда относительное изменение объема газа будет $(v - v_0)/v_0$. На основании наблюдений Гей-Люссак установил закон: относительное изменение объема газа данной массы при постоянном давлении прямо пропорционально изменению температуры t : $(v - v_0)/v_0 = \alpha t$, где α — температурный коэффициент объемного расширения.

Температурный коэффициент объемного расширения α численно равен относительному изменению объема газа при изменении его температуры на 1 °С. Измеряя объем газа при двух опорных точках, например 0 и 100 °С, можно найти коэффициент α . Опыт показывает, что при малых плотностях температурный коэффициент объемного расширения одинаков для всех газов: $\alpha = 1/273$ °С⁻¹. Это означает, что газы изменяют свой объем примерно на 1/273 того объема, который каждый из газов занимал при 0 °С, если температура меняется на 1 °С.

3. Изохорный (изохорический) процесс. Закон Шарля. При таком процессе остается постоянным объем. Для осуществления изохорного процесса в газе или жидкости достаточно нагревать (охлаждать) вещество в сосуде, который не изменяет своего объема. Этот закон гласит: *при постоянном объеме давление газа прямо пропорционально абсолютной температуре T : $P \sim T$ при $V = \text{const}$.* Для сравнения того же вещества при двух различных условиях закон можно записать в виде $p_1/T_1 = p_2/T_2$ или $P_1 T_2 = p_2 T_1$.

Хорошо известным примером действия этого закона является баллончик аэрозоля, который взрывается в костре. Это происходит из-за резкого повышения температуры при постоянном объеме.

Если температура газа выражена в градусах Цельсия, то уравнение изохорического процесса записывается в виде

$$P = P_0(1 + \alpha t),$$

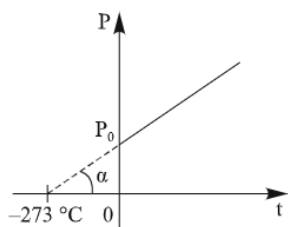


Рис. 11.11

где P_0 — давление при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, α — температурный коэффициент давления газа равный $1/273\text{ град}^{-1}$. График такой зависимости на Pt -диаграмме представлен на рис. 11.11.

Уже отмечалось, что рассмотренные три закона лишь приближенно описывают процессы в газах. Они справедливы лишь в случае малых давлений и плотностей газа. При этом температура должна быть заметно выше той, при которой газы переходят в конденсированное состояние.

Закон Клайперона. Физическое состояние массы газа определяется, как уже отмечалось, тремя параметрами: давлением p , объемом V и температурой T . Рассмотренные ранее газовые законы получены в предположении, что один из параметров поддерживается постоянным. Оказалось возможным объединить все три параметра в одном законе и получить связь между ними в так называемом уравнении состояния, которое в общем виде задается выражением $f(p, V, T) = 0$, где каждая из переменных является функцией других.

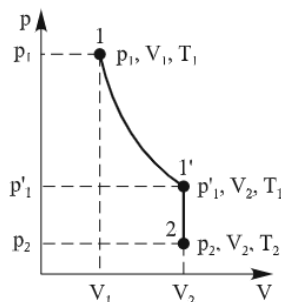


Рис. 11.12. К выводу уравнения Клайперона (terver.ru)

Французский инженер и физик Б. Клапейрон (1799–1864) получил уравнение состояния идеального газа, объединив законы Бойля–Мариотта и Гей-Люссака. Пусть данная масса газа занимает объем V_1 , образует давление p_1 и находится при температуре T_1 . В другом произвольном состоянии масса газа описывается параметрами p_2, V_2, T_2 . Переход из состояния 1 в состояние 2 осуществляется в виде двух процессов: 1) изотермического (изотерма 1–1'); 2) изохорного (изохора 1'–2) (рис. 11.12). В соответствии с законами Бойля–Мариотта и Гей-Люссака запишем

$$p_1 v_1 = p'_1 v_2, \quad p'_1 / p_2 = T_1 / T_2.$$

Исключив из этих двух уравнений p'_1 , получим

$$p_1 v_1 / T_1 = p_2 v_2 / T_2.$$

Так как состояния 1 и 2 были выбраны произвольно, то для данной массы газа величина pV/T остается постоянной, т. е. $pV/T = B = \text{const}$. Полученное выражение является законом Клайперона. Мы еще вернемся к этому закону в дальнейшем и получим выражение для константы B .

Давление смеси газов. Давление в смеси газов исследовалось Дальтоном (1766–1844). Им было установлено, что результирующее давление в смеси газов определяется суммарным давлением всех компонентов. Закон Дальтона, сформулированный им в 1801 году, звучит так: *давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов* (см. рис. 11.13).

Например, воздух в комнате, где мы находимся, представляет собой смесь нескольких газов, в основном азота (около 80 %) и кислорода (около 20 %). Парциальное давление каждого из этих газов — это давление, которое имел бы газ, если бы он один занимал весь объем. К примеру, если бы все газы, кроме азота, удалили из комнаты, то давление того, что осталось, и было бы парциальным

давлением азота. Этот закон находит свое объяснение в молекулярно-кинетической теории газов, о которой отдельный рассказ. Строго говоря, закон применим только к идеальным газам, но с достаточно хорошим приближением он описывает также и реальные газы.

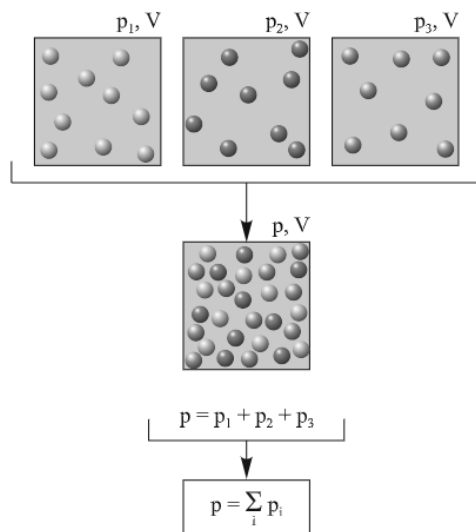


Рис. 11.13

Итак, мы справились с первой поставленной задачей — описали макроскопическое поведение газа. В продолжение нашего путешествия мы расскажем, как физики, исследуя самое простое состояние вещества, пришли к фундаментальным открытиям.

За пределами видимого мира

Успешные попытки ответить на вопрос: из чего состоит вещество? Полученные оценки размеров молекул и их число поражают воображение. Ученые поняли процессы кипения жидкости и объяснили механизм распространения запаха. Долгая история теплоты нашла свое объяснение. Невозможность вечного двигателя. Абсолютный нуль температуры оказывается недостижимым.

12. *Физики выходят за пределы непосредственных восприятий. Молекулярное строение вещества. Закон Авогадро. Закон Клапейрона–Менделеева. Какой размер у молекул. Законы идеального газа. Температура с точки зрения молекулярно-кинетической теории (МКТ). Барометрическая формула и определение числа Авогадро. Распределение Максвелла. Экспериментальная проверка распределения Максвелла (опыт Штерна). Средняя длина пробега молекул в газе. Эффективное сечение столкновений. Диффузия. Испарение, кипение жидкости и поверхностное натяжение с точки зрения МКТ. Реальные газы.*

К середине XIX века представление о молекулах и атомах все шире внедрялось в умы ученых. Физика выходила за пределы доступных человеку непосредственных восприятий. Этому предшествовали открытия, сделанные ранее. Огромное значение для развития молекулярной гипотезы строения вещества имел открытый еще в 1811 году Амедео Авогадро (1776–1856) закон (закон Авогадро).

Закон Авогадро. Французский химик Антуан-Лоран Лавуазье (1743–1794) подметил, что для того, чтобы кислород, соединяясь с водородом, образовал воду, необходимо взять на один объем его двойной объем водорода. В дальнейшем Гей-Люссак нашел, «что соединения газообразных тел друг с другом всегда происходят в очень простых отношениях, так что с одним объемом одного газа соединяется 1, 2 и самое большее 3 объема другого». В 1808 году Гей-Люссак (совместно с немецким естествоиспытателем Александром Гумбольдтом) сформулировал так называемый закон объемных отношений, согласно которому соотношение между объемами реагирующих газов выражается простыми целыми числами: например, 1 объем хлора соединяется с 1 объемом водорода, давая 2 объема хлороводорода и т. д. Этот закон в то время мало что давал ученым, поскольку не было единого мнения о том, из чего состоят частицы разных газов. Не существовало и четкого различия между такими понятиями, как атом, молекула, корпускула. В 1811 году Авогадро, тщательно проанализировав результаты экспериментов Гей-Люссака и других ученых, пришел к выводу, что закон объемных отношений позволяет понять, как же устроены молекулы газов.

«Первая гипотеза, — писал он, — которая возникает в связи с этим и которая представляется единственно приемлемой, состоит в предположении, что число составных молекул любого газа всегда одно и то же в одном и том же объеме...» А «составные молекулы» (сейчас мы их называем просто молекулами), по мысли Авогадро, состоят из более мелких частиц — атомов. Тремя годами позже Авогадро изложил свою гипотезу еще более четко и сформулировал ее в виде закона, который носит его имя: *«Равные объемы газообразных веществ при одинаковом давлении и температуре содержат одно и то же число молекул, так что плотность различных газов служит мерой массы их молекул...»* Это добавление было очень важным: оно означало, что можно, измеряя плотность разных газов, определять относительные массы молекул, из которых эти газы состоят. Действительно, если в 1 л водорода содержится столько же молекул, что и в 1 л кислорода, то отношение плотностей этих газов равно отношению масс молекул. Во времена Авогадро его гипотезу невозможно было доказать теоретически. Но эта гипотеза давала простую возможность экспериментально устанавливать состав молекул газообразных соединений и определять их относительную массу.

Если следовать современной терминологии, то химия оперирует в системе СИ понятием моля. Моль — одно из важнейших понятий в химии, это своего рода звено для перехода из микромира атомов и молекул в обычный макромир граммов и килограммов. Латинское слово *moles* означает массу, а кула (*-cula*) имеет уменьшительное значение, т. е. слово «молекула» можно перевести как «маленькая масса». Этот термин первоначально использовался для обозначения любой небольшой частички материи.

Моль — это масса вещества, выраженная в граммах, число которых равно его молекулярной массе. Например, 1 моль воды — это 18 г воды, так как ее молекулярная масса равна 18.

Химикам удобнее оперировать, в силу закона действующих масс, именно молями, так как вещества реагируют между собой в количествах, пропорциональных молям.

При этом молярный объем — объем одного моля вещества, величина, получающаяся от деления молярной массы на плотность.

Так как моль любого вещества содержит вполне определенное, постоянное для всех веществ количество молекул, то, как следствие из закона Авогадро, один моль любого газа (точнее, идеального газа, см. далее) при одинаковых условиях занимает одинаковый объем, равный при нормальных условиях 22,4 л. Например, экспериментально установлено, что масса 1 литра кислорода при нормальных условиях равна 1,43 грамм. Следовательно, объем, занимаемый при тех же условиях одним молем кислорода (32 грамма), составит $32 : 1,43 = 22,4$ литра. То же число получим, рассчитав объем одного моля водорода, диоксида углерода и т. д.

Этими результатами воспользовался Д. И. Менделеев, чтобы скорректировать закон Клайперона, о котором рассказано выше. Из закона Клайперона следует $pV/T \sim mT$. Это соотношение связывает все важные для описания состояния газа величины. Чтобы получить точное равенство, необходимо включить некоторый коэффициент. Но он оказывается различным для разных газов. Он станет одинаковым для всех газов, если вместо массы m использовать число молей. Д. И. Менделеев (1834–1907) сопоставил уравнение Клапейрона с законом Авогадро, отнеся написанное уравнение к одному молю, используя молярный объем V_m . По закону Авогадро, при одинаковых p и T моли всех газов занимают

одинаковый молярный объем V_m , поэтому постоянная B будет равной для всех газов. Эта общая для всех газов постоянная обозначается R и называется универсальной газовой постоянной. Для одного моля вещества уравнения Клайперона можно записать в виде $pV = RT$.

Числовое значение R , получившей название молярной газовой постоянной, найдено из приведенного закона, учитывая, что моль газа при нормальных условиях ($p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 273,15$ К) занимает объем $V_m = 22,41 \times 10^{-3}$ м³/моль). Отсюда получим значение универсальной газовой постоянной: $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

От уравнения для моля газа можно перейти к уравнению для произвольной массы газа. Если при данных давлении и температуре один моль газа занимает молярный объем V_m , то при тех же условиях масса m газа займет объем $V = (m/M)V_m$, где M — молярная масса (масса одного моля газа). Единица молярной массы — килограмм на моль (кг/моль). Получаем уравнение для массы m газа:

$$pV = (m/M)RT.$$

Это уравнение называется *уравнением Клайперона–Менделеева*. Отношение m/M есть число молей вещества. Если обозначить его через n , закон Клайперона–Менделеева примет вид

$$pV = nRT.$$

Этот закон справедлив для так называемых идеальных газов. Свое название закон получил потому, что реальные газы не подчиняются полностью этому закону, особенно при высоких давлениях, что уже отмечалось выше.

Сам Авогадро не делал оценок числа молекул в заданном объеме, но понимал, что это очень большая величина. К середине девятнадцатого века значение числа Авогадро, определенное из измерений коэффициента диффузии и вязкости газов, оценивалось как $5 \cdot 10^{22}$ моль⁻¹. С тех пор было разработано большое число независимых методов определения числа Авогадро. Превосходное совпадение полученных значений является убедительным свидетельством реального существования молекул. Современные данные ($6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹) были получены лишь в начале прошлого века.

После того как гипотеза Авогадро стала общепризнанной, ученые получили возможность не только правильно определять состав молекул газообразных соединений, но и рассчитывать атомные и молекулярные массы.

В 1865 году австрийский физик Иоганн Йозеф Лошмидт (1821–1895) определил число молекул в 1 см³ газа при нормальных условиях (нормальные условия — температура $T_0 = 273$ К (0 °С) и давление $P_0 = 1$ атм. (или 760 мм рт. ст.)). Оно получило название «постоянная (или число) Лошмидта».

Обозначается постоянная Лошмидта N_L или n_0 :

$$N_L = P_0/kT_0 \approx 2,69 \cdot 10^{25}/\text{м}^3.$$

Число Лошмидта так связано с числом Авогадро:

$$N_L = N_A/V_m.$$

здесь V_m — молярный объем идеального газа при нормальных условиях, равный 22,4 дм³; N_A — число Авогадро. Как видно, число Лошмидта легко переводится в более привычное число Авогадро.

Какой величины молекула? Интригующий вопрос о размерах молекул пытался разрешить опытным путем Джон Уильям Стретт (лорд Рэлей) (1842–1919). Он произвел следующий опыт. На поверхность воды поместили каплю масла. В его опытах использовалась капля оливкового масла, растекавшаяся по поверхности воды. Масло стало растекаться, образуя пленку. По мере растекания масла пленка становилась все тоньше и тоньше. Через некоторое время растекание прекратилось. Растекание продолжается до тех пор, пока поверхность воды не останется покрытой всего лишь одним слоем молекул масла. В этом случае линейный размер молекул можно оценить как отношение объема исходной капли V к предельной площади масляной пленки S . Рэлей предположил, что это произошло, когда все молекулы масла образовали мономолекулярный слой, то есть пленку толщиной в одну молекулу. Здесь, конечно, неявно использовано предположение о том, что каждая молекула в жидкости занимает определенный удельный объем, равный V/N (N — число молекул), не зависящий от формы, которую приняла жидкость. Разделив объем капли на площадь образовавшегося пятна, физик нашел диаметр одной молекулы масла. Размеры молекул оцениваются равными $d \sim 1,6 \cdot 10^{-7}$ см. Можно оценить размер молекулы, используя число Авогадро. Так как один моль идеального газа при нормальных условиях занимает объемом 22,4 л, а число Авогадро — это полное число молекул в одном моле вещества, или в 22,4 л газа при нормальных условиях. Например, поскольку масса 22,4 л газообразного H_2 составляет $2,016 \cdot 10^{-3}$ кг, масса одного атома водорода равна $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Если считать, что в твердом теле атомы расположены вплотную друг к другу, то число Авогадро позволит приблизительно оценить радиус r , скажем, атомов алюминия. Для алюминия 1 моль равен 0,027 кг, а плотность — $2,7 \cdot 10^3$ кг/м³. Откуда имеем для радиуса атома алюминия $r \sim 1,6 \cdot 10^{-10}$ м. Так, первые оценки показали, что размеры атомов порядка 10^{-8} см, а их вес порядка от 10^{-24} до 10^{-22} г. Физики и химики начали оперировать с дотоле непредставимыми размерами!

Молекулярно-кинетическая теория. Закон идеального газа. В возникшей в XIX веке молекулярно-кинетической теории строение вещества, в основном газов, рассматривалось с точки зрения ряда упрощающих допущений.

Согласно этой теории газы состоят из огромного числа отдельных весьма малых частиц,двигающихся по всевозможным направлениям и со всеми возможными скоростями; частицы эти связаны между собой весьма слабым притяжением, и потому в большей части своего пути они двигаются по инерции прямолинейно, пока не встретят другие частицы, принадлежащие тому же газу или другим телам; тогда происходит удар, сопровождающийся изменением направления и величины скорости, после чего частицы продолжают двигаться опять прямолинейно, до новых постоянно повторяющихся встреч.

Сделанные допущения относительно молекул газа тем не менее достаточно хорошо описывают и реальные газы, находящиеся при низком давлении и далеко от точки сжижения или конденсации.

Итак, простейшей моделью рассматриваемой молекулярно-кинетической теории является *модель идеального газа*. В кинетической модели идеального газа молекулы рассматриваются как идеально упругие шарики, взаимодействующие между собой и со стенками сосуда, в котором находится газ, только во время уп-

ругих столкновений и описываются законами классической механики. И хотя в промежутке между столкновениями молекул друг с другом действуют силы притяжения, соответствующая им потенциальная энергия мала по сравнению с кинетической энергией движения молекул и ею пренебрегают. Суммарный объем всех молекул предполагается малым по сравнению с объемом сосуда. То есть расстояние, разделяющее молекулы, много больше диаметра молекул.

Задача молекулярно-кинетической теории состоит в том, чтобы установить связь между микроскопическими (масса, скорость, кинетическая энергия молекул) и макроскопическими параметрами (давление, объем, температура).

В качестве первого примера применения молекулярно-кинетической теории рассмотрим давление, оказываемое газом на стенку сосуда.

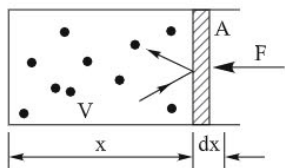


Рис. 12.1. К выводу уравнения для давления газа

Давление газа. Предположим, что газ находится в ящике, одна стенка которого представляет собой поршень, способный перемещаться (рис. 12.1). Найдем силу, с которой действуют на поршень находящиеся внутри ящика атомы. О поршень ударяются атомы, движущиеся внутри объема V со всевозможными скоростями. Пусть вне ящика — сплошной вакуум. Что же произойдет? Если предоставить поршень самому себе и не придерживать его, то с каждым ударом молекулы он будет приобретать небольшой импульс и постепенно будет вытолкнут совсем из ящика. Чтобы удержать его в ящике, придется приложить силу F . Говоря о силе, мы будем относить ее к единице площади: если площадь поршня равна S , то действующая на него сила будет пропорциональна площади. Какова должна быть эта сила?

Для расчета этой силы сначала определим среднее число столкновений молекул, происходящих за единицу времени с поверхностью стенки сосуда. Выделим в газе три взаимно перпендикулярные оси, соответствующие декартовой системе координат. Если в сосуде содержится N молекул, то из-за огромного их числа логично предположить, что в любой момент времени вдоль каждого из направлений будут двигаться примерно $N/3$ молекул. Очевидно, что в направлении самой стенки сосуда перпендикулярно к ней будет в среднем двигаться $1/6$ часть всех молекул (одна — на стенку, другая — от нее). Пусть есть плоский элемент поверхности на стенке сосуда ΔS . Предполагается для простоты, что все молекулы движутся с одинаковой скоростью v . Тогда за время Δt до элемента стенки ΔS долетят все движущиеся по направлению к нему молекулы, которые заключены в объеме цилиндра с основанием ΔS и высотой $v\Delta t$ (рис. 12.1). Если $n = N/V$ — число молекул в единице объема, то число молекул, долетевших до стенки и ударившихся об нее, равно $\Delta V = (n/6)v\Delta S\Delta t$.

Соответственно, число ударов молекул об единичную площадку в единицу времени оказывается равным $n_c = \Delta V/(\Delta S\Delta t) = (1/6)nv$.

Каждая молекула, летящая к стенке, при столкновении с ней передает стенке свой импульс. Поскольку скорость молекулы при упругом столкновении со стенкой меняется от величины v до $-v$, величина передаваемого импульса равна $2mv$, где m — масса молекулы. Сила, действующая на поверхность стенки ΔS за время Δt , определяется величиной полного импульса, передаваемого всеми молекула-

ми, достигнувшими стенки за этот промежуток времени, то есть $F = 2mn_p c \Delta S / \Delta t$, где m — масса молекулы, а n_p определено выше. Для величины давления $p = F / \Delta S$ в этом случае находим $p = (1/3)nm\overline{v^2}$. Для получения окончательного результата нужно отказаться от предположения об одинаковой скорости молекул, выделив независимые группы молекул, каждая из которых имеет свою приблизительно одинаковую скорость. Тогда средняя величина давления находится усреднением квадрата скорости по всем группам молекул. Так, для молекул, ударяющихся о стенку в направлении оси x , имеем $\langle v_x^2 \rangle = (v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots + v_{xN}^2) / N$. Так как квадрат любого вектора в силу теоремы Пифагора равен сумме квадратов его составляющих, поэтому для любой скорости имеем $\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle$. Так как предполагается, что скорости молекул распределены хаотически, то не имеется какого-либо выделенного направления движения, тогда $\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle = \langle v^2 \rangle / 3$.

Окончательно получим $p = 1/3nm\langle v^2 \rangle$. Полученное соотношение называют основным уравнением молекулярно-кинетической теории.

Это выражение можно переписать следующим образом: $p = 2/3nE_k$, где $E_k = m\langle v^2 \rangle / 2$ — средняя кинетическая энергия молекул газа (в расчете на одну молекулу).

Закон идеального газа. Температура с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Записанное выше выражение для давления можно записать в более наглядном виде, если переписать его следующим образом:

$$pV = 2/3N(1/2m\langle v^2 \rangle).$$

Сравнивая эту формулу с законом идеального газа из предыдущей части, видим, что они согласуются между собой, если $1/2(m\langle v^2 \rangle) = 3/2 kT$. Постоянная k называется константой Больцмана и равна приблизительно $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Из приведенного соотношения следует, что средняя кинетическая энергия молекул газа прямо пропорциональна абсолютной температуре. Чем выше температура, тем больше средняя скорость движения молекул газа.

Барометрическая формула. Экспериментальное определение числа Авогадро. Поле силы тяжести и тепловое движение — два конкурирующих фактора, обуславливающих в своем противодействии динамически уравновешенное устойчивое состояние нашей атмосферы. Поле силы тяжести препятствует выбросу под действием теплового движения молекул в космос. Тепловое же движение стремится «разбросать» молекулы равномерно по всему пространству, выровнять их концентрацию во все доступном им объеме. Оно не позволяет силе тяжести собрать все молекулы на поверхности Земли, на «дне воздушного океана». В итоге и создается некоторое неравномерное распределение молекул по высоте.

Возьмем произвольную цилиндрическую колонну газа с площадью сечения S и высотой h . Тогда вес выделенного объема газа будет равен $F = Mg = \rho Vg = \rho ghS$, где ρ — плотность газа. Давление газа P , равное F/S , запишется

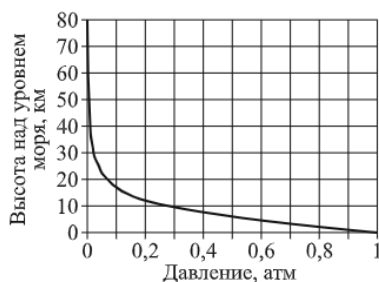


Рис. 12.2. Распределение давления воздуха в атмосфере Земли в зависимости от высоты

следующим образом: $P = \rho gh$. Теперь представим себе такую колонну в атмосфере и выделим в ней тонкий слой воздуха высотой dh . Такой слой вызывает изменение давления на величину $dP = -\rho g dh$. Здесь поставлен знак минус, поскольку с высотой давление падает.

Рассматривая атмосферный воздух как идеальный газ, воспользуемся уравнением Клапейрона–Менделеева, чтобы выразить плотность ρ через давление P :

$$PV = M/mRT \Rightarrow P = \rho/mRT.$$

Отсюда следует, что плотность определяется формулой

$$\rho = mP/RT.$$

Подставляя это в дифференциальное соотношение для dP , находим

$$dP = -(mP/RT)gdh$$

или, разделяя переменные, получим

$$dP/P = -(mg/RT)dh.$$

Интегрирование приводит к следующему уравнению:

$$P = C \exp[(-mg/RT)h].$$

Константа C определяется из начального условия $P(h = 0) = P_0$, где P_0 — это среднее атмосферное давление над уровнем моря. Таким образом, зависимость атмосферного давления от высоты выражается формулой

$$P = P_0 \exp[(-mg/RT)h].$$

Исходя из кинетической теории, можно было бы получить включающее число Авогадро выражение, описывающее уменьшение плотности газа (например, воздуха) с высотой столба этого газа. Для этого необходимо подсчитать число молекул в 1 см^3 газа на двух разных высотах; тогда, воспользовавшись указанным выражением, мы могли бы найти N_A . К сожалению, сделать это невозможно, поскольку молекулы невидимы. Однако Ж. Перрен (1870–1942) показал, что упомянутое выражение справедливо и для суспензий коллоидных частиц, которые видны в микроскопе. Учтем, что $P = nkT$, а $P_0 = n_0 kT$, где n — концентрация молекул на высоте h , n_0 — концентрация молекул на высоте $h = 0$.

Произведение mgh есть потенциальная энергия молекул в поле тяготения. Обозначая ее через W_n , запишем барометрическую формулу для распределения концентрации молекул по высоте: $n = n_0 e^{-W_n/kT}$.

Написанное соотношение называется распределением Больцмана во внешнем потенциальном поле. Ж. Перрен в 1909 году исследовал поведение броуновских частиц в эмульсии гуммигута (сок деревьев). Частицы имели малый размер и осматривались с помощью микроскопа, который имел глубину поля 1 мкм .

Броуновское движение — это непрерывное хаотическое движение малых частиц, взвешенных в жидкости или газе. Это явление впервые наблюдал Роберт Броун (1773–1858), когда рассматривал в микроскоп движение цветочной пыльцы, взвешенной в воде.

Перемещая микроскоп в вертикальном направлении, можно было исследовать распределение частиц по высоте. Применяв к ним распределение Больцмана, Перрен получил следующее значение для числа Авогадро: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$, что весьма близко к современным данным.

Распределение молекул по скоростям. Число молекул в газе столь велико, что применение механики Ньютона к описанию их движения оказалось невозможным. Эти молекулы газа находятся в беспорядочном хаотическом движении. При своем движении они постоянно сталкиваются, их скорость при этом изменяется. Она может возрастать и убывать. Однако среднеквадратичная скорость остается неизменной. Это объясняется тем, что в газе, находящемся при определенной температуре, устанавливается некоторое стационарное, не меняющееся со временем распределение молекул по скоростям, которое подчиняется определенному статистическому закону. Скорость отдельной молекулы с течением времени может меняться, однако доля молекул со скоростями в некотором интервале скоростей остается неизменной. Нельзя ставить вопрос о том, сколько молекул обладает определенной скоростью. Дело в том, что, хоть число молекул очень велико в любом, даже малом, объеме, количество значений скорости также сколь угодно велико (как чисел в последовательном ряде), и может случиться, что ни одна молекула не обладает заданной скоростью.

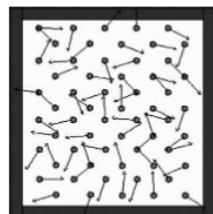


Рис. 12.3. Иллюстрация модели идеального газа

Задачу о распределении молекул по скоростям следует сформулировать следующим образом. Пусть в единице объема n молекул. Тогда нас будет интересовать, какая доля молекул $\Delta n/n$ имеет скорости от v_1 до $v_1 + \Delta v_1$? Это статистическая задача. Из-за огромного количества молекул практически нельзя определить значения их скоростей в какой-либо момент, но возможно, считая скорость молекул непрерывной случайной величиной, указать *распределение молекул по скоростям*.

Несмотря на беспорядочный характер движения молекул, их распределение по скоростям носит характер определенной закономерности. В 1859 году Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) получил формулу, дающую распределение молекул по скоростям идеального газа, которая называется распределением Максвелла.

Интересные воспоминания, относящиеся к истории появления означенного распределения Максвелла, оставил нам Пётр Капица. «Происходило это в Кембридже, во второй половине прошлого века. Теоретическую физику тогда преподавал Стокс. К нему пришел сдавать аспирантский экзамен один молодой человек... Стокс, не стесняясь, ставил часто неразрешимые задачи, чтобы посмотреть, знает ли студент, что эта задача неразрешима. Он ставил, например, такую задачу: найти распределение скоростей в газе. Тогда это распределение скоростей не было известно. Бернулли и все остальные считали, что скорости примерно равны.

Молодой человек, к удивлению Стокса, решил эту задачу, и решил правильно. Вы догадываетесь, что этот молодой человек был не кто иной, как Максвелл. Таким образом, открытие закона распределения скоростей молекул в газе было сделано Максвеллом на экзамене» (Капица П. Л. Эксперимент. Теория. Практика. М.: «Наука», 1987. С. 257).

В распределении Максвелла — в равновесном состоянии — параметры газа (давление, объем и температура) остаются неизменными, однако микросостояния — взаимное расположение молекул, их скорости — непрерывно изменяются. Функция распределения молекул по скоростям имеет вид

$$F(v) = 4\pi N(m/2\pi kT)^{3/2} v^2 \exp(-mv^2/2kT).$$

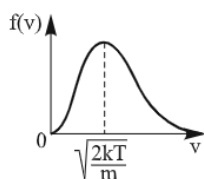


Рис. 12.4. Распределение скоростей молекул в идеальном газе

График распределения Максвелла показан на рис. 12.4. Скорость, соответствующая вершине кривой, является наиболее вероятной скоростью v_p , и, так как кривая несимметрична (смещена вправо), наиболее вероятная скорость не совпадает со средней.

Величина $f(v)dv$ представляет собой число молекул, скорости которых лежат в интервале от v до $v + \Delta v$. В приведенной формуле m — масса отдельной молекулы, T — абсолютная температура, а k — постоянная Больцмана. Суммирование по всем молекулам дает их общее число N :

$$\int f(v) dv = N.$$

Наиболее вероятная скорость — это такая скорость, которой обладает большая часть молекул. Она соответствует максимуму кривой распределения Максвелла. В максимуме производная функции распределения равна нулю: $df(v)/dv = 0$. Отсюда находим $v_p = \sqrt{2kT/m} \approx 1,41\sqrt{kT/m}$.

Средняя скорость находится путем интегрирования выражения $\int f(v) dv$ в пределах от 0 до ∞ . Средняя скорость молекул $\langle v \rangle = \sqrt{8/\pi} \sqrt{2kT/m} \approx 1,6\sqrt{kT/m}$. Аналогично находится среднеквадратичная скорость:

$$V_{\text{ср.кв.}} = \langle v^2 \rangle = \sqrt{3kT/m} \approx 1,73\sqrt{kT/m}.$$

Распределение молекул по скоростям (и тем самым подтверждение молекулярно-кинетической теории) было продемонстрировано в опыте немецкого физика Отто Штерна (1888–1969) в 1920 году. Для проведения опыта Штерном был изготовлен прибор, состоящий из двух цилиндров разного радиуса, ось которых совпадала, и на ней располагалась платиновая проволока с нанесенным слоем серебра. В пространстве внутри цилиндров посредством непрерывной откачки воздуха поддерживалось достаточно низкое давление. При пропускании электрического тока через проволоку достигалась температура плавления серебра (961 °C), из-за чего атомы начинали испаряться и летели к внутренней поверхности

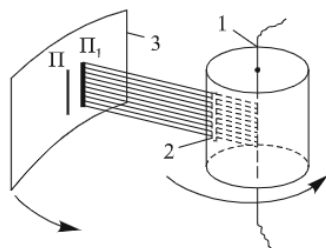


Рис. 12.5. Схема опыта О. Штерна: 1 — платиновая проволока с нанесенным на нее слоем серебра; 2 — щель, формирующая пучок атомов серебра; 3 — пластина, на которой осаждаются атомы серебра; П и П₁ — положения полосок осажденного серебра

сти малого цилиндра равномерно со скоростью v , соответствующей подаваемому на концы нити напряжению. Во внутреннем цилиндре была проделана узкая щель, через которую при неподвижном приборе и при вращении атомы могли беспрепятственно пролетать далее. Стенки цилиндров специально охлаждались, что способствовало оседанию попадающих на них атомов. В таком состоянии на внутренней поверхности большого цилиндра образовывалась достаточно четкая узкая полоса серебряного налета, расположенная прямо напротив щели малого цилиндра. Затем всю систему начинали вращать с некой достаточно большой угловой скоростью ω . При этом полоса налета смещалась в сторону, противоположную направлению вращения, и теряла четкость. Измерив смещение s наиболее темной час-

ти полосы от ее положения, когда система покоилась. Штерн определил время полета, через которое нашел скорость движения молекул:

$$t = s/u = l/v = ul/s,$$

где s — смещение полосы, l — расстояние между цилиндрами, а u — скорость движения точек внешнего цилиндра.

Найденная таким образом скорость движения атомов серебра совпала со скоростью, рассчитанной по законам молекулярно-кинетической теории, а тот факт, что получившаяся полоска была размытой, свидетельствовал в пользу того, что скорости атомов различны и распределены по некоторому закону: атомы, двигавшиеся быстро, смещались относительно полосы, полученной в состоянии покоя, на меньшие расстояния, чем те, которые двигались медленнее.

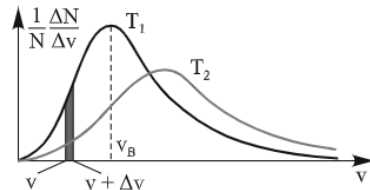


Рис. 12.6. Распределение скоростей молекул для двух различных температур

Распределение Максвелла можно рассматривать как распределение молекул не только по скоростям, но и по кинетическим энергиям (так как эти понятия взаимосвязаны).

Распределение Максвелла для данного газа зависит только от температуры. Максвелл был первым, кто понял, что средняя энергия молекул газа может служить для строгого определения температуры газа, будучи пропорциональной ей. Чем сильнее нагревается газ, тем быстрее начинают двигаться его атомы. При этом теплота представляет собой неупорядоченное, хаотическое движение атомов; она не является свойством одного или нескольких атомов, и, чтобы говорить о теплоте, бессмысленно рассматривать отдельный горячий атом, а нужно иметь огромное множество атомов. Непрерывно охлаждая газ, мы ограничиваем движение атомов, пока оно не прекращается совсем при абсолютном нуле температуры.

Распределение Максвелла также применимо для электронных процессов переноса и других явлений.

Л. Больцман (1844–1906) был одним из немногих, осознавших значение работ Максвелла. Он обобщил закон распределения молекул по скоростям Максвелла, установленный в 1859 году, на более общий случай идеального газа, находящегося во внешнем силовом поле (поле тяжести). В дальнейшем этот закон получил название «закон распределения Максвелла–Больцмана».

Пример. Найти относительное число молекул идеального газа, скорости которых отличаются не более чем на $\delta = 1\%$ от значения средней квадратичной скорости. Какова вероятность w того, что скорость молекулы газа лежит в указанном интервале?

Решение.

Так как интервал скоростей $\Delta v = 2(\delta \langle v^2 \rangle)$ весьма мал, следовательно, функцию распределения $\Delta N(v) = 4\pi N(m/2\pi kT)^{3/2} \exp(-m\langle v^2 \rangle/2kT) \Delta v$ можно записать так:

$$\Delta N/N = 4\pi N(m/2\pi kT)^{3/2} \exp(-m\langle v^2 \rangle/2kT) \langle v^2 \rangle 2(\delta \langle v^2 \rangle).$$

Подставляя для средней квадратичной скорости выражение $\langle v^2 \rangle = \sqrt{3kT/m}$, имеем

$$\Delta N/N = 4\pi(m/2\pi kT)^{3/2} e^{-(3/2)} (\sqrt{3kT/m}) 2\delta = 8\delta/\pi(3/2)^{3/2} e^{-(3/2)}.$$

Окончательно получим

$$\Delta N/N = 1,85 \cdot 10^{-2} \cdot w = \Delta N/N = 1,85 \, \%.$$

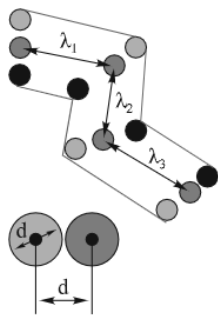


Рис. 12.7. Ломаная траектория молекулы как следствие ее столкновений с другими молекулами

Средняя длина свободного пробега. Если внести в помещение пахучее вещество, то в отсутствие конвективных потоков мы не сразу ощутим запах. И это несмотря на то, что скорость молекул газа порядка 500 м/с. Клаузиус объяснил это явление тем, что молекула газа не все время движется свободно, а время от времени испытывает столкновения с другими молекулами. Между двумя последовательными столкновениями молекулы движется равномерно прямолинейно, проходя при этом некоторый путь, который называется длиной свободного пробега. В общем случае длина пути между последовательными столкновениями различна: $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3 \neq \dots \neq \lambda_n$, но так как мы имеем дело с огромным количеством молекул и они находятся в беспорядочном движении, то можно говорить о средней длине свободного пробега:

$$\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)/n.$$

Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется эффективным диаметром молекулы.

Свободно она пролетает короткое расстояние от одного столкновения до следующего. В результате траектория молекулы описывается ломаной линией с большим количеством звеньев (рис. 12.7). Для количественного описания явления Клаузиус ввел понятие средней длины свободного пробега, то есть среднего расстояния, которое пролетает молекула от одного столкновения до следующего. Этот параметр имеет важное значение для описания явлений переноса — диффузии, внутреннего трения и теплопроводности, которые рассматриваются в дальнейшем.

Будем рассматривать молекулы в приближении идеального газа. То есть каждая молекула представляет собой твердый шарик диаметром d . И в этом приближении найдем значение средней длины свободного пробега λ для газа, состоящего из одинаковых молекул. Молекулы будут сталкиваться друг с другом, если расстояние между их центрами меньше d . Поэтому мы можем рассмотреть одну молекулу с радиусом d , движущуюся в присутствии других частиц, которые будем считать неподвижными. В течение промежутка времени Δt эта молекула столкнется со всеми частицами, лежащими внутри цилиндра объемом $(\pi d^2)n v \Delta t$, где n — концентрация молекул газа, $\langle v \rangle$ — средняя скорость их движения. Средняя длина свободного пробега равняется высоте цилиндра $\lambda = v \Delta t$, который содержит в среднем лишь одну молекулу: $\lambda = 1/(\pi d^2 n)$.

Строгий расчет средней длины свободного пробега, без предположения о неподвижности окружающих молекул (то есть число столкновений зависит

от относительной скорости молекул, а не от $\langle v \rangle$), был дан Максвеллом. Максвелл получил

$$\langle \lambda \rangle = 0,707 / (\pi d^2 n).$$

Можно видеть, что точный расчет не сильно отличается от приближенного. За промежуток времени Δt рассматриваемая молекула совершит в среднем z столкновений. Так как средняя длина свободного пробега равна расстоянию, пройденному молекулой за время Δt , деленному на число столкновений, произошедших за это время, то $z = \langle v \rangle \Delta t / \langle \lambda \rangle$.

Эффективное сечение молекул. В модели идеального газа молекулы взаимодействуют между собой только при столкновении. При столкновении молекулы сближаются до некоторого наименьшего расстояния, которое условно считается суммой радиусов взаимодействующих молекул. Столкновение между одинаковыми молекулами может произойти только в том случае, если их центры сближаются на расстояние, меньшее или равное диаметру d — эффективному диаметру молекулы.

Из рис. 12.8 следует, что две молекулы обязательно столкнутся, если попадут в круг, обозначенный буквой σ (сигма): $\sigma = \pi d^2$. σ называется эффективным сечением рассеяния.

Эффективное сечение в физике характеризует вероятность перехода системы двух сталкивающихся частиц в результате их рассеяния (упругого или неупругого) в определенное конечное состояние. Оно имеет размерность площади. Но оно равно просто геометрической площади лишь в случае столкновения молекул, рассматриваемых как упругие шарики. В иных случаях (например, при столкновении заряженных частиц) эффективное сечение не имеет чисто геометрического смысла. Если эффективное поперечное сечение велико, то это не означает, что молекула большая, а означает только, что вероятность столкновения велика. Ясно, что эффективный поперечник даже у одних и тех же частиц в разных условиях и для различных процессов может быть различным.

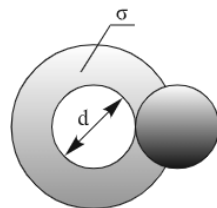


Рис. 12.8. К понятию эффективного сечения

Явление диффузии. В жизни мы часто пользуемся аэрозолями, спреями для тела, духами, различными распылителями комаров, мух и т. п. Когда пьем чай, помешиваем его ложечкой, чтобы быстрее растворился сахар, скленваем предметы... В основе явлений испарения жидкостей, растворения одних веществ в других, распространения запахов лежит явление диффузии (от латинского «распространение», «растекание», «рассеивание») — взаимного проникновения частиц одного вещества между частицами другого вещества при их соприкосновении. Явление диффузии заключается в самопроизвольном перемешивании молекул различных газов или жидкостей. Диффузия наблюдается и в твердых телах. В тех случаях, когда в химически чистом однородном газе концентрация молекул будет различной, наблюдается перенос молекул, приводящий к выравниванию плотностей (или концентраций) молекул. Это явление самодиффузии.

Так как молекулы движутся с огромными скоростями, диффузия должна происходить очень быстро. Если же открыть в комнате сосуд с пахучим веществ-

вом, то запах распространяется довольно медленно. Однако противоречия здесь нет. Молекулы при атмосферном давлении обладают малой длиной свободного пробега и, сталкиваясь с другими молекулами, в основном «стоят» на месте. Этот вопрос обсуждался выше. Рассмотрим явление самодиффузии подробнее. Будем для простоты считать, что плотность неоднородна вдоль оси x , а вдоль других двух осей остается постоянной. Далее будем предполагать, что общее давление распределено равномерно, так что отсутствует гидродинамический поток газа, связанного с градиентом давления. Рассмотрение явления самодиффузии с макроскопической точки зрения было сделано Фиком.

Адольф Евгений Фик (1829–1901) — немецкий физиолог и физик. Ему удалось дважды опубликовать свой закон диффузии, так как он применяется в равной степени в физиологии и в физике. Согласно закону Фика масса газа ΔM , переносимая через площадку ΔS , перпендикулярную к направлению переноса за время Δt , прямо пропорциональна коэффициенту самодиффузии D , зависящему от рода газа, градиенту плотности $\Delta \rho / \Delta x$, величине площадки ΔS и времени наблюдения Δt : $\Delta M = -D(\Delta \rho / \Delta x) \Delta S \Delta t$. Знак минус показывает, что масса газа переносится в направлении убывания плотности. Коэффициент самодиффузии D численно равен массе газа, переносимой за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению переноса, при градиенте плотности равном единице: $D = \Delta M / (\Delta \rho / \Delta t)$.

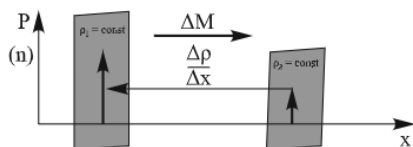


Рис. 12.9

Отношение $j = \Delta M / (\Delta S \Delta t)$ называется плотностью потока. Закон Фика получен экспериментально. Однако можно найти соотношение между коэффициентом диффузии D и средней длиной свободного пробега λ . При этом получается, что $D = (1/3) \langle v \rangle \lambda$. Таким образом, коэффициент диффузии определяется средней длиной свободного пробега и средней арифметической скоростью молекул. Размерность коэффициента диффузии — $\text{м}^2/\text{с}$.

Явления, объясняемые в рамках кинетической теории: испарение и кипение жидкости. Любое вещество при определенных условиях может находиться в различных агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Переход из одного состояния в другое называется фазовым переходом. Испарение и конденсация являются примерами фазовых переходов.



Рис. 12.10. Испарение и конденсация воды в природе

Испарением называется фазовый переход из жидкого состояния в газообразное. *Конденсация* — это процесс, обратный процессу испарения. При конденсации молекулы пара возвращаются в жидкость.

Если сосуд с водой оставить открытым, то уже через довольно короткое время можно видеть, что уровень воды в нем понизится. В этом случае говорят, что вода испаряется, часть ее превращается в пар. С точки зрения молекулярно-кинетической теории испарение — это процесс, при котором с поверхности жидкости вылетают наиболее быстрые молекулы, кинетическая энергия которых превышает энергию их связи с остальными молекулами жидкости (рис. 12.11).

Действительно, если обратиться к распределению Максвелла, то можно видеть, что скорости молекул газа могут изменяться в широких пределах: теоретически от 0 до бесконечности. Молекулы жидкости, находящиеся вблизи от поверхности нагрева и обладающие в данный момент большой скоростью, вылетают в пространство над жидкостью, освобождаясь от притяжения остальных молекул, и становятся свободными. Каждая испаряющаяся молекула преодолевает силы сцепления жидкости и сопротивление внешнего давления при затрате некоторого количества тепловой энергии, подводимой извне.

При этом испарение приводит к уменьшению средней кинетической энергии оставшихся молекул, то есть к охлаждению жидкости (если нет подвода энергии от окружающих тел).

Число молекул, вылетающих с единицы площади поверхности жидкости за одну секунду, зависит от температуры жидкости.

Число молекул, возвращающихся из пара в жидкость, зависит от концентрации молекул пара и от средней скорости их теплового движения, которая определяется температурой пара. Число молекул пара над поверхностью жидкости возрастает до тех пор, пока число возвращающихся в жидкость молекул не сравняется с числом молекул, покидающих жидкость за тот же промежуток времени. То есть возникает состояние равновесия, а о пространстве над жидкостью говорят, что оно насыщено. Давление пара, если он насыщен, называется *давлением насыщенного пара*. Для данного вещества концентрация молекул пара при равновесии жидкости и ее пара определяется их равновесной температурой. Установление динамического равновесия между процессами испарения и конденсации при повышении температуры происходит при более высоких концентрациях молекул пара. Так как давление газа (пара) определяется его концентрацией и температурой, то можно сделать вывод: давление насыщенного пара p_0 данного вещества зависит только от его температуры и не зависит от объема. Действительно, при уменьшении объема пространства над жидкостью возрастет концентрация молекул в газообразном состоянии. Но при этом возрастет

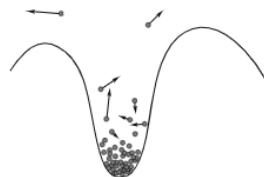


Рис. 12.11. С поверхности жидкости вылетают молекулы, кинетическая энергия которых превышает некоторый энергетический барьер

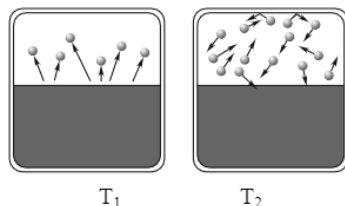


Рис. 12.12. Давление насыщенного пара зависит от температуры ($T_1 > T_2$)

также число молекул, сталкивающихся с поверхностью жидкости и возвращающихся в нее. И через некоторое время динамическое равновесие восстановится. Давление p_0 насыщенного пара очень быстро возрастает с ростом температуры T . Зависимость $p_0(T)$ нельзя получить из законов идеального газа. В насыщенном паре при повышении температуры возрастает не только средняя кинетическая энергия движения молекул, но и их концентрация. Поэтому давление насыщенного пара при повышении температуры возрастает быстрее, чем давление идеального газа при постоянной концентрации молекул. Если газ (пар) состоит из молекул того же сорта, что и основная масса жидкости, то процесс перехода молекул из газообразного состояния в жидкое носит название *конденсации*. Если жидкостью поглощаются газообразные молекулы иного сорта, такой процесс называется *абсорбцией*. Выделяющаяся при этом теплота называется соответственно теплотой конденсации или теплотой абсорбции. Скорость абсорбции (конденсации) определяется числом молекул газа, подлетающих к поверхности жидкости в единицу времени. Из кинетической теории газов известно, что эта величина пропорциональна концентрации молекул данного сорта в объеме газа (или парциальному давлению) и очень слабо зависит от массы молекулы и абсолютной температуры. Таким образом, чем больше молекул газа содержится в единице объема, тем выше скорость абсорбции (конденсации).

Испарение может происходить не только с поверхности, но и в объеме жидкости. В жидкости всегда имеются мельчайшие пузырьки газа. Если давление насыщенного пара жидкости равно внешнему давлению (т. е. давлению газа в пузырьках) или превышает его, жидкость будет испаряться внутрь пузырьков. Пузырьки, наполненные паром, расширяются и всплывают на поверхность. Этот процесс называется кипением. Таким образом, кипение жидкости начинается при такой температуре, при которой давление ее насыщенных паров становится равным внешнему давлению.

Появление пузырьков объясняется выделением воздуха, растворенного в воде. Этим воздухом дышат рыбы и другие живые существа, обитающие в воде. Чаще всего пузырьки зарождаются в маленьких трещинках на дне сосуда. Так как внутри каждого пузырька происходит испарение воды, то кроме воздуха пузырьки содержат насыщенные пары воды.

При повышении температуры пузырьки, заполненные воздухом и паром, увеличиваются в размерах и становятся многочисленнее. Поднимающийся пузырек, попадая в верхние, более холодные, слои воды, уменьшается в размере, так как содержащийся в нем пар конденсируется. Давление стремительно падает, и пузырек схлопывается. Схлопывание происходит настолько быстро, что стенки пузырька, сталкиваясь, производят нечто вроде маленького взрыва. Множество таких микровзрывов создает характерный шум. Закипающая вода шумит (другой, менее существенной причиной шума являются колебания жидкости, возникающие при отрыве пузырьков от дна сосуда).



Рис. 12.13. Изменение температуры жидкости при нагревании

Наконец, когда вся вода достаточно прогреется, поднимающиеся пузырьки уже не будут уменьшаться в размерах.

Во время кипения температура жидкости не меняется.

Таким образом, *кипение* — это процесс перехода жидкости в пар, происходящий с образованием пузырьков пара по всему объему жидкости или на поверхности сосуда. Термометр, помещенный в пар над кипящей водой, все время, пока вода кипит, показывает одну и ту же температуру (около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Эта температура не изменится, пока вся вода не выкипит.

Очевидно, при кипении давление паров, образующихся внутри пузырьков у дна сосуда, таково, что пузырьки могут расширяться, преодолевая атмосферное давление, а также давление столба воды. Таким образом, кипение происходит при такой температуре, когда давление насыщенных паров сравнивается с давлением внутри жидкости. Температура кипения определяется, следовательно, давлением насыщенного пара, а значит, его температурой.

Температура пара кипящей жидкости и есть температура кипения.

Из изложенного следует, что температура кипения жидкости должна зависеть от внешнего давления (см. рис. 12.14). Это можно наблюдать в горах на большой высоте, где воздух заметно разрежен.

У каждой жидкости своя температура кипения. Различие температур кипения жидкостей определяется различием в давлении их насыщенных паров при одной и той же температуре. Например, пары эфира уже при комнатной температуре имеют давление, большее половины атмосферного. Поэтому, чтобы давление паров эфира стало равным атмосферному, нужно небольшое повышение температуры (до $35\text{ }^{\circ}\text{C}$). У ртути же насыщенные пары имеют при комнатной температуре совсем ничтожное давление. Давление паров ртути делается равным атмосферному только при значительном повышении температуры (до $357\text{ }^{\circ}\text{C}$). Именно при этой температуре, если внешнее давление равно 10^5 Па , и кипит ртуть.

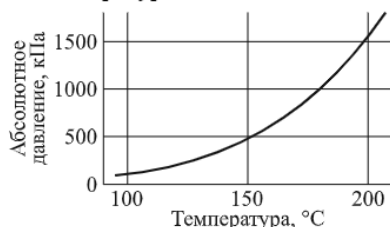


Рис. 12.14. Зависимость температуры кипения от внешнего давления (справочник С. Л. Ривкина и А. А. Александрова «Термодинамические свойства воды и водяного пара»)

Поверхностное натяжение. Выше мы рассмотрели вопрос поверхностного натяжения и описали наглядные опыты, демонстрирующие это явление. Здесь же кратко остановимся на картине явления поверхностного натяжения с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

Молекулы, расположенные на внешней поверхности жидкости, находятся в особых условиях по сравнению с молекулами остальной массы жидкости. Рассмотрим некоторую молекулу А (рис. 12.15), расположенную внутри некоторого большого объема жидкости (рис. 12.15). Эта молекула взаимодействует с окружающими ее молекулами, попадающими в так называемую сферу молекулярного действия, радиус которой порядка 10^{-7} см . Поскольку молекулы в жидкости расположены с равномерной плотностью, то равнодействующая всех сил, действующих на рассматриваемую молекулу, равна нулю. Иначе обстоит дело с молекулой В, расположенной в поверхностном

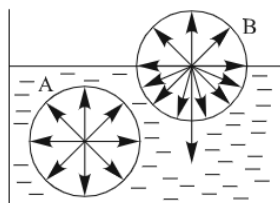


Рис. 12.15. Силы, действующие на молекулу внутри и на поверхности жидкости

слое жидкости. В отличие от молекул в глубине жидкости молекулы поверхностного слоя не окружены молекулами той же жидкости со всех сторон. Часть соседней поверхностных молекул являются частицами второй среды, с которой жидкость граничит.

Число частиц в единице объема этой второй среды и их природа могут отличаться от аналогичных свойств жидкости. Поэтому и молекулярные взаимодействия между пограничными молекулами и молекулами второй среды в общем случае могут отличаться от сил взаимодействия внутри самой жидкости. По этой причине равнодействующая всех сил, действующих на молекулу поверхностного слоя, не равна нулю. В зависимости от природы граничащих сред на поверхностную молекулу В будет действовать некоторая равнодействующая сила, направленная либо вглубь жидкости, либо в сторону объема граничащей с ней среды. В том случае, когда жидкость граничит со своим собственным паром, равнодействующая сила, действующая на молекулу В, направлена внутрь жидкости, поскольку число молекул в единице объема жидкости во много раз больше, чем их число в граничащем с ней паре. По совокупности этот эффект приводит к формированию так называемой силы поверхностного натяжения, которая действует вдоль поверхности жидкости и приводит к образованию на ней подобия невидимой, тонкой и упругой пленки.

Влажность. Воздух в природе не бывает без водяных паров, в нем всегда находится какое-то их количество. Нет на Земле места, где была бы зарегистрирована нулевая относительная влажность. Влажность атмосферного воздуха обусловливается испарением воды с поверхности океанов, морей и в меньшей мере озер, рек, влажной почвы и растительного покрова. Вода в атмосфере находится в виде пара, льда, снежинок и капель воды. Содержание водяного пара в воздухе — важная характеристика погоды и климата.

Вес, или, точнее, масса, водяного пара, содержащегося в 1 м^3 воздуха, называется абсолютной влажностью воздуха. Другими словами, это плотность водяного пара в воздухе.

При одной и той же температуре воздух может поглотить вполне определенное количество водяного пара и достичь состояния полного насыщения. В зависимости от содержания водяного пара различают насыщенный и ненасыщенный воздух. Воздух, находящийся над сухой и теплой поверхностью, обычно содержит водяного пара меньше, чем мог бы содержать при данной температуре. Такой воздух называется ненасыщенным. При его охлаждении не всегда выделяются атмосферные осадки. Воздух, который больше не может вместить влагу, называется насыщенным. Из этого воздуха при малейшем охлаждении выпадают атмосферные осадки в виде росы или туманов. Это происходит потому, что вода при охлаждении переходит из газообразного состояния (водяной пар) в жидкое в результате конденсации. Температура, при которой водяной пар насыщает воздух и начинается конденсация, называется точкой росы (см. ниже).

Несмотря на свою наглядность, абсолютная влажность не дает представления о том, насколько влажен воздух. А для определения «сухости» воздуха используется относительная влажность, которая показывает, насколько воздух далек от насыщения водяным паром (относительная влажность воздуха равна

отношению содержащейся в воздухе влаги к максимальному количеству влаги, которое может содержаться в воздухе при данной температуре).

Например, при температуре воздуха 20 °С и 50 % относительной влажности в воздухе содержится 8,7 грамм водяного пара — половина от максимального количества, которое могло бы содержаться в воздухе при данной температуре.

В атмосферном воздухе интенсивность испарения воды зависит от того, насколько близко давление паров воды к давлению насыщенных паров при данной температуре. Отношение давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению p_0 насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах, называется *относительной влажностью* воздуха:

$$\varphi = p/p_0 \cdot 100 \, \%.$$

При относительной влажности, равной 100 %, устанавливается динамическое равновесие между процессами испарения и конденсации воды, в результате количество воды не уменьшается и не увеличивается.

Так как давление насыщенного пара тем меньше, чем ниже температура, то при охлаждении воздуха находящийся в нем водяной пар при некоторой температуре становится насыщенным. Температура t_p , при которой находящийся в воздухе водяной пар становится насыщенным, называется *точкой росы*.

Для определения температуры и относительной влажности воздуха пользуются специальным прибором — психрометром. Психрометр состоит из двух термометров. Шарик одного из них увлажняется с помощью марлевого чехла, конец которого опущен в сосуд с водой. Другой термометр остается сухим и показывает температуру окружающего воздуха. Смоченный термометр показывает температуру более низкую, чем сухой, так как испарение влаги из марли требует определенного расхода тепла. Чем меньше влажность воздуха, тем интенсивнее испаряется влага, тем большее количество теплоты в единицу времени отводится от увлажненного термометра, тем меньше его показания, следовательно, тем больше разность показаний сухого и увлажненного термометров. Температура смоченного термометра носит название предела охлаждения. Разность между показаниями сухого и смоченного термометров называется психрометрической разностью. Между величиной психрометрической разности и относительной влажностью воздуха имеется определенная зависимость. Чем больше психрометрическая разность при данной температуре воздуха, тем меньше относительная влажность воздуха и тем больше влаги может поглотить воздух. При разности, равной нулю, воздух насыщен водяным паром и дальнейшего испарения влаги в таком воздухе не происходит.

Для измерения влажности воздуха используют измерительные приборы — гигрометры. Принцип действия волосного гигрометра основан на свойстве обезжиренного волоса (человека или животного) изменять свою длину в зависимости от влажности воздуха, в котором он находится.

Волос натянут на металлическую рамку. Изменение длины волоса передается стрелке, перемещающейся вдоль шкалы. Волосной гигрометр в зимнее время является основным прибором для измерения влажности воздуха вне помещения.

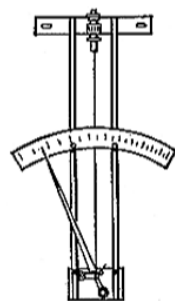


Рис. 12.16. Волосной гигрометр

Точка росы определяется с помощью специальных психометрических таблиц по предварительно вычисленному значению абсолютной влажности или по температуре воздуха и величине относительной влажности (см. таблицу 6).

Таблица 6

Температура воздуха, °С	Точка росы в °С при относительной влажности воздуха в %				
	40	45	50	55	60
22	7,8	9,5	11,1	12,5	13,9
21	6,9	8,6	10,2	11,6	12,9
20	6,0	7,7	9,3	10,7	12,0
19	5,1	6,8	8,3	9,8	11,1
Состояние помещения	Сухо		Нормально		

Точка росы — важный параметр для садовода. В засуху огород и газон следует поливать холодной водой ночью, ибо если получится локальное падение температуры ниже точки росы, тогда можно получить еще огромное количество влаги из воздуха за счет конденсации. Температуру воздуха и относительную влажность в % можно узнать в любом прогнозе погоды.

Суточные и годовые колебания влажности находятся в соответствии с динамикой температуры воздуха. В дневное время, когда воздух становится более теплым, чем ночью, абсолютная влажность наибольшая, а относительная — наименьшая, в ночное время — наоборот. Годовые изменения характеризуются более высокой относительной влажностью и более низкой абсолютной влажностью в летний период по сравнению с зимним.

Относительная влажность в пределах 40–60 % считается комфортной для теплового самочувствия человека при благоприятной температуре воздуха и слабом его движении. Повышенная влажность как при повышенной, так и при пониженной температуре воздуха неблагоприятно отражается на терморегуляции человеческого организма, усиливая охлаждающее действие низких температур и затрудняя теплоотдачу при высоких температурах.

Реальные газы. Реальные газы описываются уравнением состояния идеального газа только приближенно, и отклонения от идеального поведения становятся заметными при высоких давлениях и низких температурах, особенно когда газ близок к конденсации.

Отличия связаны с тем, что молекулы реальных газов имеют объемы и связаны между собой силами взаимодействия, которые уменьшаются с увеличением расстояния между молекулами. Поэтому молекулы взаимодействуют друг с другом не только при непосредственном контакте.

Малые плотности газа реализуются только при малых давлениях и высоких температурах. Однако при давлениях порядка в 100 атмосфер наблюдается заметное отклонение. Одной из наглядных характеристик отклонений реальных газов от идеального поведения оказывается мольный объем газа $V_m = V/n$. Для идеального газа он равен 22,414 л при 1 атм и 273 К. Для реальных газов он отличается от единицы, но не намного.

Также отличие демонстрирует так называемый коэффициент сжимаемости Z , равный отношению $P \cdot V / (R \cdot T)$. Так как для идеальных газов при любых

условиях $P \cdot V = R \cdot T$, то для этих газов $Z = 1$. Тогда величина коэффициента сжимаемости выражает отклонение свойств реального газа от свойств идеального. Величина Z для реальных газов в зависимости от давления и температуры может принимать значения больше или меньше единицы, и только при малых давлениях и высоких температурах она практически равна единице. Тогда реальные газы можно рассматривать как идеальные.

Предпринималось много попыток для учета отклонений свойств реальных газов от свойств идеального газа путем введения различных поправок в уравнение состояния идеального газа. Наибольшее распространение вследствие простоты и физической наглядности получило уравнение Ван дер Ваальса (1873).

Учитывая собственный объем молекул и силы межмолекулярного взаимодействия, голландский физик И. Ван дер Ваальс ввел поправки в уравнение Менделеева–Клапейрона и вывел уравнение состояния реального газа.

Уравнение состояния для 1 моля идеального газа имеет вид $pV = RT$.

Согласно этой формуле объем газа при сжатии может стать равным нулю. В случае реальных газов часть объема занята самими молекулами. Поэтому объем, занимаемый газом, должен быть уменьшен на величину b , где b — объем, занимаемый самими молекулами, т. е. $(V - b)$. Таким образом, b — постоянная величина, учитывающая объемы (размеры) молекул.

Предполагается, что молекулы имеют форму шара радиуса r и не могут приблизиться друг к другу на расстояние между центрами меньше, чем $2r$ (см. рис. 12.8). Можно считать, что вокруг одной из двух молекул существует «запрещенный» (исключенный) объем, равный $\frac{4}{3}\pi(2r)^3 = 8 \cdot \frac{4}{3}\pi r^3$.

Следовательно, в расчете на одну молекулу исключенный объем равен $b_0 = 4 \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 = 4V_0$, где V_0 — объем одной молекулы.

В результате, если в уравнении Клапейрона объем пространства, доступного для движения молекул, был равен V , то теперь он становится равным $V - N_A b_0 = V - b$, где N_A — число Авогадро (равное числу молекул в одном моле газа), b — исключенный объем, обусловленный отталкиванием молекул.

В реальных газах имеются силы взаимного притяжения молекул, которые действуют дополнительно к силам внешнего давления и как бы сжимают газ. Вследствие этого возникает добавочное внутреннее давление p_i , которое тоже можно оценить.

Введя поправки для V и p , получим уравнение состояния реального газа в следующем виде:

$$(p + a/V^2)(V - b) = RT.$$

Это и есть уравнение Ван дер Ваальса для 1 моля газа

Поправка в первой скобке a/V^2 обусловлена силами притяжения между молекулами. Она имеет размерность давления, и ее часто называют внутренним давлением. При переходе от идеального газа к реальному давление газа на стенку уменьшается из-за сил притяжения между молекулами.

Поправка b связана с собственным объемом, и ее размерность — $\text{м}^3/\text{моль}$. При малых давлениях и высоких температурах V_M становится большим, поэтому $b \ll V$ и $a/V^2 \ll p$, то есть поправки в уравнение Ван дер Ваальса становятся пренебрежимо малыми и оно превращается в уравнение Клапейрона–Менделеева. Вывод уравнения Ван дер Ваальса является упрощенным, но это уравнение

дает возможность хотя бы качественно объяснить широкий круг явлений в газах и даже в жидкостях.

Величины a и b для газов различны, и их значения приводятся в справочных таблицах. Для любой массы газа m , имеющего молекулярный вес m_0 уравнение Ван дер Ваальса имеет вид

$$(p + (m/m_0)a/V^2)(V - (m/m_0)b) = RT.$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса не единственное уравнение, описывающее реальные газы. Существуют и другие уравнения, некоторые из них даже точнее описывают реальные газы, но не рассматриваются из-за их сложности.

Уравнение Ван дер Ваальса можно переписать так, чтобы выразить в явном виде давление $p = RT/(V_m - b) - a/V^2$ или объем

$$V_m^3 - (b + RT/p)V_m^2 + (a/p)V_m - ab/p = 0.$$

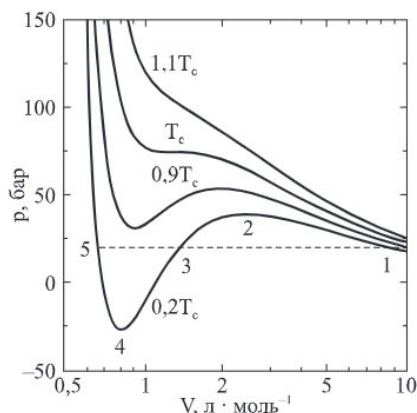


Рис. 12.17. Изотермы Ван дер Ваальса

Второе уравнение содержит объем в третьей степени и, следовательно, имеет или три действительных корня, или один действительный и два мнимых. При высоких температурах это уравнение имеет один действительный корень, и по мере повышения температуры кривые, вычисленные по уравнению Ван дер Ваальса, приближаются к гиперболом, соответствующим уравнению состояния идеального газа. На рис. 12.17 приведены изотермы Ван дер Ваальса. Можно видеть, что они делятся на три группы. Первая группа весьма похожа на изотермы идеального газа (две верхние кривые). Вторая группа состоит всего из одной кривой (третьей сверху), имеющей точку перегиба. Третья группа, группа «горбчатых» кривых, выглядит довольно странно, так как одному значению давления для этих кривых соответствует три значения объема.

Опыт показывает, что этому горизонтальному участку соответствует так называемый фазовый переход вещества из газообразного состояния в жидкое. Левее двухфазной области расположена область, соответствующая одной фазе — жидкости, правее — вещество находится в газообразном состоянии. Таким образом, изотермы, расположенные в области выше критической изотермы, описывают только газообразное состояние вещества. Чем выше температура T , тем ближе соответствующая изотерма к изотерме идеального газа.

В таблице 7 приведены критические температура и давление некоторых веществ, видно, что, например, воздух в нормальных атмосферных условиях может существовать только в газообразном состоянии, а вода — как в жидком, так и газообразном состояниях.

В то время как одни ученые были заняты исследованием газов, другие сосредоточились на изучении тепловых явлений. Исследования теплоты имеют свою историю и весьма важны для практики. В нашем путешествии мы никак не можем не рассказать о них.

Таблица 7

Вещество	$T_{кр}, K$	$P_{кр}, 10^5 \text{ Па}$	Вещество	$T_{кр}, K$	$P_{кр}, 10^5 \text{ Па}$
Вода	647	218	Воздух (без CO_2)	132	38,5
Аммиак	405	112,3	Азот	126	33,4
Углекислота	304	72,7	Водород	33	13,2
Кислород	154	49,7	Гелий	5	2,3

13. *Такая непростая теплота. Опыты Румфорда и Дэви. Эксперименты Джоуля. Что такое энергия? Внутренняя энергия идеального газа. Теплоемкость. Калориметрия. Фазовые переходы. Способы передачи теплоты. Тепловое расширение.*

Издревле люди знали различные способы добывания тепла. Они обнаружили, что теплота возбуждается движением: от взаимного трения руки согреваются, дерево загорается пламенем; при ударе кремня об огниво появляются искры; железо накаливается от проковывания частыми и сильными ударами, а если их прекратить, то теплота уменьшается и железо в конце концов остывает. Также было очевидно, что тепло переходит от более нагретого тела к более холодному и через некоторое время тела, приведенные в контакт, становятся одинаково нагретыми (или одинаково холодными).

Но вот откуда берется тепло? Его природа была понята далеко не сразу, потребовались многие века, чтобы разобраться в этом вопросе.

Еще со времен Античности существовало представление, что теплота — это некое вещество, субстанция. Она заключена в дереве и других горючих предметах и высвобождается при горении. Мысль о том, что теплота — это вещество, которое не порождается и не уничтожается, а только перераспределяется между телами, высказал еще в 1613 году Галилей. Но представления о теплоте были весьма неясными. Многие отождествляли огонь с теплотой, другие же считали огонь лишь источником теплоты, а теплоту — неким состоянием тел. К концу XVIII века, однако, накопилось достаточно экспериментальных данных, чтобы убедиться в ошибочности такой теории.

В рассматриваемый период было начато количественное исследование тепловых явлений. XVIII век был периодом широкого использования энергии пара. В 1773 году Д. Уатт строит свою первую действующую паровую машину. А годом позже совместно с промышленником Болтоном открывает компанию по производству паровых машин. Именно паровая машина Уатта совершила технологический прорыв в технике. Она открыла новую эпоху в истории техники — эпоху паровых машин. Надежды на возможности пара так выразил Эразм Дарвин, дед знаменитого ученого Чарлза Дарвина:

*Пар-триумфатор, недолго уж ждать,
И сможешь ты Землю завоевать:
Двигать на море суда и повозки на суше,
Может быть, даже и в небо вздымать.*

В 1814 году Джордж Стефенсон проектирует свой первый паровоз. Его основное назначение — буксировка вагонеток с углем по железной дороге рудника.

Затем ее начинают применять на заводах, устанавливать на пароходы, создавать поезда.

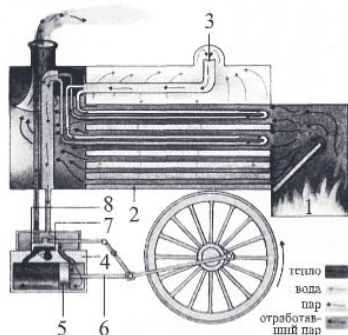


Рис. 13.1. Паровой двигатель
(dic.academic.ru)

Паровые двигатели, такие, какие раньше использовались в локомотивах, работают на производимом при нагревании воды паре. Угольная или дровяная топка (1) нагревает котел, наполненный водой (2), который производит пар. Пар поднимается и через сухопарник (3) выталкивается через трубы в цилиндр (4), где он вызывает обратное движение поршня (5). Связанный с поршнем рычаг (6) — это золотниковый клапан (7), который сначала позволяет пару попасть в цилиндр (как показано), закрывая выпускное окно (8). Это создает давление, которое двигает поршень вперед и приводит к тому, что золотниковый клапан становится в такое положение, когда выпускное окно открывается и пар выходит наружу. Движение колес заставляет поршень двигаться в обратном направлении.

Около 1750 года Джозеф Блэк (1728–1799) провел четкую грань между количеством тепла и температурой. Он построил теорию теплоты как некой жидкости, которая без потерь может перетекать из горячих тел в холодные. Эта «жидкость» вскоре была названа флогистонем, или теплородом — термин введен в 1783 году Лавуазье. Приток теплорода в тело должен вызывать его нагрев, убыль — охлаждение. Количество теплорода во всех тепловых процессах должно оставаться неизменным. Концепция теплорода очень хорошо подходила к описанию наблюдаемых явлений и объясняла на тот момент многие известные тепловые явления. Например, в химии, достигшей больших успехов, теория теплорода до открытия кислорода помогала разобраться в процессах горения и окисления. К концу восемнадцатого века, примерно к 70-м годам, были установлены основные калориметрические понятия. Но лишь спустя почти сто лет (1852) была введена единица количества теплоты, получившая значительно позже название «калория» (от лат. Calor — тепло). (Еще Клаузиус говорит просто о единице теплоты и не пользуется термином «калория».) Эта единица определяется как количество теплоты, необходимое для повышения температуры одного грамма воды на один градус Цельсия в интервале температур 14,5–



Рис. 13.2. Бенджамин Томпсон Румфорд (1753–1814)

15,5 °C. Этот интервал температур взят по той причине, что количество теплоты, требуемое для нагрева воды, хоть и незначительно, но зависит от температуры (в интервале от 0 до 100 °C изменение не превышает 1 %).

Теория теплорода господствовала довольно длительное время. Но в середине девятнадцатого века ей был нанесен чувствительный удар. Правда, сомнения в правильности этой теории возникли гораздо раньше. В конце XVIII века граф Румфорд впервые экспериментально доказал, что теплота — вовсе не неуничтожаемая жидкость, а нечто, получаемое при желании в неограниченном количестве за счет механической энергии. Произошло это в Баварии, где он

возглавлял производство пушек. Пушка тогда изготавливалась путем отливки в определенную форму. Затем в сплошной чушке быстро вращающимся сверлом высверливалось жерло. Пушка и сверло, конечно, при этом сильно нагревались. Для охлаждения сверла использовалась вода.

Сторонники теплородной теории утверждали, что сверло дробит металл внутри пушки и теплород вытекает, как вода из разбитого кувшина. Румфорд засомневался в таком объяснении. Он нашел сильно затупившееся сверло и уговорил рабочих использовать его. Спустя два с половиной часа вода закипела. «Изумление окружающих, увидевших, что такая масса воды закипает без огня, было неописуемо», — вспоминал Румфорд. Из своих опытов он сделал вывод, что никакого теплорода не существует. Румфорд решил, что теплота вообще не жидкость и не газ, а форма движения составляющих металл крошечных частиц. Труды Румфорда оставались без внимания еще пятьдесят лет.

В 1799 году английских физик и химик Гемфри Дэви (1778–1829) произвел новый эксперимент, который тоже свидетельствовал против теории теплорода. Опыт Дэви состоял в следующем: под колокол воздушного насоса, откуда предварительно был выкачан воздух, помещались два куска льда при температуре 0°C . Оба куска можно было тереть друг о друга при помощи специального часового механизма. При трении лед таял, причем температура полученной воды оказалась на несколько градусов выше 0°C . С точки зрения теории теплорода этот опыт совсем необъясним, поскольку удельная теплоемкость льда меньше, чем у воды. Отсюда Дэви заключил, что теплота могла появиться только в результате движения.



Рис. 13.3. Гемфри Дэви

Опыты Румфорда и Дэви сильно поколебали веру в теорию теплорода и в конечном итоге нанесли этой теории сокрушительный удар.

Эксперименты, в которых за счет механической энергии создавалась теплота, следовали один за другим. Многие из таких экспериментов были поставлены Дж. П. Джоулем (1818–1889), манчестерским пивоваром, ученым-любителем, страстно влюбленным в науку. Он глубоко уверовал в существование, как о том утверждал Юлиус Майер, зависимости между работой и количеством произведенного ею тепла. В 1845 году Дж. Джоуль точно измерил количество теплоты, получаемое при преобразовании механической работы в тепловую энергию.

Опыт Джоуля. В одном из ранних опытов Джоуля, вода нагревалась за счет специального колеса с лопатками, помещенного в изолированный контейнер с водой и приводимого в движение падающими грузами. Падающий груз, расположенный справа, заставлял лопасти, погруженные в воду, вращаться, в результате чего вода нагревалась. Когда грузы падали до конца, Джоуль отцеплял их и поднимал вновь. Для заметного нагревания воды потребовалось 20 таких циклов. Медленно снижаясь, при каждом падении грузы теряли потенциальную энергию, но заканчивали

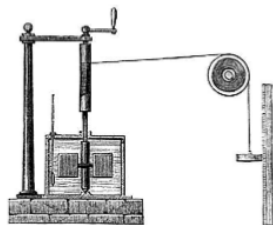


Рис. 13.4. Установка Джоуля для измерения механического эквивалента тепла

падение с небольшой кинетической энергией (т. е. энергией, обязанной наличию скорости тела), которая передавалась при ударе полу.

Джоуль тщательно учитывал эту кинетическую энергию, которая возникала за счет потери потенциальной, но не давала вклада в измеряемое количество тепла. Он также тщательно измерял охлаждение сосуда, так что мог учесть утечку тепла во время перемешивания воды. Затем брал полную потерю потенциальной энергии и полное тепловыделение и получал коэффициент перехода $780 : 1$ в своих единицах. Такое отношение характерно не только для воды. Чтобы доказать это, Джоуль помещал в сосуд ртуть, китовый жир и даже определял выделение тепла при трении железных плиток. В итоге полученное Джоулем значение механического эквивалента теплоты — для 1 кал (в современных единицах равно 4,27 Дж). А современное значение — 4,184 Дж.

Таблица 8. Соотношения тепловой и механической единиц

Единица измерения	Дж	кгс · м	кал	ккал	кВт/ч
джоуль	1	0,102	0,239	$2,39 \times 10^{-4}$	$2,78 \times 10^{-7}$
килограмм-сила-метр	9,8067	1	2,343	$2,343 \times 10^{-3}$	$2,78 \times 10^{-6}$
калория	4,1868	0,42686	1	10^{-3}	$1,16 \times 10^{-6}$
килокалория	4186,8	426,86	10^3	1	$1,16 \times 10^{-3}$
киловатт-час	$3,6 \times 10^6$	$3,67 \times 10^5$	$8,6 \times 10^5$	$8,6 \times 10^2$	1

Обнаружение Майером, Джоулем и другими исследователями взаимосвязи между механической энергией и теплотой и нахождение их количественной эквивалентности способствовали укреплению идеи о возможности трансформации одного вида движения в другой.

Внутренняя энергия. Еще во времена написания основополагающих трудов Ньютона слово «энергия» было непривычным. Все запутывало слово «сила», применявшееся в тех случаях, когда мы теперь используем термин «энергия». А употребляли тогда для энергии термин, введенный И. Ньютоном, — «живая сила». И «живых сил» было две. Опыт показывал, что сила может быть вызвана покоящимся телом, например сжатой пружиной; телом, которое давит на опору, и т. д. С другой стороны, силовое действие может быть произведено движущимся телом. Естественно было в первом статическом случае говорить просто о силе, а во втором, чтобы подчеркнуть ее принадлежность к движению, изменению, о силе живой. Но поскольку «живую силу» можно было спутать с обычной силой, последнюю приходилось для ясности называть «мертвой силой».

Т. Юнгом был введен специальный термин «энергия» вместо понятия «живая сила». Сама энергия тоже имела несколько видов. В 1881 году Уильям Томсон заявил перед слушателями: «Само слово «энергия», хотя и было впервые употреблено в современном смысле доктором Томасом Юнгом приблизительно в начале этого века, только сейчас входит в употребление практически после того, как теория, которая дала определение энергии, ...развилась от просто формулы математической динамики до принципа, пронизывающего всю природу и направляющего исследователя в области науки».

Одним из видов энергии является работа, которая совершается, когда тело движется, преодолевая действие некой силы (например, трение). Жан Виктор Понселе (1788–1867) ввел в 1826 году понятие «работа» для произведения силы на путь, пройденный точкой ее приложения. Как мы видели, своими опытами Румфорд и Х. Дэви с несомненностью установили, что возможно получить тепло за счет выполнения механической работы. Эти опыты и наблюдения говорили о том, что тепловая и механическая энергия — разные виды энергии и что, вероятно, можно найти экспериментально механический эквивалент теплоты, т. е. количество работы в механических единицах, эквивалентное данному количеству теплоты в тепловых единицах. Что и было сделано Джоулем.

До XVIII века понятия температуры и теплоты практически не различались. Различие между двумя этими понятиями стало возможно после появления молекулярно-кинетической теории.

С точки зрения этой теории, как мы видели, температура является мерой средней кинетической энергии молекул тела. Тепловая, или внутренняя, энергия тела относится к полной энергии всех молекул тела. Таким образом, количество тепла кроме температуры зависит еще и от количества вещества. Поэтому если к телу, имеющему какую-то температуру, добавить другое тело с той же температурой, то их температура не изменится, а количество тепловой энергии увеличится. Теплота передается от горячего тела к холодному. Так что направление потока теплоты между двумя телами зависит от их температур, но не зависит от количества внутренней энергии, заключенной в каждом из них. Поэтому при смешении, например, двух разных объемов воды при разных температурах тепло перейдет от воды с большей температурой к воде с меньшей, несмотря на то что количество воды с меньшей температурой будем значительно больше (то есть ее внутренняя энергия больше).

Внутренняя энергия идеального газа.

Все макроскопические тела обладают энергией, заключенной внутри самих тел. С точки зрения молекулярно-кинетической теории внутренняя энергия вещества складывается из кинетической энергии всех атомов и молекул и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом.

Исходя из определения идеального газа, в нем отсутствует потенциальная составляющая внутренней энергии (отсутствуют силы взаимодействия молекул, кроме ударного). Таким образом, внутренняя энергия идеального газа U представляет собой только кинетическую энергию движения его молекул. Эта энергия равна средней кинетической энергии одной молекулы (см. с. 136), умноженной на полное число молекул N :

$$U = N(m\langle v^2 \rangle / 2).$$

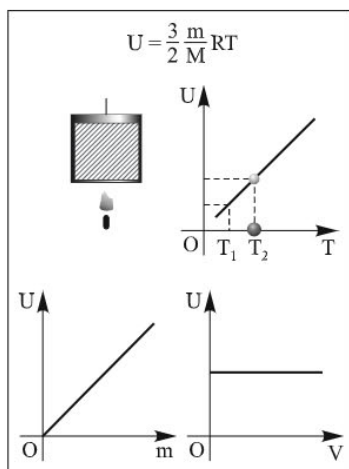


Рис. 13.5. Графики, иллюстрирующие зависимость внутренней энергии газа от температуры, массы и объема

Учитывая, что $\langle v \rangle = \sqrt{3kT/m}$, приведенное соотношение можно записать следующим образом:

$$U = 3/2NkT \quad \text{или} \quad U = 3/2nRT,$$

где n — число молей газа.

Из этих уравнений следует, что внутренняя энергия идеального газа определяется только его температурой и числом молей газа.

Молекулы газа могут содержать более одного атома. Для двух-, трех- и многоатомных молекул газа кроме степеней свободы поступательного движения есть степени свободы вращательного движения молекулы. Для двухатомных молекул газа число степеней свободы вращательного движения равно 2, для трех- и многоатомных молекул — 3 (см. таблицу 9).

Таблица 9. Число степеней свободы газа

Газ		одноатомный	двухатомный	трехатомный
Число степеней свободы	поступательных	3	3	3
	вращательных	—	2	3
	всего	3	5	6

Поскольку распределение энергии движения молекулы по всем степеням свободы равномерное (что следует из закона Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекулы), то внутреннюю энергию одного киломоля идеального газа можно получить, умножив выражение для U на число степеней свободы (i) движения молекулы данного газа: $U_i = (1/2)RTi$.

Однако и в этом случае для идеального газа внутренняя энергия должна зависеть только от температуры, то есть $U = U(T)$, так как температура определяет среднюю кинетическую энергию молекул.

Для произвольного количества газа (m) полная внутренняя энергия определяется как произведение его массы на удельную внутреннюю энергию этого газа: $U = (i/2)mRT$.

Если система состоит из нескольких различных по физическим свойствам газов, то, подчиняясь закону сложения (аддитивности), его полная внутренняя энергия будет определяться суммой внутренних энергий компонентов газовой смеси: $U = m_1u_1 + m_2u_2 + \dots + m_nu_n$, где n — количество компонент смеси.

Теплоемкость. Сообщение телу теплоты вызывает изменение его состояния и в общем случае сопровождается изменением температуры. Было замечено, что для нагрева до одной и той же температуры двух различных тел одинаковой массы и в одинаковых условиях требуется различное количество теплоты. Следовательно, существует какое-то свойство тела, определяющее изменение его температуры в процессе подвода или отвода теплоты. Это свойство называют теплоемкостью тела. Таким образом, теплоемкость тела (C) — это величина, характеризующая способность тела изменять свою температуру с подводом или отводом теплоты. Она равна количеству теплоты, которое надо подвести к телу, чтобы изменить его температуру на 1 К: $C = Q/\Delta T$, а в дифференциальной форме, то есть при подводе элементарного количества тепла $C = dQ/dT$.

Это количество тепла может быть различным (но всегда положительным!) при проведении нагрева в разных условиях. Из всех возможных вариантов

предельными являются два. Пусть тело нагревается при постоянном объеме (скажем, оно имеет твердые недеформируемые стенки). В этом случае телом не может совершаться механическая работа. Все полученное идет на изменение только внутренней энергии dU за счет изменения температуры на величину dT . Тогда имеем определение теплоемкости при постоянном объеме: $C_V(T)$.

Если нагревать газ при постоянном давлении P в сосуде с поршнем, то поршень поднимется на некоторую высоту h , то есть газ совершит работу (рис. 13.6). В этом случае мы получим теплоемкость при постоянном давлении — C_P . Следовательно, проводимое тепло затрачивается и на нагревание и на совершение работы. Отсюда ясно, что $C_P > C_V$.

Итак, проводимое тепло и теплоемкость зависят от того, каким путем осуществляется передача тепла. Значит, Q и C не являются функциями состояния.

Теплоемкости различных веществ могут отличаться значительно. Это видно из приводимой ниже таблицы. Удельная теплоемкость воды примерно в десять раз выше удельной теплоемкости железа, поэтому кастрюля нагреется в десять раз быстрее воды в ней. Любопытно, что удельная теплоемкость льда в два раза меньше теплоемкости воды. Поэтому лед будет нагреваться в два раза быстрее воды. Оказывается, растопить лед проще, чем нагреть воду.

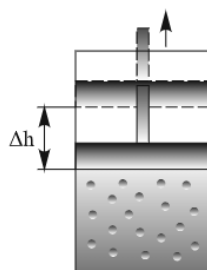


Рис. 13.6

Таблица 10. Удельная теплоемкость при постоянном давлении 1 атм

Удельная теплоемкость (при 20 °С), 10 ³ Дж/кг · К			
Твердые вещества			
Алюминий	0,89–0,92	Никель	0,5
Вольфрам	0,15	Олово	0,22–0,25
Древесина сухая		Свинец	0,13
сосна	2,39–2,7	Серебро	0,23–0,25
Железо (чистое)	0,46	Сталь	0,46
Золото	0,13	Стекло	0,83–0,84
Кирпич	0,75–0,92	Цинк	0,39–0,4
Латунь	0,38	Чугун (серый)	0,54
Лед (0 °С)	2,09–2,1		
Медь	0,38–0,39		
Жидкости			
Бензин	2,05	Нефть	1,67–2,09
Вода	4,19	Ртуть	0,1–0,13
Керосин	2,14		
Машинное масло	1,67		
Газообразные вещества (при давлении 101,3 кПа)			
Азот	1,038	Воздух	1,009
Водород	14,27	Гелий	5,238
Водяной пар	2,2	Кислород	0,917

Калориметрия. Калориметрия — это измерение тепловых эффектов (количеств теплоты), сопровождающих физические, химические или биологические процессы. История изобретения калориметра связана с именами французских ученых А. Лавуазье и П. Лапласа, создавших в 1780 году первый такой прибор. Прибор, используемый для таких измерений, называется калориметром. Ледяной калориметр позволил еще в XVIII веке измерить теплоемкости многих твердых тел и жидкостей, а также теплоты сгорания разных топлив и теплоты, выделяемые живыми организмами. Например, теплота, отдаваемая животным (или другим объектом) во внутренней камере, расходовалась на плавление льда во внутренней «ледяной рубашке». Внешняя служила для того, чтобы поддерживать температуру внутренней части постоянной. Выделенную теплоту измеряли, взвешивая талую воду, стекавшую в сосуд.

Устройство калориметров весьма разнообразно и определяется характером и продолжительностью изучаемого процесса, областью температур, при которых производятся измерения, количеством измеряемой теплоты и требуемой точностью.

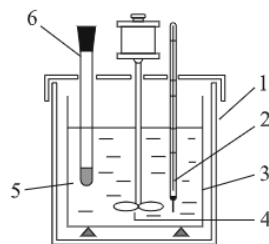


Рис. 13.7

Простейший калориметр (рис. 13.7) состоит из сосуда (1), изготовленного из материала, не проводящего тепло, в который помещается исследуемое вещество и защитной оболочки (3), уменьшающей тепловое взаимодействие калориметра и исследуемого вещества с окружающей средой. Совокупность частей калориметра, между которыми распределяется подлежащее определению тепло, называется калориметрической системой. Давление в калориметрической системе остается постоянным во время всего опыта и равным атмосферному.

В крышке калориметра сделаны отверстия для введения исследуемого вещества (6), термометра (2), перемешивающего устройства. Температуру измеряют с помощью обычного термометра. Перемешивание раствора производят ручной мешалкой (4), которая при вращении не должна задевать частей калориметра. Важным применением калориметра является определение теплоемкости вещества. Ниже описан так называемый метод смешивания.

Сосуд наполняют известным количеством воды, температура которой до опыта измеряется (пусть она равна t_1). Затем берут тело, теплоемкость которого хотят измерить, и нагревают до известной температуры t_2 (например, помещают в пары кипящей воды, так что температура $t_2 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Нагретое тело опускают в воду калориметра, закрывают крышку и, помешивая мешалкой, ждут, пока температура в калориметре установится (это будет, когда вода и тело примут одинаковую температуру). Тогда отмечают эту температуру t .

Из результатов опытов можно найти удельную теплоемкость тела C , пользуясь тем, что уменьшение энергии охлаждающегося тела равно увеличению энергии нагревающейся при этом воды и калориметра, т. е. применяя закон сохранения энергии.

При не очень точных измерениях можно считать, что вода калориметра, сам калориметр, мешалка и тело, теплоемкость которого измеряется, за время опыта не успеют отдать заметное количество теплоты окружающим телам.

Теплота фазовых переходов. Опыт показывает, что одно и то же однородное вещество в зависимости от внешних условий может находиться в различных состояниях, т. е. иметь разные макроскопические свойства (например, плотность, вязкость, проводимость и т. д.), и наоборот, при заданных внешних условиях в тепловом равновесии вещество может существовать не как однородное тело, а распадаться на две или более соприкасающиеся однородные части, находящиеся в различных макроскопических состояниях. Такие состояния называются фазовыми состояниями вещества. Фаза — термодинамически равновесное состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний того же вещества. Если, например, в закрытом сосуде находится вода, то эта система является двухфазной: жидкая фаза — вода; газообразная фаза — водяные пары.

Если система является однокомпонентной, т. е. состоящей из химически однородного вещества, то понятие фазы совпадает с понятием агрегатного состояния вещества, которое может быть жидким, твердым или газообразным. Агрегатное состояние вещества зависит от его давления P и температуры T .

Кривые фазового равновесия на диаграмме состояния показывают значения давления и температуры, при которых возможно равновесие. Точка, в которой пересекаются эти кривые, определяет температуру $T_{кр}$ и давление $P_{кр}$ одновременного равновесного сосуществования трех фаз вещества. Эта точка называется тройной точкой. Каждое вещество имеет только одну тройную точку. Тройная точка воды характеризуется температурой $T = 273,16\text{ К}$ ($t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) и давлением $P = 610,5\text{ Па}$ (см. рис. 13.8).

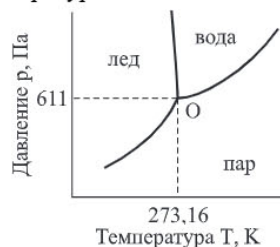


Рис. 13.8. Фазовая диаграмма воды

Процесс изменения фазы сопровождается передачей некоторого количества энергии. Вот как это происходит при фазовых превращениях льда. Если лед поместить в сосуд и поставить его над работающей горелкой, сосуд нагреется и лед начнет таять. Однако до тех пор, пока весь лед не превратится в жидкость, температура воды не поднимется выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, вне зависимости от степени разогрева плиты. Это происходит из-за того, что вся подводимая ко льду теплота идет на преодоление физических сил, связывающих между собой его молекулы. У льда молекулы воды удерживаются вместе межмолекулярными связями, формирующимися между атомом водорода и кислорода. Результирующая кристаллическая структура имеет довольно высокую прочность. При $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ молекулы движутся настолько быстро, что связи ослабевают. Часть межмолекулярных связей разрывается, позволяя молекулам воды покидать лед с образованием жидкости. Такой процесс называется фазовым переходом (вода переходит из твердой фазы в жидкую), а температура, при которой он протекает, называется точкой плавления.

Теплота, необходимая для завершения описанного выше фазового превращения, называется скрытой теплотой плавления, или теплотой фазового перехода, так как эта теплота не приводит к росту температуры. Только после того, как последние связи будут разрушены и весь лед расплавится, температура воды начнет увеличиваться и станет выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дальнейшее нагревание может привести к превращению части (или всей) воды в газообразное состояние (пар).

Испарение также относится к фазовым переходам, которые характеризуются отличной от нуля скрытой теплотой фазового перехода.

Таблица 11. Удельная теплота плавления веществ, 10^5 Дж/кг

Твердые вещества			
Алюминий	3,8	Свинец	0,25
Вольфрам	1,84	Серебро	0,87
Железо (чистое)	2,7	Сталь	0,82–0,84
Золото	0,666	Стекло	
Лед	3,3–3,4	Цинк	1,12–1,2
Медь	1,75	Чугун (белый)	1,4
Олово	0,59	Чугун (серый)	0,96
Ртуть	0,12		

Теплота фазового перехода — количество теплоты, которое необходимо сообщить в равновесном процессе веществу для его перехода из одной фазы в другую. Теплота фазового перехода для единицы массы вещества называется удельной теплотой фазового перехода. Все те же процессы при оттоке энергии (охлаждении) вещества происходят в обратном порядке. Сначала газ остывает с понижением температуры, и так происходит, пока он не достигнет точки конденсации — температуры, при которой начинается сжижение, — и она в точности равна температуре испарения (кипения) соответствующей жидкости. При конденсации, по мере того как силы взаимного притяжения между молекулами начинают брать верх над энергией теплового движения, газ начинает превращаться в жидкость — конденсироваться. При этом выделяется так называемая удельная теплота конденсации — она в точности равна скрытой удельной теплоте испарения, о которой уже говорилось. То есть сколько энергии вы потратили на испарение определенной массы жидкости, ровно столько энергии пар и отдаст в виде тепла при конденсации обратно в жидкость.

При дальнейшем остывании жидкости до точки замерзания (температура которой равна точке таяния), еще раз начнется процесс отдачи тепловой энергии вовне без понижения температуры самого вещества. Этот процесс называется *кристаллизацией*, и при нем выделяется ровно столько же тепловой энергии, сколько отбирается из окружающей среды при плавлении (переходе вещества из твердой фазы в жидкую). Ниже суммированы примеры фазовых переходов — так называемых фазовых переходов первого рода².

Плавление — переход из твердого кристаллического состояния в жидкое.

Кристаллизация (затвердевание) — переход вещества из жидкого состояния в кристаллическое (твердое).

Сублимация (возгонка) — переход из твердого кристаллического состояния в газообразное.

² Фазовые переходы II рода — фазовые превращения, при которых плотность вещества, энтропия и термодинамические потенциалы не испытывают скачкообразных изменений, а теплоемкость, сжимаемость, коэффициент термического расширения фаз меняются скачком. Примеры: переход He в сверхтекучее состояние, переход Fe из ферромагнитного состояния в парамагнитное (в точке Кюри).

Конденсация — переход из газообразного состояния в жидкое или твердое.

Испарение — переход из жидкого состояния в газообразное.

Количество теплоты, которое требуется для превращения 1,0 кг вещества из твердого состояния в жидкое, называется теплотой плавления.

Количество теплоты, необходимое для превращения 1,0 кг вещества из жидкого состояния в пар, называется теплотой испарения (парообразования).

Теплота испарения и теплота плавления также количественно связаны с теплотой, выделяющейся при переходе из газообразного состояния в жидкое и из жидкого состояния в твердое.

Тепловой эффект фазового перехода I рода рассчитывается по формуле

$$Q = \lambda m,$$

где λ — удельная теплота фазового перехода (имеет размерность Дж/кг), то есть количество тепла, поглощаемого или выделяемого при фазовом переходе; m — масса вещества. В справочных таблицах приводятся значения удельной теплоты плавления, кипения, парообразования и конденсации веществ. Значения теплоты плавления и теплоты испарения часто называют также скрытой теплотой, или теплотой фазового перехода.

Способы передачи теплоты. Существуют три основных вида теплообмена: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

Теплопроводность — это молекулярный перенос теплоты между непосредственно соприкасающимися телами или частицами одного тела с различной температурой, при котором происходит обмен энергией движения структурных частиц (молекул, атомов, свободных электронов).

Конвекция осуществляется путем перемещения в пространстве неравномерно нагретых объемов среды. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Тепловое излучение характеризуется переносом энергии от одного тела к другому электромагнитными волнами.

Нередко все способы переноса теплоты осуществляются совместно. Например, конвекция всегда сопровождается теплопроводностью, так как при этом неизбежно соприкосновение частиц, имеющих различные температуры. Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называется конвективным теплообменом.



Рис. 13.9

I. Теплопроводность. Внутренняя энергия, как и любой вид энергии, может быть передана от одних тел к другим. Внутренняя энергия может передаваться и от одной части тела к другой. Явление передачи внутренней энергии от одной части тела к другой или от одного тела к другому при их непосредственном контакте называется теплопроводностью. Явление теплопроводности наблюдается всегда, если в веществе имеется разность температур, обусловленная какими-либо внешними причинами. С макроскопической точки зрения явление теплопроводности заключается в переносе тепла от горячего слоя к холодному и про-

должается до тех пор, пока температура во всем теле не выровняется. В молекулярно-кинетической теории процесс теплопроводности объясняется тем, что молекулы из горячего слоя, где они имеют большую среднюю кинетическую энергию, проникая в холодную область, передают при столкновениях молекулам этой области часть их кинетической энергии. Для распространения теплоты в любом теле или пространстве необходимо наличие разности температур в различных точках тела. Так, например, если один конец железного стержня нагреть в пламени, то другой его конец, находящийся в руке, постепенно нагреется и будет жечь



Рис. 13.10. Демонстрация передачи тепла во времени

руку. Такое явление демонстрирует следующий опыт. Закрепим один конец толстой медной проволоки в штативе. К проволоке прикрепим воском несколько гвоздиков (рис. 13.10). При нагревании свободного конца проволоки в пламени спиртовки воск будет таять. Гвоздики начнут постепенно отваливаться. Сначала отпадут те, которые расположены ближе к пламени, затем по очереди все остальные.

Поскольку частицы постоянно взаимодействуют друг с другом, то увеличивается скорость движения соседних частиц. Начинает повышаться температура следующей части проволоки и т. д. Следует помнить, что при теплопроводности не происходит переноса вещества от одного конца тела к другому.

Передача теплоты в неподвижной среде (жидкости, газе) происходит по закону Фурье: тепловой поток q пропорционален градиенту температуры:

$$dq/dt = -\lambda (dT/dx),$$

где q — количество теплоты, передаваемое через единицу поверхности в единицу времени; dT/dx — градиент температуры, т. е. производная от температуры по координате, нормальной к поверхности, через которую происходит передача теплоты. Минус в правой части показывает, что в направлении теплового потока температура убывает и величина dT/dx (иначе $\text{grad } T$) является величиной отрицательной. Множитель пропорциональности λ называют коэффициентом теплопроводности. Он характеризует количество теплоты, передаваемой в единицу времени через единицу поверхности при изменении температуры на 1°C на единицу длины.

Приведенный выше закон Фурье подтверждается опытами.

Отклонения от закона Фурье могут появиться при очень больших значениях $\text{grad } T$ (например, в сильных ударных волнах), при низких температурах (для жидкого гелия He II) и при высоких температурах порядка десятков и сотен тысяч градусов, когда в газах перенос энергии осуществляется не только в результате межатомных столкновений, но в основном за счет излучения. В разреженных газах, когда длина свободного пробега молекул сравнима с расстоянием между стенками, ограничивающими объем газа, молекулы чаще сталкиваются со стенками, чем между собой. При этом нарушается условие применимости закона Фурье и само понятие локальной температуры газа теряет смысл.

Способность проводить тепло у разных веществ сильно различается. Внесем в огонь конец деревянной палки. Он воспламенится. Другой конец палки, находящийся снаружи, будет холодным. Значит, дерево обладает плохой теплопро-

водностью. Поднесем к пламени спиртовки конец тонкой стеклянной палочки. Через некоторое время он нагреется, другой же конец останется холодным. Следовательно, и стекло имеет плохую теплопроводность. Если же мы будем нагревать в пламени конец металлического стержня, то очень скоро весь стержень сильно нагреется. Удержать его в руках мы уже не сможем. Значит, металлы хорошо проводят тепло, т. е. имеют большую теплопроводность. Наибольшей теплопроводностью обладают серебро и медь. Сказанное иллюстрируют данные таблицы 12.

Таблица 12. Коэффициенты теплопроводности некоторых веществ

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м · К)
Серебро	407
Медь	384
Оксид бериллия (бериллиевая керамика)	200–240
Дюралюминий	186
Латунь	111
Сталь	47
Номакон-GS	1–2
Паста КПТ-8	0,7–0,8
Слюда	0,43–0,6
Воздух	0,03
Вакуум	0

Воздух плохо проводит тепло. Поэтому для удержания тепла в доме делают двойные рамы. Одежда предохраняет тело от охлаждения, потому что удерживает нагретый нами воздух и не дает ему легко уходить из нашего тела. При этом пух и перо являются очень хорошими теплоизоляторами, так как способны удерживать значительный объем воздуха.

II. Конвекция. Если вытянуть руку над горячей плитой или над горящей электрической лампочкой, можно ощутить, как над этими предметами поднимаются струи теплого воздуха. Листик бумаги, подвешенный над горячей батареей отопления или электрической лампочкой, под воздействием поднимающегося теплого воздуха начинает вращаться. Подобное явление можно объяснить следующим образом. Воздух соприкасается с горячей лампой, нагревается, расширяется и обретает менее плотное состояние в отличие от окружающего холодного воздуха. Сила Архимеда, которая действует на теплый воздух со стороны холодного воздуха снизу вверх, превосходит силу тяжести, которая действует на теплый воздух. При этом $F_A = g\Delta\rho$ — подъемная сила, действующая на единичный объем.

Таким образом, теплый воздух поднимается вверх, тем самым уступая место холодному воздуху. Подобные явления мы можем наблюдать при нагревании жидкости снизу. Теплые слои жидкости — менее плотные, а следовательно, более легкие — вытесняются вверх более плотными и тяжелыми холодными

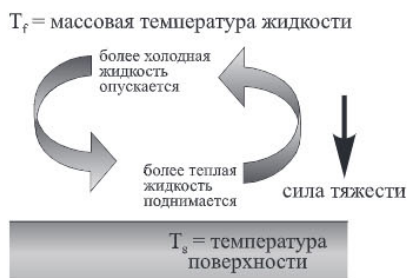


Рис. 13.11

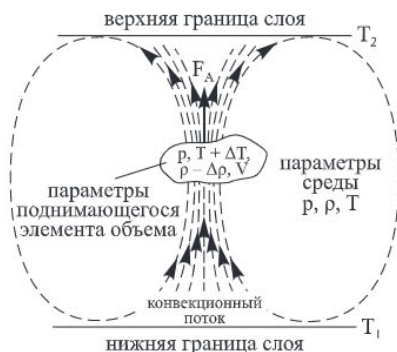


Рис. 13.12. Схема образования конвекции

слоями. Холодные слои жидкости, опустившись вниз, нагреваются от источника тепла и снова вытесняются менее нагретой жидкостью (рис. 13.11).

Условия образования конвекции таковы: температура T_1 в глубине конвективного слоя выше, чем на его поверхности T_2 . Температура поднимающегося элемента на протяжении всего подъема выше, а плотность ρ ниже, чем у окружающей среды (рис. 13.12).

Такое движение равномерно прогревает всю воду. Это можно увидеть более наглядно, если на дно сосуда положить немного кристалликов марганцовки, которая окрашивает воду в фиолетовый цвет. Термин «конвекция» (от лат. convection — доставка) был предложен в 1834 году англичанином Вильямом Прутом для описания распространения тепла в движущейся жидкости.

Конвекция возникает при существовании тепловой неоднородности в жидкостной и газовой средах. При этом энергия перемещается самими струями газа или жидкости. Существует два вида конвекции.

Конвекции: естественная (или, другими словами, свободная) и вынужденная. Примеры с нагревом жидкости и воздуха в комнате являются примерами *естественной конвекции*. Мы можем наблюдать *вынужденную конвекцию*, когда перемешиваем жидкость ложкой, мешалкой, насосом.

Такие вещества, как жидкости и газы, необходимо нагревать снизу. Если же делать наоборот (нагревать их сверху), конвекции не будет. Теплые слои не могут физически опуститься ниже холодных, более плотных и тяжелых. Таким образом, для протекания процесса конвекции необходимо нагревать газы и жидкости снизу.

Фундаментальной характеристикой процесса возникновения конвекции является существование порога, выше которого существует организованное движение упорядоченных структур. Существует также стабилизирующее воздействие вязкости, стремящееся подавить движение.

Естественная конвекция широко распространена в природе: в нижнем слое земной атмосферы, в океане, в недрах Земли, в звездах. Процессы, идущие в мантии Земли, оказывают самое непосредственное влияние на земную кору и поверхность Земли, являются причиной движения континентов, вулканизма, землетрясений, горообразования и формирования рудных месторождений.

Конвективные потоки приводят к возникновению таких атмосферных явлений, как ветер, ураганы, циклоны.

В условиях невесомости конвективные потоки исчезают, так как исчезает поддерживающая сила. Поэтому, например, в условиях невесомости невозможно

горение (если не обеспечена искусственная тяга); продукты горения не удаляются из пламени, и оно гаснет вследствие недостатка кислорода.

III. Излучение. Теплопередача излучением происходит между материалами различной температуры, но по своей природе излучение не требует физического контакта, движущейся жидкости или любой другой среды для передачи энергии. Например, теплопередача в вакууме возможна только излучением. При теплопередаче через атмосферу излучение не очень сильно влияет на температуру среды, через которую проходит.

Термин «излучение» указывает на то, что энергия передается от тела к телу в виде электромагнитных волн.

Излучение может быть как природного, так и искусственного происхождения (в последнем случае оно появляется в результате человеческой деятельности). Основную дозу облучения люди получают из природных источников. Электромагнитный спектр очень пестр. Из всего этого многообразия человек воспринимает тепло и видимый свет. Подробнее вопросы излучения будут рассмотрены в дальнейшем.

Тепловое расширение. Наблюдение, что изменения температуры тел постоянно сопровождаются изменениями их объемов, относятся уже к отдаленной древности, тем не менее определение абсолютной величины этих изменений принадлежит только новейшему времени. До изобретения термометров о подобных определениях, разумеется, нельзя было и думать, но зато с развитием термометрии точное исследование этой связи становилось совершенно необходимым. К температурным колебаниям особенно чувствителен металлический стержень маятника: он то удлиняется, то укорачивается. От этого нарушается равномерность качания маятника. Еще в конце XVII века на это явление обратили внимание физики и часовщики. При одной и той же температуре некоторые металлы расширяются больше, чем другие. Это особенно заметно при нагреве таких металлов, как железо и цинк. Первые точные измерения теплового расширения твердых тел были выполнены Лавуазье и Лапласом в 1782 году. Их метод долгое время описывался во многих курсах физики девятнадцатого и начала двадцатого веков. В этих опытах полосу испытуемого тела помещали сначала в тающий лед, а затем в кипящую воду, чтобы эффект изменения размера был максимальным. Были получены данные для стекла различных сортов, стали и железа, а также для разных сортов золота, меди, латуни, серебра, олова, свинца. Ученые установили, что в зависимости от способа приготовления металла результаты получаются различными. Полоса из незакаленной стали увеличивается на 0,001079 первоначального значения длины при нагревании на 100°, а из закаленной стали — на 0,001239. Для кованого железа было получено значение 0,001220, для круглого тянутого — 0,001235. Полученные цифры свидетельствуют о высокой точности метода измерений.

До начала XVIII века ученые не знали, как можно устранить влияние температуры на длину маятника, о чем говорилось выше. Возникла мысль: нельзя ли сделать стержень маятника из нескольких металлов, различно расширяющихся от теплоты, и достичь такой комбинации металлов, чтобы длина маятника всегда оставалась неизменной? Такой уравнилительный или компенсированный маятник первые изобрел английский часовщик Джон Гаррисон. Им были созданы биме-

таллические пластины для термокомпенсации его морского хронометра. Принцип действия основан на свойствах биметаллической пластины менять свою форму при нагревании. Биметаллическая пластина изготавливается из двух металлов или из механически соединенных кусков двух различных металлов. Один конец (на рис. 13.13 — из латуни (brass) и стали (steel)), как правило, неподвижно закреплен в устройстве, а другой перемещается в зависимости от температуры пластины. Биметаллические пластины в дальнейшем нашли широкое применение в различных областях техники.

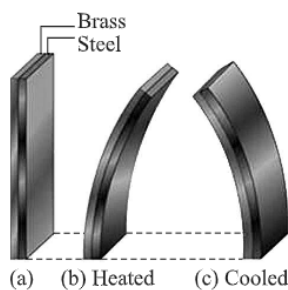


Рис. 13.13

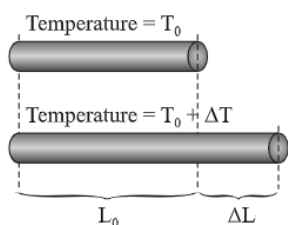


Рис. 13.14

Для защиты двигателей (приборов) от перегрузок наиболее широкое распространение получили тепловые реле с биметаллической пластинкой. Принцип действия биметаллических тепловых реле основан на разности линейного удлинения двух пластин, выполненных из различных материалов. Биметаллическая пластина состоит из двух сложенных вместе и жестко скрепленных пластин из металлов с разным коэффициентом температурного расширения. При нагревании одна из пластин удлиняется сильнее, чем вторая, но из-за того, что они жестко скреплены друг с другом, происходит изгиб в сторону пластины с меньшим коэффициентом температурного расширения, при этом замыкается электрический контакт. Термостат подобного типа можно встретить в обычном бытовом электрическом утюге.

Основной закон теплового расширения гласит, что тело с линейным размером L в соответствующем измерении при увеличении его температуры на ΔT (при охлаждении знак у ΔT отрицательный) расширяется на величину ΔL (рис. 13.14):

$$\Delta L = \alpha \Delta T L,$$

где α — так называемый коэффициент линейного теплового расширения. В таблице 13 приведены коэффициенты линейного теплового расширения некоторых веществ.

Таблица 13. Линейные коэффициенты расширения

Вещество	$\alpha, 1/^\circ\text{C}$	Вещество	$\alpha, 1/^\circ\text{C}$
Алюминий	0,000024	Платина	0,000009
Железо	0,000012	Серебро	0,000019
Золото	0,000014	Сталь	0,000012
Латунь	0,000019	Стекло	0,000009
Медь	0,000017	Цемент	0,000014
Олово	0,000027	Цинк	0,000029

Аналогичные формулы имеются для расчета изменения площади и объема тела. В приведенном простейшем случае, когда коэффициент теплового расширения не зависит ни от температуры, ни от направления расширения, вещество будет равномерно расширяться по всем направлениям в строгом соответствии с вышеприведенной формулой. Это легко видеть на следующем опыте. Если

взять кольцо и металлический шар близкого к кольцу диаметра и шар нагреть, то через кольцо из-за теплового расширения он не пройдет (рис. 13.15, а), но остывший шар легко проскользнет (рис. 13.15, б). При одинаковой температуре кольца и шара шар свободно проходит через кольцо.

Если нагреть шар, то вследствие его расширения он застревает в кольце до тех пор, пока их температуры не сравняются. В случае объемного расширения вводят объемный коэффициент теплового расширения β . Коэффициент объемного расширения β равен отношению относительного объемного расширения $\Delta V/V_1$ к разности температур Δt . Объем после нагревания $V_2 = V_1(1 + \beta\Delta t)$.

Каждый материал характеризуется собственным значением коэффициента объемного расширения β . Этот коэффициент слабо зависит от температуры.

Большинство веществ расширяется в равной степени во всех направлениях, хотя некоторые, например дерево, имеют различную способность к расширению вдоль и поперек волокон. Ясно, что металлический стержень расширяется во всех направлениях одинаково, но поскольку на практике учитывается лишь его длина, то удобно принимать во внимание только расширение вдоль его длины и говорить о линейном расширении.

подавляющее большинство веществ при нагревании расширяются. Это легко объяснимо с позиции кинетической теории, поскольку при нагревании молекулы или атомы вещества начинают двигаться быстрее.

Тепловое расширение газа — довольно простое физическое явление. Суть его заключается в том, что при постоянном давлении нагревающийся газ увеличивает объем, который он занимает. А при охлаждении, наоборот, уменьшает. Стандартная система, которую рисуют во всех учебниках физики, — цилиндр, закрытый подвижным поршнем. Газ нагревается — поршень едет вверх, газ охлаждается — поршень едет вниз (см. рис. 13.6).

Жидкости по большей части расширяются с повышением температуры по причине увеличения скорости теплового движения свободных молекул.

Однако не все материалы, особенно это касается кристаллических твердых тел, расширяются равномерно по всем направлениям. И далеко не все материалы расширяются одинаково при разных температурах. Самый яркий пример последнего рода — вода. При охлаждении вода сначала сжимается, как и большинство веществ. Однако начиная с $+4^\circ\text{C}$ и до точки замерзания 0°C вода начинает расширяться при охлаждении и сжиматься при нагревании (с точки зрения приведенной выше формулы можно сказать, что в интервале температур от 0°C до $+4^\circ\text{C}$ коэффициент теплового расширения воды α принимает отрицательное значение). Именно благодаря этому редкому эффекту земные моря и океаны не промерзают до дна даже в самые сильные морозы: вода холоднее $+4^\circ\text{C}$ становится менее плотной, чем более теплая, и всплывает к поверхности, вытесняя ко дну воду с температурой выше $+4^\circ\text{C}$.

То, что лед имеет удельную плотность ниже плотности воды, — еще одно (хотя и не связанное с предыдущим) аномальное свойство воды, которому мы обязаны существованием жизни на нашей планете. Если бы не этот эффект, лед шел бы ко дну рек, озер и океанов и они опять же вымерзли бы до дна, убив все живое.

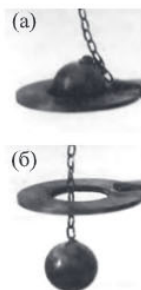


Рис. 13.15. Демонстрация объемного расширения тел при нагревании

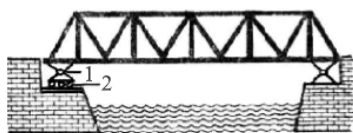


Рис. 13.16

Но тепловое расширение тел часто не столь безобидно. Вредное влияние теплового расширения приходится учитывать и при постройке мостов, плотин, металлургических печей и других сооружений. Строя мостовую ферму на береговом устое, закрепляют наглухо только один ее конец (см. рис. 13.16), а другой устанавливают с помощью шарнира (1) на подвижной опоре, которая помещается на стальных катках (2). Вследствие этого при тепловом расширении ферма свободно передвигается на катках, не расшатывая и не повреждая береговые устои. Летом железная дорога длиннее, чем зимой, поэтому между металлическими рельсами железной дороги оставляют промежутки. И подобных примеров множество.

В процессе изучения тепловых явлений формировалась наука о теплоте — термодинамика. Кельвин, изучая новые законы тепловой механики, в 1854 году дает этой науке название «термодинамика» (от греч. слов «тепло» + «сила»). Термодинамика появилась на свет, когда люди приручили «движущую силу огня», создав паровую машину. Сначала термодинамика занималась исследованием теплоты. Однако со временем термодинамика существенно расширилась и стала теорией о превращениях всех форм энергии. В таком виде термодинамика существует и по сей день. Ценность термодинамики оказалась настолько велика, что английский писатель, физик Чарльз Перси Сноу предложил ввести тест на общую культуру, согласно которому незнание второго начала термодинамики приравнивалось бы к незнанию произведений Шекспира.

14. Наука о превращениях всех форм энергии. Термодинамические системы. Законы (начала) термодинамики. Первое начало и невозможность вечного двигателя. Адиабатический процесс. Второе начало термодинамики. Принцип работы теплового двигателя. Цикл Карно. «Балансовый отчет» энергии. Энтропия. Недостижимость абсолютного нуля температуры.

Термодинамика исторически возникла как эмпирическая наука об основных способах преобразования внутренней энергии нагретых тел в механическую. Однако в процессе своего развития термодинамика проникла во все разделы физики, где возможно ввести понятие «внутренняя энергия», и позволила теоретически предсказать многие явления задолго до появления строгой теории этих явлений.

Объектом изучения термодинамики являются термодинамические системы. *Термодинамическая система* — это совокупность физических тел, которые могут взаимодействовать энергетически между собой и с другими телами, а также обмениваться с ними веществом. Выделяют открытые, закрытые, изолированные термодинамические системы.

Открытая термодинамическая система — термодинамическая система, которая обменивается веществом и энергией с другими системами. Растения и животные, обменивающиеся с окружающей средой пищей, кислородом, продуктами жизнедеятельности, — это открытые системы.

Замкнутая система — это система, масса которой постоянна.

Говорят, что замкнутая система является изолированной термодинамической системой, если она не обменивается с внешней средой энергией и веществом. А что в жизни и в физике? В физике изучают многие идеализированные системы, которые представляют собой замкнутые системы. А в природе большинство реально существующих материальных систем являются открытыми.

Возможно существование систем, которые приближенно можно считать закрытыми (например, воздух в герметически замкнутой комнате обменивается через стекло с воздухом на улице тепловой энергией, но не веществом), адиабатическими (например, горячий чай, помещенный в термос, не обменивается теплом с окружающей средой) или замкнутыми (например, невозможен обмен массой со средой за счет совершения работы для нагретого солнцем камня). Но существование полностью изолированных систем невозможно, такие системы являются идеализацией, но именно их рассмотрение составляет теоретическую основу классической термодинамики.

Большое значение в рассмотрении термодинамических процессов имеют понятия «внутренняя энергия», «работа», «теплота» и «теплообмен» — все, о чем рассказано выше. Внутренняя энергия (U) — энергия тела, зависящая только от его внутреннего состояния. Это понятие объединяет все виды энергии тела, за исключением энергии его движения как целого и потенциальной энергии, которой тело может обладать, если оно находится в поле каких-нибудь сил (например, в поле сил тяготения, электрическом, магнитном поле). В случае идеального газа изменение внутренней энергии сводится к изменению кинетической энергии его молекул, определяемой температурой. В физических системах, частицы которых взаимодействуют между собой (реальные газы, жидкости, твердые тела), внутренняя энергия включает также энергию межмолекулярных и внутримолекулярных взаимодействий (энергию химических связей, энергию ядерных взаимодействий). Внутренняя энергия таких систем зависит как от температуры, так и от давления (объема). Равновесное состояние системы определяется такими переменными, как P , V , T и n (число молей) для газа. Такие понятия, как работа и теплота, не используются для описания состояния. Когда же над системой совершается работа (например, происходит сжатие газа) или когда в систему поступает или от нее отбирается теплота, тогда состояние системы изменяется. В этом случае работа и теплота включаются в термодинамические процессы, которые могут переводить систему из одного состояния в другое.

Обратимся к внутренней энергии термодинамической системы. Эта энергия включает в себя энергию теплового (поступательного, вращательного и колебательного) движения молекул и потенциальную энергию их взаимодействия. Возможны два способа изменения внутренней энергии термодинамической системы при ее взаимодействии с внешними телами: путем совершения работы и путем теплообмена.

Работа, совершаемая при изменении объема. Рассмотрим часто встречающийся в термодинамике процесс — изменение объема газа при расширении или сжатии. Вычислим работу, совершаемую газом при его квазистатическом расширении. Под квазистатическим, то есть почти статическим, будем понимать процесс, который происходит так медленно, что система проходит через бесконечный ряд близких равновесных состояний. Так что температуру и давление

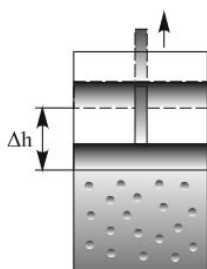


Рис. 14.1

можно определить в любой момент времени. Газ расширяется под поршнем, как показано на рис. 14.1. Поршень, площадь которого S , перемещается очень медленно с постоянной скоростью. На него действует равная по величине сила, направленная противоположно перемещению (этой силой может быть внешнее давление или трение). Газ действует на поршень силой $F = PS$, где P — давление газа. Работа, совершаемая расширяющимся газом при перемещении поршня на малое расстояние Δh , дается выражением $dA = F\Delta h = PS\Delta h$. Так как $dV = S\Delta h$ есть бесконечно малое увеличение объема, то $dA = P dV$. Если бы газ сжимался, то работа, совершаемая газом по перемещению поршня, была бы отрицательной: $dV < 0$, то есть объем бы уменьшался. Полную работу A найдем интегрированием выражения для dA :

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

В итоге получим работу, совершаемую при любых изменениях объема газом, жидкостью или твердым телом, только если эти изменения являются квазистатическими.

Чтобы проинтегрировать выражение, необходимо знать, как в ходе процесса меняется давление, а это зависит от вида процесса.

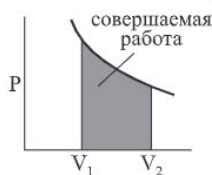


Рис. 14.2

Теперь представим себе, что у нас имеется некоторое количество идеального газа и мы хотим расширить его, то есть увеличить его объем от V_1 до V_2 , но таким образом, чтобы начальная и конечная температура совпали. Это означает, что мы должны использовать изотермический процесс. А чтобы быть уверенным, что температура остается постоянной, необходимо предположить, что газ находится в тепловом контакте с термостатом и что процесс расширения происходит очень медленно, то есть весь газ имеет одну и ту же температуру. Этот процесс показан на рис. 14.2. Совершаемая работа равна площади между двумя точками объема V . Вычислим интеграл для случая идеального газа. Используем уравнение состояния, которое дает следующую зависимость между давлением и температурой: $P = nRT/V$. Подставляя выражение для давления под интеграл, в итоге получим

$$A = nRT \ln(V_2/V_1).$$

При изотермическом процессе, который протекает при постоянной температуре, газ выполняет работу за счет расширения. Расширение газа характеризуется его объемом, который изменяется в зависимости от изменения давления газа, обусловленного внешними воздействиями. При изотермическом расширении молекулы газа, сталкиваясь с поршнем, уменьшают свою скорость и, соответственно, среднюю энергию. При изотермическом расширении ($A > 0$) и сжатии ($A < 0$) к газу подводят или отводят ($Q < 0$) определенное количество теплоты. При изотермическом процессе ($\Delta T = 0$) внутренняя энергия идеального газа не меняется. Все переданное газу количество теплоты идет на совершение работы: $Q = A$, внутренняя энергия газа остается неизменной.

Рассмотрим теперь другой процесс. Пусть в цилиндре с незакрепленным невесомым поршнем находится идеальный газ. Нагреем его, сообщив газу количество теплоты Q . Поскольку поршень не закреплен, давление газа p постоянно и равно атмосферному. При нагревании на dT происходит изобарное расширение газа и его объем увеличивается на $dV = S dh$ (где S — площадь поршня, dh — высота поднятия поршня). Работа расширения газа $A = F dh = pS dh = p dV$. Сравнивая эту формулу с полученной выше, видим, что мы получили формулу для работы газа, которая справедлива не только для изобарного процесса, но и для любого процесса, в котором объем газа изменяется на сколь угодно малую величину dV . При изобарном процессе количество теплоты, сообщаемое газу, расходуется как на его нагревание (т. е. на увеличение внутренней энергии), так и на работу расширения, которую газ совершает против сил внешнего давления. При изобарном нагревании газа на dT его объем увеличивается на dV . Интегрируя полученное выше выражение для элемента работы в случае постоянного давления (изобарный процесс), получим, что работа газа при изобарном расширении может быть записана так:

$$A = P(V_2 - V_1) = nR(T_2 - T_1).$$

Эту формулу можно получить и путем следующих рассуждений. Из точки V_1 в точку V_2 (рис. 14.3) можно попасть таким путем. Можно сначала понизить давление от значения P_1 до некоторого P_2 при постоянном объеме V_1 (такой процесс, как мы знаем, называется изохорическим), а затем позволить газу расшириться от объема V_1 до объема V_2 при постоянном давлении P_2 (изобарический процесс).

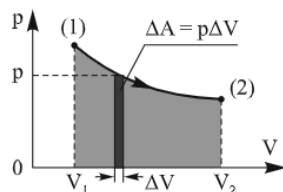


Рис. 14.3

На первом участке работа равна нулю, так как $\Delta V = 0$. На втором участке, где давление постоянно, имеем $A = P_2(V_2 - V_1)$.

Если это выражение использовать для случая идеального газа, тогда получим $A = nRT_2(1 - V_1/V_2)$.

Сравнивая выражения для работы, полученной для двух рассмотренных процессов, можно сделать вывод, что работа, совершаемая при переходе системы из одного состояния в другое, зависит не только от начального и конечного состояния, но и от вида процесса. Также и теплота, поступающая в систему, для того, чтобы газ перешел из одного состояния в другое (из состояния 1 в состояние 2) будет также зависеть не только от начального и конечного состояний, но и от «пути», то есть вида процесса.

О законах (началах) термодинамики. Термодинамика основана на небольшом числе утверждений, которые в сжатой форме вобрали в себя огромный опыт людей по изучению энергии. Эти утверждения носят название законов, или начал, термодинамики. Начала термодинамики независимы, то есть ни одно из них не может быть выведено из других начал.

Нулевое начало термодинамики (общее начало термодинамики) — физический принцип, утверждающий, что вне зависимости от начального состояния изолированной системы в конце концов в ней установится термодинамическое равновесие, а также что все части системы при достижении термодинамического равновесия будут иметь одинаковую температуру. Тем самым нулевое начало фактически вводит и определяет понятие температуры.

Первое начало термодинамики. Количество теплоты, полученное системой, идет на изменение ее внутренней энергии и совершение работы против внешних сил. Изменение внутренней энергии системы, при переходе ее из одного состояния в другое, равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе, и не зависит от способа, которым осуществляется этот переход.

Второе начало термодинамики. Невозможен процесс, единственным результатом которого являлась бы передача тепла от более холодного тела к более горячему.

Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара.

Третье начало термодинамики может быть сформулировано так: приращение энтропии (как на меру беспорядка в системе) при абсолютном нуле температуры стремится к конечному пределу, не зависящему от того, в каком равновесном состоянии находится система. Что такое энтропия, будет рассказано в дальнейшем. Это очень важное понятие, и его обязательно необходимо разобрать.

Теперь рассмотрим эти законы подробнее.

Первое начало термодинамики. Известно, что в процессе превращения энергии действует закон сохранения энергии. Об этом мы говорили, когда обсуждали опыт Джоуля. Поскольку тепловое движение тоже механическое (только не направленное, а хаотическое), то при всех превращениях должен выполняться закон сохранения энергии не только внешних, но и внутренних движений. В этом заключается качественная формулировка закона сохранения энергии для термодинамической системы — первое начало термодинамики. Количественная его формулировка: количество теплоты ΔQ , сообщенное телу, идет на увеличение его внутренней энергии ΔU и на совершение телом работы ΔA , т. е.

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A.$$

Это соотношение можно переписать следующим образом: $\Delta U = \Delta Q - \Delta A$. А также и в интегральной форме: $U = Q - A$. Заметим, что в случае, когда работа A совершается над системой, она будет отрицательна и внутренняя энергия будет увеличиваться.

Таким образом, изменение внутренней энергии замкнутой системы есть разность между сообщенной этой системе теплотой и совершенной этой системой работой. Так как Q и A выражают способы передачи энергии в систему или из нее, тогда формулировка первого начала термодинамики является просто формулировкой закона сохранения энергии. Написанный закон применим к замкнутой системе. Его можно применять также и для незамкнутых систем, если учесть изменение внутренней энергии вследствие увеличения или уменьшения количества вещества в системе. Для изолированной системы, где по определению $A = Q$, $\Delta U = 0$.

Из первого начала термодинамики следует важный вывод: невозможен вечный двигатель первого рода, т. е. такой двигатель, который совершал бы работу «из ничего», без внешнего источника энергии. При наличии внешнего источника часть энергии неизбежно переходит в энергию теплового, хаотического движения молекул, что и является причиной невозможности полного превращения энергии внешнего источника в полезную работу, а значит, и Perpetuum Mobile (вечный двигатель) невозможен.

Замечание о вечном двигателе. С латинского языка словосочетание «вечный двигатель» переводится как постоянное или же вечное движение. Доподлинно не известно, кто и когда первый попытался создать вечный двигатель, но первое упоминание о нем в рукописях датируется XII веком. Рукописи принадлежат индийскому математику Бхаскаре. В них в стихотворной форме описывается некое колесо с прикрепленными к нему по периметру трубками, наполовину заполненными ртутью. Считалось, что за счет перетекания жидкости колесо будет само по себе вращаться бесконечно. Первые проекты вечного двигателя в Европе относятся к эпохе развития механики, приблизительно к XIII веку. К XVI–XVII векам идея вечного двигателя получила особенно широкое распространение. Обладание секретом такого двигателя казалось более заманчивым, чем даже искусство делать золото из недргоценных металлов. Множество людей занимались этой неразрешимой проблемой. Среди них были даже люди с неплохим по тем временам образованием.

Были придуманы сотни вечных двигателей различных конструкций, но ни один не двигался долго. Наиболее часто встречающаяся модель вечного двигателя, до сих пор возрождающаяся в различных вариациях благодаря горе-изобретателям, основана на применении колеса с неуравновешенными грузами.

Вот два примера: мнимое вечно движущееся колесо, придуманное в Средние века, и мнимый вечный двигатель с перекачивающимися шариками (рис. 14.4). К краям колеса прикреплены откидные палочки с грузами на концах. При всяком положении колеса грузы на правой стороне будут откиннуты дальше от центра, нежели на левой; эта половина, следовательно, должна перетягивать левую и тем самым заставлять колесо вращаться. Значит, колесо будет вращаться вечно, по крайней мере до тех пор, пока не перетрется ось. Так думал неизвестный изобретатель. Но этого не будет происходить, и вот почему: хотя грузы на правой стороне всегда дальше от центра, но неизбежно такое положение, когда число этих грузов меньше, чем на левой. Тогда система уравнивается, следовательно, колесо не будет вращаться, а, сделав несколько качаний, остановится.

Некоторые изобретатели вечных двигателей были просто жуликами, ловко надувавшими легковерную публику. Одним из наиболее выдающихся «изобретателей» был некий доктор Орфиреус (настоящая фамилия — Бесслер) (1680–1745). Перепробовав множество занятий, он пришел к изобретению вечного двигателя. 17 ноября 1717 года в присутствии известных физиков продемонстрировал своему покровителю ландграфу Карлу Гессен-Кассельскому изобретенный им вечный двигатель с диаметром вала больше 3,5 м. После запуска машины ее заперли, проверив через полтора месяца, убедились, что колесо двигателя вращается с прежней скоростью. Двигатель запускали, запирали комнату, представляли охрану и... убеждались, что колесо все еще крутится. Изобретателю даже выдали бумагу о том, что его вечный двигатель делает 50 оборотов в минуту, способен поднять 16 кг на высоту 1,5 м и может приводить в действие кузнечный мех и точильный станок. Слава Бесслера прогремела по всей Европе, но секрет устройства он тщательно скрывал. В 1719 году Бесслер под псевдонимом Offfygeus публикует трактат «Perpetuum Mobile Triumphans», в котором, в частности, утверждает, что ему удалось создать «мертвую материю, которая не только двигает себя, но может использоваться для поднятия весов и выполнения работы».

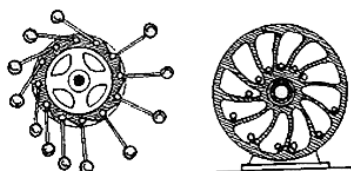


Рис. 14.4. Схемы вечных двигателей

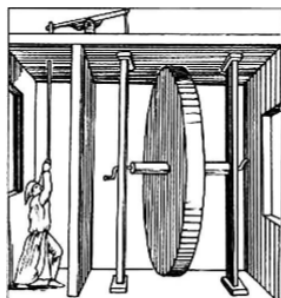


Рис. 14.5. Разоблачение секрета колеса Орфиреуса (со старинного рисунка)

Но время показало, что ничего вечного не бывает. После его ссоры со своей женой и служанкой, последняя призналась, что вечный двигатель приводился в движение спрятанными в соседнюю комнату людьми, незаметно дергавшими за тонкий шнурок. Бесслер был, пожалуй, самым удачливым авантюристом, так как безбедно прожил до старости, получая немалый доход от показа машины. Проекты вечных двигателей шли нескончаемым потоком во Французскую академию. Академики должны были тратить большую часть своего времени на опровержение присланных проектов. Кончилось тем, что *через 30 лет после смерти Бесслера Парижская академия наук приняла решение прекратить рассмотрение проектов вечных двигателей*, но это не остановило энтузиастов.

Адиабатический процесс. Адиабатическим, или адиабатным (от др.-греч. «непроходимый»), считают процесс в какой-либо макроскопической системе, при котором система не получает теплоты извне и не отдает ее. Процесс можно считать адиабатическим, если по каким-либо причинам оказывается несущественным теплообмен между системой и окружающей средой, т. е. можно пренебречь теплопроводностью, лучистым теплообменом, поглощением и испусканием быстрых частиц. Если масса системы, участвующей в адиабатическом процессе, сохраняется, то изменение ее внутренней энергии происходит только за счет работы внешних сил (первый закон термодинамики). Поэтому, например, адиабатическое сжатие (расширение) газа сопровождается повышением (понижением) его температуры. Понятие адиабатической изоляции является идеализацией теплоизолирующих оболочек или сосудов Дьюара (адиабатные оболочки). Однако если процесс происходит в системе без такой оболочки, но настолько быстро, что



Рис. 14.6. Пример адиабатического процесса

за время его осуществления теплообмен с окружающей средой произойти не успевает, то такой процесс тоже является адиабатическим (см. рис. 14.6). Тело, температура которого повышена, должно некоторое количество теплоты передать окружающей среде, но процесс теплопередачи требует некоторого времени, поэтому при быстром сжатии (или расширении) теплота не успевает распространиться из данного объема, то есть $\Delta Q = 0$, и процесс можно рассматривать как адиабатный. Из первого закона термодинамики следует, что при адиабатическом процессе изменение внутренней энергии системы равно работе, совершенной над системой внешними силами.

Так как передачи теплоты при адиабатическом процессе не происходит, то уравнение первого начала термодинамики принимает вид $\Delta A + \Delta U = 0$ или $\Delta A = -\Delta U$. То есть внешняя работа газа может производиться вследствие изменения его внутренней энергии. Адиабатное расширение газа ($\Delta V > 0$) сопровождается положительной внешней работой, но при этом внутренняя энергия уменьшается и газ охлаждается ($\Delta T < 0$). Таким образом, внешняя работа газа может производиться вследствие изменения его внутренней энергии. Сжатие газа ($\Delta V < 0$) сопровождается его нагреванием.

Соотношение между давлением p и объемом V при адиабатическом расширении или сжатии дается соотношением $PV^\gamma = \text{const}$. Это уравнение носит название уравнения Пуассона. Показатель адиабаты $\gamma = C_p/C_v$, то есть отношению теплоемкостей при постоянном давлении и объеме.

Показатель адиабаты для идеального газа может быть выражен через количество степеней свободы (i) молекул газа: $\gamma = (i + 2)/i$. Таким образом, для одноатом-

ного идеального газа (три степени свободы) $\gamma = 5/3 \approx 1.67$; для двухатомного идеального газа (пять степеней свободы) (при комнатной температуре) $\gamma = 7/5 = 1.4$. Для многоатомного идеального газа (шесть степеней свободы) показатель адиабаты равен $\gamma = (6 + 2)/6 \approx 1.33$.

С учетом уравнения Клапейрона–Менделеева уравнение Пуассона может быть представлено в виде $TV^{\gamma-1} = \text{const}$ или $T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}$.

P–V-диаграмма адиабатического процесса приведена на рис. 14.7.

Из рис. 14.7 видно, что кривая адиабаты идет круче, чем изотерма. Объясняется это тем, что при адиабатическом расширении идеального газа происходит не только уменьшение давления, но и понижение температуры, так как внутренняя энергия газа убывает. При адиабатическом сжатии газа растут давление и температура, не только из-за уменьшения объема, но и из-за увеличения внутренней энергии.



Рис. 14.7

Работа при адиабатическом процессе равна убыли внутренней энергии. Формула для работы идеального газа в адиабатическом процессе имеет вид

$$A = -i/2nC_v(T_2 - T_1) = i/2nC_v(T_1 - T_2).$$

Второе начало термодинамики. Многочисленные опыты показывают, что все тепловые процессы, в отличие от механического движения, необратимы. Если реализуется какой-либо термодинамический процесс, то обратный процесс, при котором проходились те же тепловые состояния, но только в обратном направлении, практически невозможен. Другими словами, *термодинамические процессы необратимы*.

Приведем два характерных примера необратимых процессов. Если привести в соприкосновение два тела с различной температурой, то более нагретое тело будет отдавать тепло менее нагретому. Обратный процесс — самопроизвольный переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому никогда не произойдет. Столь же необратимым является и другой процесс — расширение газа в пустоту. Газ, находящийся в части сосуда, отдаленной от другой части перегородкой, после ее удаления заполняет весь сосуд. Без постороннего вмешательства газ никогда не соберется самопроизвольно в той же части сосуда, где он находился первоначально.

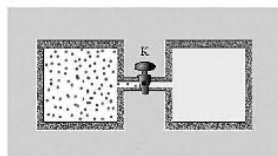


Рис. 14.8. Расширение газа в пустоту — пример необратимого процесса. Его нельзя провести в противоположном направлении

Всякая предоставленная самой себе система стремится перейти в состояние *термодинамического равновесия*, в котором тела обладают одинаковыми температурами и давлением. Достигнув этого состояния, система сама по себе из него не выходит. Значит, все термодинамические процессы, приближающиеся к тепловому равновесию, необратимы.

Необратимы и все механические процессы, сопровождающиеся трением. Трение вызывает замедление движения тел, при котором кинетическая энергия переходит в тепло. Замедление эквивалентно приближению к состоянию равновесия, при котором движение тел отсутствует.

В системе тел, находящихся в термодинамическом равновесии, без внешнего вмешательства невозможны никакие реальные процессы. Следовательно, с помощью тел, находящихся в термодинамическом равновесии, невозможно совершить никакой работы, так как работа связана с механическим движением, т. е. с переходом тепловой энергии в кинетическую. Утверждение о невозможности получения работы за счет энергии тел, находящихся в термодинамическом равновесии, лежит в основе *второго начала термодинамики*.

Используя процессы, запрещаемые вторым началом термодинамики, можно было бы создать двигатель, совершающий работу за счет тепла, получаемого от такого, например, практически неисчерпаемого источника энергии, как океан. Практически такой двигатель был бы равнозначен вечному двигателю. Поэтому второе начало иногда формулируется следующим образом: невозможен вечный двигатель второго рода, т. е. такой периодический действующий двигатель, который получал бы тепло от одного резервуара и превращал это тепло полностью в работу (см. далее).

Тепловые двигатели и второе начало термодинамики. Исторически формулировка второго начала термодинамики вырабатывалась в ходе изучения тепловых двигателей — устройств, преобразующих тепловую энергию в механическую работу.

Основная идея, лежащая в основе любого теплового двигателя, состоит в том, что механическая энергия может быть получена за счет тепловой только в том случае, если дать возможность теплоте переходить из области с высокой температурой в область с низкой температурой. Высокая T_1 и низкая T_2 температуры называются рабочими температурами (рис. 14.9). В дальнейшем для простоты положим, что эти температуры обеспечиваются двумя термостатами, находящимися при этих постоянных температурах. Далее будем рассматривать такие тепловые двигатели, которые совершают периодические рабочие циклы, т. е. вся система периодически возвращается в исходное состояние и так существует непрерывно.

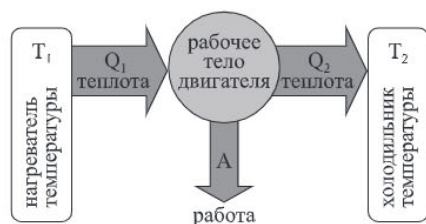


Рис. 14.9. Схема работы теплового двигателя

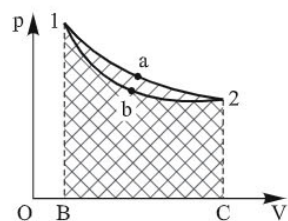


Рис. 14.10. Работа теплового двигателя за цикл

Рабочим телом у всех тепловых двигателей является газ, который совершает работу при расширении. Обозначим начальную температуру рабочего тела (газа) через T_1 . Эту температуру в паровых турбинах или машинах приобретает пар в паровом котле. В двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах повышение температуры происходит при сгорании топлива внутри самого двигателя. Температуру T_1 называют температурой нагревателя. Рабочее тело (пар или газ) получает некоторое количество теплоты Q_1 от нагревателя, у которого за счет сгорания топлива поддерживается постоянная высокая температура T_1 . Это количество теплоты идет на увеличение внутренней

энергии газа и совершение им работы A_1 . В результате газ, расширяясь, переходит из состояния 1 в состояние 2 (линия 1a2), совершая работу A_1 , равную площади фигуры B1a2C (рис. 14.10).

Чтобы процесс был циклическим, поршень необходимо вернуть в исходное положение. Если процесс сжатия провести в обратном порядке (линия 2a1), то работы газа и над газом будут одинаковы и суммарная работа будет равна нулю. Поэтому, чтобы работа сжатия A_2 была по абсолютному значению меньше работы расширения, нужно, чтобы каждому значению объема при сжатии соответствовало меньшее давление, чем при расширении (линия 2b1). А это возможно осуществить, только если газ перед сжатием охладить. Для этого рабочее тело приводят в контакт с телом меньшей температуры, $T_2 < T_1$ (холодильником). Рабочее тело при этом отдает холодильнику некоторое количество теплоты Q_2 , и при сжатии совершается работа A_2 , равная площади фигуры 1b2CB. Полезная работа за цикл $A = A_1 - A_2$ численно равна площади фигуры 1a2b1.

Таким образом, чтобы за цикл тепловая машина производила положительную работу, необходимо располагать двумя группами качественно разных источников тепла: одна группа источников тепла по пути расширения 1a2 имеет температуры более высокие, чем другая группа источников тепла, расположенных по пути 2b1 сжатия рабочего вещества и имеющих температуры более низкие.

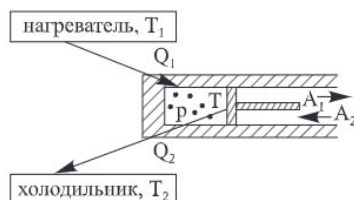


Рис. 14.11

В двигателе рабочее тело при расширении не может отдать всю свою внутреннюю энергию на совершение работы. Часть энергии неизбежно передается атмосфере (холодильнику) вместе с отработанным паром или выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин. Эта часть внутренней энергии безвозвратно теряется. Эффективность любого теплового двигателя определяется его коэффициентом полезного действия (КПД). Он имеет ясный физический смысл — отношение полезной работы, произведенной двигателем (полезный «выход»), к количеству подводимой теплоты (затраченная энергия). Так как полная энергия сохраняется, то подводимое количество тепла Q_H должно равняться произведенной двигателем работы и количеству тепла, отводимого при низкой температуре Q_1 . Обозначив КПД буквой η , запишем

$$\eta = (|Q_H| - |Q_1|) / |Q_H| = 1 - |Q_1| / |Q_H|.$$

Так как нас будут интересовать величины потоков теплоты, а не их направление (сообщенное или отнятое от системы), мы используем знак модуля в определении КПД.

Из приведенного соотношения следует, что η будет тем выше, чем меньше будет теплота $|Q_1|$. Опыт показывает, что уменьшение этой величины до нуля невозможно. В противном случае мы получили бы двигатель с КПД, равным 100 %. Отсюда второе начало термодинамики можно сформулировать так: невозможен периодический процесс, единственным результатом которого было бы преобразование отобранной

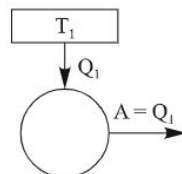


Рис. 14.12. Невозможно создать циклически действующую тепловую машину, энергетическая диаграмма которой представлена на рисунке

у источника теплоты Q при неизменной температуре полностью в работу A (то есть $A = Q$).

В некотором смысле наилучший цикл (с точки зрения КПД) — это так называемый цикл Карно.

КПД двигателя Карно. Двигатель Карно, лежащий в основе работы идеального теплового двигателя, был придуман французским инженером Сади Карно (1796–1832) за двадцать лет до того, как были сформулированы основы термодинамики, однако он иллюстрирует важное следствие из второго начала термодинамики.

Рабочую часть двигателя Карно можно представить себе в виде поршня в заполненном газом цилиндре. Поскольку двигатель Карно — машина чисто теоретическая, то есть идеальная, силы трения между поршнем и цилиндром и тепловые потери считаются равными нулю. Поршень может свободно перемещаться между двумя тепловыми резервуарами — с высокой температурой и с низкой температурой. В этой тепловой машине происходит следующий идеальный четырехфазный цикл.

1. Сначала цилиндр вступает в контакт с горячим резервуаром, и идеальный газ расширяется при постоянной температуре. На этой фазе газ получает от горячего резервуара некое количество тепла.

2. Затем цилиндр окружается идеальной теплоизоляцией, за счет чего количество тепла, имеющееся у газа, сохраняется, и газ продолжает расширяться, пока его температура не упадет до температуры холодного теплового резервуара.

3. На третьей фазе теплоизоляция снимается, и газ в цилиндре, будучи в контакте с холодным резервуаром, сжимается, отдавая при этом часть тепла холодному резервуару.

4. Когда сжатие достигает определенной точки, цилиндр снова окружается теплоизоляцией, и газ сжимается за счет поднятия поршня до тех пор, пока его температура не сравняется с температурой горячего резервуара. После этого теплоизоляция удаляется, и цикл повторяется вновь с первой фазы.

В машине осуществляется круговой процесс, или цикл, при котором система после ряда преобразований возвращается в исходное состояние. Все процессы в машине Карно рассматриваются как равновесные (обратимые).

Если в процессе участвует трение между поршнем и стенками цилиндра, то работа, совершенная в одном направлении, не будет равна (с противоположным знаком) работе, совершенной при движении в обратном направлении. И такой процесс никак нельзя было бы рассматривать как обратимый.

Можно видеть, что цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат (см. рис. 14.13). При изотермическом расширении газ совершает работу $A > 0$, равную количеству теплоты Q_1 . При адиабатном расширении положительная работа равна уменьшению внутренней энергии при охлаждении газа от температуры T_1 до температуры T_2 :

$$A = -dU = U(T_1) - U(T_2).$$

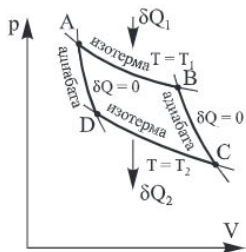


Рис. 14.13. Цикл Карно

Изотермическое сжатие при температуре T_2 требует совершения над газом работы A_2 . Газ совершает, соответственно, отрицательную работу $A_2 = Q_2$. Наконец, адиабатное сжатие требует совершения над газом работы. Работа самого газа равна $U(T_2) - U(T_1)$. Поэтому суммарная работа газа при двух адиабатных процессах равна нулю. За цикл газ совершает работу, численно равную площади фигуры, ограниченной кривой цикла.

Для вычисления коэффициента полезного действия нужно вычислить работы при изотермических процессах А–В и С–D. Расчеты приводят к следующему результату:

$$\eta = (T_1 - T_2)/T_1 = 1 - T_2/T_1.$$

Двигатель Карно имеет много общего с реальными двигателями: он работает по замкнутому циклу (который называется циклом Карно); он получает энергию извне благодаря высокотемпературному процессу (например, при сжигании топлива); часть энергии рассеивается в окружающую среду. При этом производится определенная работа (в случае двигателя Карно — за счет поступательного движения поршня). Великое прозрение Карно состоит в том, что он показал, что ни один тепловой двигатель, работающий при двух заданных температурах, не может быть эффективнее идеального двигателя Карно (это утверждение называют теоремой Карно). Карно доказал следующую теорему: *любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем температуры T_1 и холодильником температуры T_2 , не может иметь коэффициент полезного действия, превышающий КПД идеальной тепловой машины.*



Рис. 14.14. Сад Карно (1796–1832)

В противном случае мы столкнулись бы с нарушением второго начала термодинамики, поскольку такой двигатель отбирал бы тепло от менее нагретого резервуара и передавал бы его более нагретому. (На самом деле второе начало термодинамики является следствием теоремы Карно.) Таким образом, полученное Карно соотношение устанавливает предел эффективности реальных двигателей, работающих в реальном мире. К нему можно приблизиться, но достичь и тем более превзойти его инженеры не смогут. У реальных двигателей КПД достигает лишь 60–80 % КПД Карно.

А теперь перейдем к обещанной выше энтропии.

Энтропия и второе начало термодинамики. Р. Клаузиус, много сделавший для исследования тепловых явлений, в 1865 году вводит понятие энтропии. Энтропия (от греч. Entropia — поворот, превращение) — это функция состояния термодинамической системы, изменение которой в равновесном процессе равно отношению количества теплоты, сообщенного системе или отведенного от нее, к термодинамической температуре системы:

$$\Delta S = \Delta Q/T.$$

Здесь ΔS — изменение энтропии, ΔQ — изменение теплоты и T — абсолютная температура.

Например, чтобы рассчитать изменение энтропии при плавлении $\Delta S_{\text{пл}}$, надо теплоту плавления λ разделить на температуру плавления $T_{\text{пл}}$. Так, для плавления

1 моля (18 г) льда $\lambda = 6,02$ кДж/моль, а $T_{пл} = 273$ К; соответственно, $\Delta S_{пл} = 22$ Дж/моль · град. При этом энтропия воды больше энтропии льда.

Первый закон термодинамики гласит, что энергию невозможно создать или уничтожить. Следовательно, количество энергии во Вселенной всегда такое же, как было и при ее создании. Второй закон термодинамики утверждает, что коэффициент полезного действия ни одного реального (необратимого) процесса не может быть 100 % при преобразовании энергии в работу. Следовательно, количество энергии для преобразования в работу или теплоту непрерывно уменьшается со временем, так как теплота спонтанно переходит из более теплой области к более холодной. Другими словами, количество энергии во Вселенной остается постоянным, но ее способность использования для того, чтобы проделать полезную работу, уменьшается при каждой теплопередаче и выполнении работы. Энтропия используется для измерения уменьшения пригодности энергии в результате процесса.

Возможность предсказания направления процессов составляет основное содержание второго закона термодинамики. Именно для выяснения ограничений, приводящих к односторонности процессов, немецкий физик Р. Клаузиус и ввел функцию S . В формулировке Клаузиуса (1865) второй закон термодинамики звучит так: *«При самопроизвольных процессах в системах, имеющих постоянную энергию, энтропия всегда возрастает»*. Таким образом, система самопроизвольно переходит от условий А к условиям В, если $S_B > S_A$.

Изолированные (замкнутые) системы не обмениваются веществом и энергией с окружающим пространством. В таких системах изменение энтропии $\Delta S = 0$ (для обратимых процессов) и $\Delta S > 0$ (для необратимых). *Все реальные процессы необратимые, и поэтому энтропия в изолированной системе для самопроизвольных процессов может только возрастать, что указывает на односторонность всех процессов в природе. Этот вывод получил название закона возрастания энтропии.*

Примерами обратимых процессов являются цикл Карно для идеального газа, колебания идеального маятника (без потерь энергии за счет трения). В них при проведении процесса в прямом и обратном направлении система проходит одни и те же состояния и изменение энтропии равно нулю. *Примерами необратимых процессов могут быть расширение газа, диффузия, теплопередача.* Все эти процессы могут проходить самопроизвольно только в одном направлении, в результате энтропия возрастает.

Австрийский физик Л. Больцман ответил на вопрос о физическом смысле энтропии и причинах ее роста в изолированных системах. Согласно Больцману энтропия — мера беспорядка в системе. Полный порядок соответствует минимуму энтропии; любой беспорядок увеличивает ее. Таким образом, физический смысл возрастания энтропии следующий: будучи предоставленным самому себе, не испытывая внешних воздействий (изолированная система), коллектив частиц стремится перейти в состояние, в котором при данных условиях возможен больший беспорядок. Максимальная энтропия соответствует полному хаосу.

Пример. В расположении атомов в кристаллическом твердом теле, где атомы занимают определенные положения (узлы) в кристаллической решетке, порядка больше, чем в жидкости, где определенных, закрепленных за ним положе-

ний у атома нет. Поскольку энтропия — мера беспорядка, то в жидкости она больше, чем в кристалле; как уже говорилось, энтропия воды больше энтропии льда. Сравним теперь состояние частиц в водяном паре и в воде. Положения молекул не фиксированы и там и там. Но при комнатной температуре и атмосферном давлении 1 моль воды (18 г) занимает объем 18 см^3 (плотность воды составляет 1 г/см^3), а 1 моль водяного пара — 22,4 л, т. е. в 1000 раз больше. Где возможен больший беспорядок? Конечно, в паре. И действительно, энтропия пара больше, чем энтропия воды, причем ее изменение при испарении больше, чем при плавлении, почти в 5 раз.

Больцман впервые ввел понятие термодинамической «вероятности состояния системы», или числа способов, с помощью которых можно осуществить данное состояние. Согласно Больцману различные комбинации скоростей и координат молекул, которые могут возникать в системе в результате столкновений между молекулами, не изменяют состояния системы в механическом смысле (энергия системы остается постоянной), но в термодинамическом смысле состояние системы будет изменяться. Всякая система, состоящая из очень большого числа частиц, будет переходить от состояний менее вероятных к состояниям более вероятным, осуществляющимся большим числом способов. Так, число способов размещения n молекул в двух частях объема равно 2^n , а число способов размещения всех молекул в одной половине объема равно 1. Из этого следует, что вероятность нахождения всех молекул в одной половине объема $p = (1/2)^n$. При большом числе молекул (в одном моле газа $n = 6 \cdot 10^{23}$) вероятность упорядоченного состояния, когда все молекулы соберутся в одной половине, становится практически равной нулю. Таким образом, чем большим числом способов может быть реализовано определенное макроскопическое состояние системы (или, что одно и то же, чем больше термодинамическая вероятность W этого состояния), тем менее оно упорядоченное и наиболее вероятное. Энтропия термодинамического состояния системы определяется через термодинамическую вероятность как $S = k \cdot \ln W$, где k — постоянная Больцмана. Это выражение энтропии через термодинамическую вероятность получило название «принцип Больцмана».



Рис. 14.15. Людвиг Больцман

Внимание туриста, посетившего городское кладбище в Вене, невольно привлечет могила, украшенная бюстом из белого мрамора работы скульптора Амброзио с выгравированной на камне непонятной для не физика математической формулой. Здесь покойся прах основателя статистической физики Людвига Больцмана, а лаконичная формула суммирует величайшее открытие знаменитого австрийского физика — открытие основного закона природы, определяющего направление всех физических процессов.

В природе существует много процессов, которые могли бы происходить, но не происходят, хотя и не противоречат закону сохранения энергии (первому началу термодинамики). Например, когда горячее тело приводится в контакт с холодным, теплота всегда переходит от горячего тела к холодному, а не наоборот. Но если бы теплота все-таки переходила от холодного тела к горячему, то энергия и в этом случае сохранялась бы. Аналогичные рассуждения можно провести, анализируя падение камня на землю. При падении камня его потенциальная

энергия переходит в кинетическую, а при ударе с землей последняя превращается в тепло. Однако никто не наблюдал обратного явления — покоящийся камень не взлетает вдруг вверх за счет преобразования тепловой энергии его молекул в кинетическую энергию. Механическая кинетическая энергия камня преобразовалась в тепло (внутреннюю энергию) и стала недоступной для ее полезного использования.

Таким образом, в любом естественном (необратимом) процессе некоторое количество энергии становится недоступным для получения с его помощью полезной работы. С течением времени энергия в конечном итоге переходит из более упорядоченных форм (например, механической) в менее упорядоченные (например, в тепловую). Энтропия, по существу, представляет собой меру этого беспорядка, и, следовательно, при необратимых процессах она всегда растет. При перемешивании горячей воды и холодной ее температура усредняется. Вся энергия распределяется равномерно между молекулами воды. При этом энтропия увеличивается, и мы получаем энергию, более равномерно распределенную и в форме, менее удобной для использования. Второе начало термодинамики устанавливает общее возрастание энтропии. Во всех наших действиях мы расплачиваемся увеличением энтропии. Вот такой пример. В тепловой электростанции сжигается топливо и производится теплота, которая превращается затем в электрическую энергию, в высшей степени упорядоченную. На самом деле только третья или четвертая часть энергии горения превращается в электричество, в то время как остальная энергия по обыкновению идет на разогрев воды какой-нибудь реки. Итак, за возможность превращать тепло в электричество мы заплатили увеличением энтропии реки. Тот же эффект в автомобильном двигателе внутреннего сгорания. Лишь часть энергии бензина превращается в энергию движения, но гораздо больше ее рассеивается в окружающую среду через радиатор. Итак, общий беспорядок всегда усиливается. В этом смысле энтропию можно назвать, по выражению известного советского физика А. С. Китайгородского (1914–1985), «директором-распорядителем природных богатств».

Энтропия и направление времени. Когда говорят «Время течет от прошлого к будущему, прошлое никогда не повторяется», то *что*, собственно, имеют при этом в виду? Мы знаем, что наука, исследуя объективные закономерности природы, изучает также не время, а движение, изменение вещей, то есть поведение материальных процессов *во времени*. Поэтому, когда говорят, что «прошлое никогда не повторяется», подразумевают, что не повторяются события, ситуации, которые были в прошлом, т. е. речь идет о некоторых материальных процессах, а вовсе не о времени. Тогда энтропия однозначно указывает направление этих процессов.

Возрастание энтропии изолированной системы должно выражать старение системы, хаотическое состояние, ибо это состояние имеет наибольшую вероятность. Следующим шагом в рассуждениях Больцмана было введение направления течения времени: *время течет в направлении роста энтропии*. А так как энтропия — мера беспорядка, то все движется в сторону менее упорядоченного.

Переходы в состояние молекулярного хаоса создают время. Полное разрушение упорядоченных структур ассоциируется со смертью.



Рис. 14.16. Сырое яйцо своим примером демонстрирует асимметрию времени: оно легко разбивается, но, однажды разбитое, уже не может снова стать целым — по той простой причине, что способов разбиться гораздо больше, чем собраться в целую конфигурацию. На языке физиков: разбитое яйцо обладает большей энтропией (modcos.com/articles.php?id= 81&idcom=101)

Термодинамика Больцмана была равновесной термодинамикой. В его представлении, если в какой-то области сплошной среды наблюдается флуктуация, то такие процессы приводят с неизбежностью к ее рассасыванию и возвращению к термодинамическому равновесию. Иначе говоря, любой порядок уничтожается. Поэтому направление времени, введенное Больцманом, — это направление к смерти Вселенной. Отсюда и возникла в конце прошлого века гипотеза о тепловой смерти Вселенной.

А что можно сказать о человеке? Все живые объекты после своей смерти стремятся исчезнуть. Упроститься, сломаться, смешаться между собой и раствориться в окружении. Все, кроме живых существ. Жизнь становится поперек хаосу, мы идем против течения, так как тоже подвержены силам энтропии: не будь их — мы были бы обречены на вечную жизнь. Человек — система открытая. Мы постоянно «боремся» с ростом энтропии. И в конечном счете умираем и гарантированно сольемся с окружающим нас миром. В борьбе с силами энтропии мы используем все силы нашего организма, его способность аккумулировать энергию, которую он черпает, поглощая вещество и излучение из окружающей среды.

Третье начало термодинамики. Недостижимость абсолютного нуля температуры. Третье начало термодинамики было сформулировано в 1906 году немецким физиком и химиком Вальтером Нернстом (1864–1941) эмпирическим путем на основе обобщения экспериментальных данных и получило название «теорема Нернста»: *при стремлении температуры любой равновесной термодинамической системы к абсолютному нулю ее энтропия стремится к некоторой универсальной постоянной величине, значение которой не зависит от каких-либо термодинамических параметров системы и может быть принято равной нулю.*

Молекулярно-кинетическая теория выявила статистическую связь между движениями атомов и молекул и температурой, и природу температуры стало возможно представить наглядно: чем быстрее движутся молекулы, тем выше температура, и наоборот. При такой картине нетрудно догадаться, что имеется нижний предел температуры, по достижении которого атомы и молекулы перестают двигаться окончательно. Значение абсолютного нуля оказалось равным -273°C . Третье начало термодинамики просто констатирует, что абсолютный ноль недостижим — и в этом он похож на скорость света: материальное тело

может сколь угодно близко подойти к нему, но достичь — никогда. Дело в том, что чем ближе система подходит к абсолютному нулю температуры, тем больше работы нужно затратить на ее дальнейшее охлаждение.

Математическая формулировка теоремы Нернста, приведенная выше, принадлежит Планку. Макс Планк в 1911 году сформулировал третье начало термодинамики — как условие обращения в нуль энтропии всех тел при стремлении температуры к абсолютному нулю:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0.$$

Отсюда энтропия при абсолютном нуле $S_0 = 0$. Это дает возможность определять абсолютные значения энтропии.

Формулировка Планка соответствует определению энтропии в статистической физике через термодинамическую вероятность (W) состояния системы $S = k \ln W$. При абсолютном нуле температуры система находится в основном квантово-механическом состоянии, для которого $W = 1$ (состояние реализуется единственным распределением). Следовательно, энтропия S при $T = 0$ равна нулю.

Из третьего начала термодинамики следует, что абсолютного нуля температуры нельзя достигнуть ни в каком конечном процессе, связанном с изменением энтропии, к нему можно лишь асимптотически приближаться. Из третьего начала термодинамики также вытекает ряд термодинамических следствий: при абсолютном нуле температуры обращаются в нуль теплоемкости при постоянном объеме и при постоянном давлении, коэффициенты теплового расширения и некоторые другие величины.

В лабораторных условиях ученым удавалось получать температуры, предельно близкие к нулевой. Сегодня температуры, отстоящие от абсолютного нуля на миллиардные доли градуса, можно получить практически в любой криогенной лаборатории. Однако, как бы далеко ни пошло развитие нашей техники, третье начало термодинамики говорит нам, что мы не только не перейдем барьера абсолютного нуля, но даже не достигнем его.

А мы в нашем путешествии еще не дошли и до середины пути. Нередко бывает так, что в ходе длительного путешествия мы попадаем в ландшафты, которые прошли ранее. Вот и теперь, после изучения молекулярного строения вещества, теплоты, термодинамики, мы вновь оказываемся в механике. Речь пойдет о важном ее разделе — о колебаниях. В природе и технике кроме поступательного и вращательного движений часто встречается еще один вид механического движения — колебания. Мы живем в мире колебаний. Колебания совершают ветви дерева на ветру и маятник в часах, поршень в цилиндре двигателя внутреннего сгорания и земная кора во время землетрясений, струна гитары и поверхностный слой воды на море, электрические колебания происходят в телевизорах, атомы колеблются в молекулах. И наши сердца бьются; наши легкие колеблются при дыхании; мы дрожим, когда нам холодно; мы можем слышать и разговаривать благодаря колебаниям барабанных перепонки и голосовых связок. Словом, колебания в нас и вокруг нас.

В мире колебаний и волн

Физики разрабатывают одну из важнейших областей физики — теорию колебаний. Оказалось, что колебательные явления различной физической природы подчиняются общим закономерностям. Такие разные волны объединяются в общей теории.

15. *В мире колебаний. Простые колебательные системы. Уравнение колебаний гармонического осциллятора. Маятник Фуко. Энергия гармонического осциллятора. Математический маятник. Сложение гармонических колебаний. Затухающие колебания. Резонанс в колебательных системах.*

Общий признак колебательного движения в приведенных выше примерах — точное или приблизительное повторение движения через одинаковые промежутки времени. Видов колебаний много. Колебания бывают механические, электромагнитные, химические, термодинамические и различные другие. Несмотря на такое разнообразие, все они имеют между собой много общего и поэтому описываются одними и теми же уравнениями.

Первыми учеными, изучавшими колебания, были Галилео Галилей и Х. Гюйгенс. Об этом рассказано в части 5. Галилей установил изохронизм (независимость периода колебаний от амплитуды) малых колебаний, наблюдая за раскачиванием люстры в соборе и отмеряя время по ударам пульса на руке. Гюйгенс изобрел первые часы с маятником (1657) и исследовал ряд проблем, связанных с движением маятника, в частности, нашел центр качания физического маятника (тело, совершающее колебания в поле каких-либо сил относительно точки, не являющейся центром масс этого тела). Исследования этих ученых сыграли важнейшую роль в возникновении классической механики.

Механика Ньютона послужила основой для решения многих частных задач теории колебаний. Впоследствии д'Аламбером, Эйлером, Д. Бернулли и Лагранжем были сформулированы многие понятия теории колебаний: период и частоты колебаний, формы колебаний, вошел в обиход термин «малые колебания» и т. п. Таким образом, в течение XVIII века в теории колебаний были выработаны основные физические схемы и разъяснены принципы, существенные для математического анализа проблем.

Простые колебательные системы. Примерами простых колебательных систем могут служить груз на пружине или подвешенный на нерастяжимой нити маленький шарик (математический маятник, рассмотрен ниже), показанные на рис. 15.1.

Обратимся к важному примеру — колебания груза, связанного с пружиной.

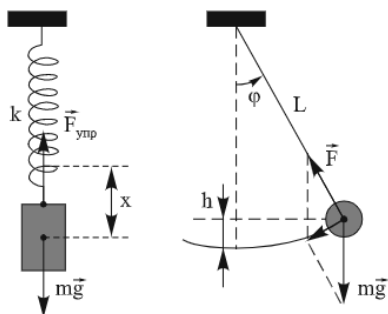


Рис. 15.1. Простые колебательные системы: груз на пружине и математический маятник

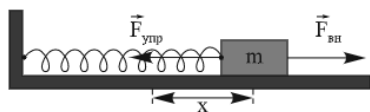


Рис. 15.2

Уравнение колебательного движения. Рассмотрим груз на пружине, как показано на рис. 15.2. Будем считать, что массой пружины можно пренебречь. На правом конце пружины закреплен груз массы m , движущийся без трения по горизонтальной плоскости. В положении равновесия пружина не действует на груз, но если сдвинуть груз вправо, действуя некоторой внешней силой $F_{\text{вн}}$, то пружина растянется на некоторую длину x . При этом возникнет возвращающая сила, связанная с упругостью пружины, — $F_{\text{упр}}$, прямо пропорциональная растяжению и направленная в сторону, противоположную смещению: $F_{\text{упр}} = -kx$. Эта формула справедлива, пока витки пружины не растягиваются сверх предела упругости или сжимаются настолько, что приходят в соприкосновение (если внешняя сила сжимает пружину).

Постоянная k называется жесткостью пружины. Чем больше этот коэффициент, тем большая сила требуется для растяжения или сжатия пружины на одну и ту же длину.

Колебания груза, подвешенного на пружине вертикально (рис. 15.2), практически ничем не отличаются от колебаний в горизонтальной плоскости, но только в случае, когда движение маятника происходит вдоль вертикальной оси. Для того чтобы маятник совершал только вертикальные колебания, достаточно оттянуть тело строго вниз на небольшую величину (те же ограничения, что и для горизонтального случая). Вообще, для пружинного маятника условия малости колебаний удовлетворяются при смещениях, создающих возвращающую силу у пружины в пределах применимости закона Гука.

Колебания возникают под действием внешней силы. Колебания, которые продолжают после того, как внешняя сила перестала действовать, называют свободными, а колебания, обусловленные действием внешней силы, называют вынужденными. При этом сама сила называется вынуждающей.

Запишем уравнение движения для случая простейшего пружинного маятника, расположенного горизонтально (рис. 15.2). Наша цель — определить, как изменяется смещение x со временем. Воспользуемся для этого вторым законом Ньютона. Учитывая, что ускорение $a = d^2x/dt^2$, можем написать следующее уравнение:

$$md^2x/dt^2 = -kx,$$

где m — масса колеблющегося тела.

Перепишем это уравнение в виде

$$d^2x/dt^2 + k/mx = 0.$$

Написанное уравнение называется дифференциальным уравнением движения гармонического осциллятора. Гармонический осциллятор является важным

примером периодического движения и служит точной или приближенной моделью во многих задачах классической и квантовой физики.

Легко видеть (проверяется подстановкой решения в исходное уравнение), что решением этого уравнения являются тригонометрические функции. Так, если начало отсчета соответствует $x = 0$, тогда решение записывается в виде

$$x(t) = A \sin(\omega t).$$

Здесь $\omega = \sqrt{k/m}$ — круговая (или циклическая) частота колебаний, связанная с частотой f соотношением $2\pi f = \omega$. Полученное решение описывает периодическое движение. Период этого движения T — это время, за которое совершается одно полное колебание (см. рис. 15.3). Так как частота f определяется как число полных колебаний в 1 с (измеряется, как правило, в герцах: 1 герц = одно полное колебание в секунду), тогда $f = 1/T$, $T = 1/f$, где T — период колебаний.

A — амплитуда колебаний — наибольшее смещение колеблющегося тела от положения равновесия. Для пояснения понятия амплитуды проделаем опыт. Сначала подвесим на нити воронку с песком, а под ней расположим доску. Затем, толкнув воронку, заставим ее качаться влево-вправо. Если мы будем двигать доску равномерно, то на ней образуется волнистая песчаная линия — синусоида. Колебания, при которых физическая величина изменяется с течением времени по синусоидальному или косинусоидальному закону, называются гармоническими.

Для того чтобы свободные колебания совершались по гармоническому закону, необходимо, чтобы сила, стремящаяся вернуть тело в положение равновесия, была пропорциональна смещению тела из положения равновесия и направлена в сторону, противоположную смещению.

На рис. 15.5 приведены графики координаты, скорости и ускорения тела, совершающего гармонические колебания.

Заставить пружину двигаться можно, например, улучив момент, когда уравновешенная пружинка покоится ($x = 0$), и резко ударить по грузику (см. рис. 15.6); это будет означать, что в момент $t = 0$ пружинке сообщена какая-то скорость. В начальный момент эта скорость равна 0. При этом в пружине возникнут свободные колебания.

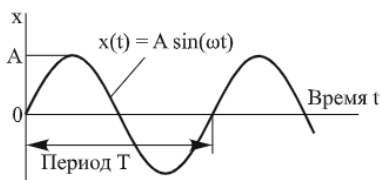


Рис. 15.3. Синусоидальные гармонические колебания

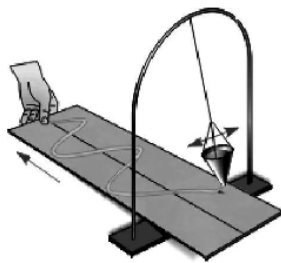


Рис. 15.4. Синусоидальный характер гармонических колебаний

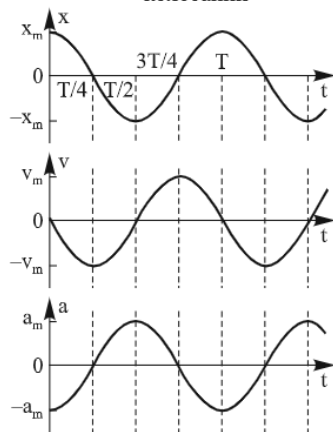


Рис. 15.5. Смещение x , скорость и ускорение гармонического осциллятора (x_m , v_m , a_m — максимальные значения соответствующих величин)



Рис. 15.6

Записанное решение уравнения гармонического осциллятора можно представить в общем виде: $x(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)$, где a и b — произвольные постоянные. Подставляя предполагаемое решение в уравнение колебаний, получим, что оно удовлетворяет уравнению движения при любом t , только когда $k/m - \omega^2 = 0$. Отсюда можно получить выражение для ω , приведенное выше.

Общее решение содержит две произвольные постоянные, как и должно быть в случае, когда в уравнение входит вторая производная. Для того чтобы определить эти произвольные константы, необходимо использовать начальные условия.

Например, если груз в начальный момент $t = 0$ находился в точке $x = 0$ и по нему ударили, сообщив ему начальную скорость в положительном направлении x (как на рисунке выше), мы должны положить $a = 0$, а b равным A . При этом получим $x(t) = A \sin(\omega t)$. В реальности могут встречаться различные случаи.

Рассматриваемое общее решение можно записать также следующим образом: $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$.

В справедливости такой записи можно убедиться, если раскрыть косинус суммы углов по известной формуле: $\cos(\omega t + \varphi) = \cos \omega t \cos \varphi - \sin \omega t \sin \varphi$. Отсюда можно получить, что $a = A \cos \varphi$, $b = -A \sin \varphi$.

Величина φ называется начальной фазой, которая показывает отставание или опережение, с которым достигается максимальное смещение A по отношению к начальному моменту $t = 0$. Величина фазы не влияет на форму кривой $x(t)$, а лишь на ее положение в некоторый произвольный момент времени.

Так как гармонические колебания описываются функциями синуса и косинуса, имеющими период 2π , а положение тела во времени повторяется с периодом T , то имеем $\omega T = 2\pi$. Отсюда получаем связь между двумя видами частот, приведенное выше: $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$.

Следует отметить, что частота и период колебаний не зависят от амплитуды.

Маятник нашел большое число применений в физике и технике.

Маятник Фуко. Нельзя не рассказать о знаменитом маятнике Фуко, о котором слышаны многие. В середине XIX века французский физик Жан Фуко (1819–1868) изобрел устройство, наглядно демонстрирующее вращение Земли. Первые опыты с маятником Фуко провел в погребе своего дома в Париже. К вершине свода погреба он прикрепил двухметровую проволоку из закаленной стали и подвесил на ней пятикилограммовый латунный шар. Отведя шар в сторону, зафиксировав



Рис. 15.7. Посмотреть на маятник Фуко приходили целые толпы парижан

его с помощью нити возле одной из стен, Фуко пережиг нить, предоставив маятнику возможность свободно качаться. И уже через полчаса он стал свидетелем вращения Земли. Это произошло 8 января 1851 года. А спустя несколько дней Фуко повторил свой опыт в Парижской обсерватории по просьбе ее директора, знаменитого французского ученого Араго (1786–1853). На этот раз длина проволоки составляла уже 11 м. И отклонение плоскости качания маятника

было еще заметней. Об опыте Фуко заговорили повсюду. Всем хотелось своими глазами увидеть вращение Земли.

Демонстрации опыта Фуко стали устраивать в самых разных странах. Сообщения об этом приходили из Ливерпуля и Оксфорда, Бристоль и Дублина, Жене-вы и Ренна. Даже в Рио-де-Жанейро и в Коломбо на Цейлоне этому замечательному опыту аплодировали тысячи восторженных зрителей. Появились и комнатные модели маятников Фуко. Дело дошло до того, что президент Франции, принц Луи-Наполеон, решил поставить этот опыт в поистине гигантских масштабах, чтобы демонстрировать его публично.

Во время эксперимента Фуко взял груз весом 28 кг и подвесил его к вершине купола парижского Пантеона на проволоке длиной 67 м. На конце груза ученый закрепил металлическое острие. Маятник совершал колебания над круглым ограждением, по краю которого был насыпан песок. При каждом качании маятника острый стержень, закрепленный снизу груза, сбрасывал песок приблизительно в трех миллиметрах от предыдущего места. Примерно через два с половиной часа стало видно, что плоскость качания маятника, которая медленно поворачивается относительно земной поверхности в сторону, противоположную направлению вращения Земли (неподвижна лишь на полюсах), поворачивается по часовой стрелке относительно пола. За час плоскость колебаний повернулась более чем на 11° , а примерно за 32 часа совершила полный оборот и вернулась в прежнее положение. Фуко таким образом доказал, что если бы поверхность Земли не вращалась, маятник Фуко не показывал бы изменения плоскости колебаний. На плоскость вращения маятника влияет как географическая широта места, где он установлен, так и длина подвеса (длинные маятники вращаются быстрее).

Маятник, установленный на Северном или Южном полюсе, будет делать оборот за 24 часа. Маятник, установленный на экваторе, вообще не будет вращаться, плоскость останется неподвижной.

Энергия гармонического осциллятора. Изучая осциллятор, мы воспользуемся, пожалуй, одним из наиболее замечательных применений математических формул в физике.

Обратимся снова к гармоническому осциллятору — грузу на конце пружины, массой которой пренебрегаем. Интегрируя выражение для возвращающей силы, заданной в виде $F = -kx$, получим следующее выражение для потенциальной энергии:

$$U = 1/2kx^2.$$

Полная механическая энергия E равна сумме потенциальной и кинетической энергий:

$$E = 1/2mv^2 + 1/2kx^2.$$

В этом соотношении v — скорость, которую имеет масса m на расстоянии x от положения равновесия. Потенциальная энергия рассчитана при условии, что при интегрировании постоянная интегрирования взята равной нулю. Так как в случае гармонических колебаний трение отсутствует, полная механическая энергия E сохраняется. В крайних точках, где $x = \pm A$, скорость равна нулю, а полная энергия E равна $E = 1/2m(0)^2 + 1/2kA^2 = 1/2kA^2$. Таким образом, полная

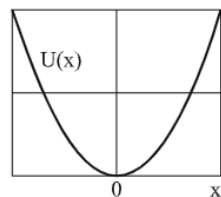


Рис. 15.8. Зависимость потенциальной энергии U от координаты x

механическая энергия гармонического осциллятора пропорциональна квадрату амплитуды колебаний.

В положении равновесия, где $x = 0$, вся энергия переходит в кинетическую, равную $E = 1/2 m v_{\text{макс}}^2$. В промежуточных точках и потенциальная, и кинетическая энергия нулю не равны, а полная энергия сохраняется:

$$E = 1/2 m v^2 + 1/2 k x^2 = 1/2 k A^2.$$

Полная энергия гармонического осциллятора сохраняется в отсутствие сил сопротивления и пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. Таким образом, процесс колебаний связан с периодическим переходом энергии из потенциальной в кинетическую и обратно. Средние (за период колебаний) значения потенциальной и кинетической энергии одинаковы, и каждое из них равно $E/2$.

Из этого равенства можно получить связь между скоростью и смещением:

$$v = \pm \sqrt{k/m(A^2 - x^2)}.$$

Так как $v_{\text{макс}} = A\sqrt{k/m}$,

$$v = \pm v_{\text{макс}} \sqrt{1 - x^2/A^2}.$$

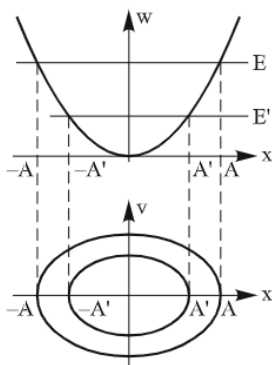


Рис. 15.9. График потенциальной энергии и фазовый портрет

На рис. 15.9 представлен графики потенциальной и полной энергии гармонического осциллятора. Материальная точка может находиться в области, в которой потенциальная энергия не превышает полную, поскольку разность полной и потенциальной энергии — это кинетическая энергия, которая не может быть отрицательной. Точки, в которых потенциальная энергия равна полной, — это точки остановки. На том же рисунке представлена связь между скоростью и координатой гармонического осциллятора при разных значениях полной энергии. Поскольку $E = 1/2 m v^2 + 1/2 k x^2$, то каждая из таких кривых является эллипсом. Совокупность этих кривых называется фазовым портретом системы.

Пример. Пружинный маятник массой $m = 2$ г совершает гармонические колебания по закону синуса на пружине жесткостью $k = 8$ мН/м. Начальная фаза колебаний равна нулю, амплитуда колебаний $A = 5$ см. Определить ускорение маятника a , возвращающую силу F , действующую на него, и величину его потенциальной энергии U в момент времени, когда скорость маятника равна 8 см/с.

Решение. По условию задачи, пружинный маятник совершает гармонические колебания по закону синуса и начальная фаза колебаний равна нулю, уравнение имеет вид $x = A \sin \omega t$. $V = dx/dt = A \cos \omega t$. Тогда найдем скорость точки: $v = 8$ см/с. Отсюда найдем момент времени, когда скорость точки равна $\cos \omega t = v/A\omega$.

Собственная циклическая частота пружинного маятника равна $\omega = \sqrt{k/m}$. Тогда $\cos \sqrt{(8 \cdot 10^{-3}/2 \cdot 10^{-3})}t = 0,8$. Таким образом, $\cos 2t = 0,8$. Отсюда $t = 0,322$ с. Ускорение точки $a = dv/dt = -A\omega^2 \sin \omega t$. В момент $t = 0,322$ с ускорение равно — $11,7$ см/с². По закону Гука сила упругости $F = -kx = -kA \sin \omega t$ (знак минус гово-

рит о том, что это возвращающая сила). В момент времени $t = 0,322$ с возвращающая сила равна $-0,23 \cdot 10^{-3}$ Н. Уравнение потенциальной энергии колеблющейся точки имеет вид $U = (\omega^2 m/2) A^2 \sin^2 \omega t = 0,01 \cdot 10^{-3}$ Дж.

Маятник. Маятник — система (груз), подвешенная в поле тяжести и совершающая механические колебания. Маятник совершает периодические движения. Однако не все периодические движения являются колебательными, что иллюстрирует рис. 15.10.

На рис. 15.10, а шарик, подвешенный на нити, совершает колебания, а на рис. 15.10, б тот же шарик совершает обращение. Колебание и обращение — это виды повторяющихся, или, иначе говоря, периодических, движений. Отличительной особенностью колебания является прохождение колеблющимся телом своего положения равновесия. Движение качающегося шарика мы называем колебанием, так как шарик проходит через положение равновесия. Но движение того же шарика, обращающегося вокруг вертикали, уже не назовем колебанием, поскольку шарик не проходит через положение равновесия. Поэтому ситуацию, показанную для случая 15.10, б (конический маятник), мы рассмотрели в разделе «вращательное движение» (с. 59).

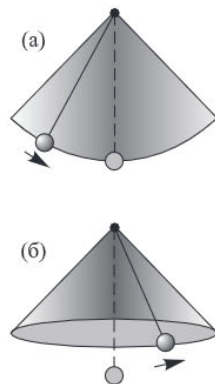


Рис. 15.10

Математический маятник. Математический маятник представляет собой точечную массу на невесомой нерастяжимой нити, что нельзя реализовать в действительности. Однако если масса нити пренебрежимо мала по сравнению с массой m тела и длина нити велика по сравнению с размерами тела, то с достаточной точностью данная конфигурация будет примером математического маятника. Движение такого маятника весьма похоже на простое гармоническое колебание: груз качается по дуге окружности с одинаковой амплитудой по обе стороны от положения равновесия (принятого за положение, когда нить вертикальна). Но будут ли колебания такого маятника в действительности гармоническими? Математический маятник имеет одну степень свободы — еще один пример одномерного гармонического осциллятора. На математический маятник действуют две силы: сила тяжести G и сила натяжения нити F_n (рис. 15.11). Результирующая этих сил и является той силой, под действием которой маятник совершает свободные гармонические колебания.

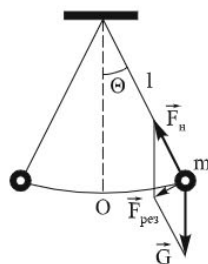


Рис. 15.11. Математический маятник

Далее увидим, что гармонические колебания такой системы возможны лишь при небольших отклонениях груза от вертикали.

В роли возвращающей силы выступает составляющая силы тяжести груза, касательная к дуге: $F = -mg \sin \theta$. В случае простого гармонического колебания возвращающая сила пропорциональна отклонению, а не синусу угла, как в нашем случае. Однако при малых углах отклонения можно приближенно положить $\sin \theta \approx \theta$ (в радианах), что справедливо для углов $\theta < 15^\circ$. Тогда в этом приближении $F \approx -mg\theta$. При этом приближенно θ равен отношению l/x , где x — длина дуги, по которой движется груз при отклонении на угол θ . Тогда $F \approx -(mg/x)x$. Таким

образом, при малых отклонения от вертикали движение математического маятника представляет собой гармонические колебания, описываемые формулой, полученной выше для колебания груза на пружине, только необходимо положить $k = mg/l$.

При этом период колебаний математического маятника будет определяться формулой

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}.$$

Заметим, что период колебаний не зависит от массы маятника. Этот период не зависит также и от амплитуды, на что обратил внимание еще Галилей (см. с. 39).

Уравнение колебаний математического маятника, в отсутствие предположения о малости углов отклонения, имеет вид

$$d^2\theta/dt^2 + (mg/I) \sin \theta = 0,$$

где I — момент инерции. Для материальной точки он равен $I = ml^2$.

Решение уравнения представляется в виде бесконечного ряда по степеням синуса от максимального угла отклонения θ_m (которому соответствует максимальная амплитуда):

$$T = 2\pi\sqrt{l/g} \left(1 + (1/2)^2 \sin^2 \theta_m / 2 + (1/2)^2 (3/4)^2 \sin^4 \theta_m / 2 + \dots \right).$$

Для малых углов можно ограничиться малым числом членов (все определяется требуемой точностью).

Так, $\sin 15^\circ = 0,259$ с точностью до трех знаков после запятой, а этот же угол в радианах равен 0,261; $\sin 30^\circ = 0,500$, а в радианах 0,522 (Джанколи. Физика. Т. 1).

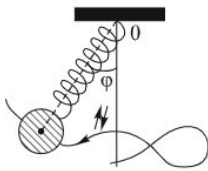


Рис. 15.12. Колебание частицы в двух направлениях
(www.teoretmech.ru)

Сложение гармонических колебаний. На рис. 15.12 тяжелый шарик, подвешенный на легкой длинной пружине, совершает маятникообразные колебания в одной плоскости. Если растянуть и отпустить пружину, то шарик будет двигаться по некоторой сложной траектории, участвуя в двух колебаниях.

Рассмотрим результат сложения взаимно перпендикулярных гармонических колебаний одной и той же частоты ω , совершающихся вдоль координатных осей x и y . Уравнения этих колебаний запишутся следующим образом:

$$x = A_1 \cos \omega t, \quad y = A_2 \cos(\omega t + \phi),$$

где ϕ — разность фаз колебаний.

Чтобы получить уравнение траектории точки, необходимо исключить из этих уравнений время t . После ряда преобразований получим

$$y/A_2 = \cos \omega t \cos \phi - \sin \omega t \sin \phi.$$

Подставив значения $\cos \omega t = x/A_1$ и $\sin \omega t = \sqrt{1 - x^2/A_1^2}$ в уравнение для y , получим

$$(x/A_1 \cos \phi - y/A_2)^2 = (1 - x^2/A_1^2) \sin^2 \phi.$$

Это уравнение можно преобразовать к следующему виду:

$$x^2/A_1^2 - 2xy/A_1A_2 \cos \phi + y^2/A_2^2 = \sin^2 \phi.$$

Полученное уравнение, как известно из аналитической геометрии, является уравнением эллипса, ориентация и значение полуосей которого относительно

осей x и y зависит от амплитуд A и B и разности фаз φ . Когда частоты у двух колебаний разные, движение может быть очень сложным и не является периодическим. Ниже рассмотрены некоторые простые случаи.

Частные случаи.

1. $\varphi = 0$. В этом случае уравнение примет вид

$$(x/A_1 - y/A_2)^2 = 0 \text{ или } y = (A_2/A_1)x.$$

Это уравнение прямой с тангенсом угла наклона к оси x , равным $\operatorname{tg} \varphi = A_2/A_1$. Таким образом, в этом случае точка движется по прямой (рис. 15.13).

2. При $\varphi = \pm\pi/2$ уравнение траектории примет вид

$$x^2/A_1^2 + y^2/A_2^2 = 1.$$

Это уравнение эллипса, полуоси которого равны соответствующим амплитудам колебаний. Если $A_1 = A_2$, эллипс вырождается в окружность; при $\varphi = +\pi/2$ движение происходит по часовой стрелке при $\varphi = -\pi/2$ точка движется по эллипсу против часовой стрелки (рис. 15.13).

3. Фигуры Лиссажу. Если частоты двух взаимно перпендикулярных колебаний неодинаковы, то траектория результирующего движения имеет вид сложных кривых, называемых фигурами Лиссажу (рис. 15.14). Названы по имени Жюль Антуана Лиссажу (1822–1880), французского математика. Метод фигур Лиссажу — широко распространенный способ сравнения (измерения) частот двух складываемых колебаний, так как отношение частот обратно пропорционально количеству точек касания кривой с соответствующей осью. Фигуры Лиссажу удобно наблюдать на экране осциллографа, подавая на горизонтальный и вертикальный входы сигналы. Меняя амплитуды, частоты и фазы, можно получить множество красивых фигур.

Затухающие гармонические колебания. В рассмотренных выше случаях эти устройства — маятники — будучи выведены из состояния равновесия, колебались бы неограниченное время. Реальные механические колебания не происходят без потерь энергии. При любом механическом движении тел в результате их взаимодействия с окружаю-

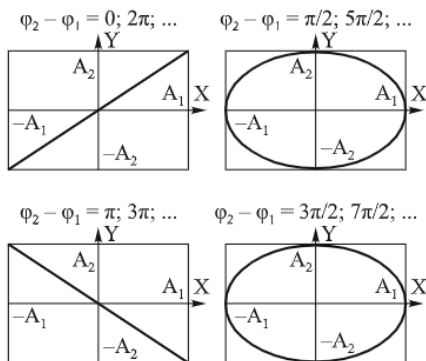


Рис. 15.13

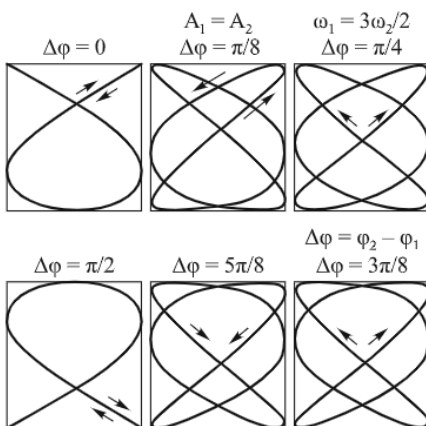


Рис. 15.14



Рис. 15.15. Жюль Антуан Лиссажу

щими телами, наличия трения в самой системе часть механической энергии теряется. Амплитуда колебаний постепенно уменьшается, и через некоторое время после начала колебаний маятник останавливается. Свободные механические колебания всегда оказываются затухающими колебаниями, т. е. колебаниями с убывающей амплитудой.

Обычно затухание колебаний связано с сопротивлением воздуха и трением внутри колебательной системы. Это можно продемонстрировать, немного изменив условия опыта, который мы описали выше (см. рис. 15.4). Введем в наш эксперимент силу сопротивления, связанную с трением о воздух. Для этого приклеим к воронке листок бумаги. Теперь при качаниях воронки воздух будет оказывать помеху ее движению и колебания воронки станут затухающими. В этом случае песочная линия выглядит так, как показано на графике внизу. Видно, что амплитуда затухающих колебаний с течением времени уменьшается.

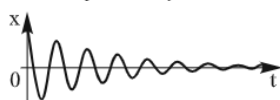


Рис. 15.16

Если затухание не слишком велико, то колебания можно рассматривать как гармонические, на которые накладывается уменьшение во времени амплитуды (как это показано на рис. 15.16).

В общем случае анализировать затухающие колебания много сложнее, чем незатухающие. Часто сила, вызывающая затухание, прямо пропорциональна скорости: $F_c = -bv$, где b — постоянная. Рассмотрим этот случай. Обратимся снова к колебаниям груза на конце пружины. Тогда в нашем случае второй закон Ньютона примет вид

$$ma = -kx - bv.$$

Уравнение движения в этом случае имеет вид $m d^2x/dt^2 + b dx/dt + kx = 0$. Можно проверить подстановкой, что решением этого уравнения будет функция

$$x = A \exp(-bt) \cos(\omega_1 t).$$

При $t = 0$ $x = 0$. Здесь A , b , ω_1 — постоянные.

Если подставить предполагаемое решение в уравнение колебаний, то можно видеть, что решение возможно при любых t лишь тогда, когда $\omega_1 = \sqrt{(k/m - b^2/4m^2)}$ (подробный вывод этого соотношения см. в книге Джанколи. Физика. Т. 1. С. 414). В полученном решении A — начальное смещение (значение x при $t = 0$), а частота определяется выражением:

$$f = \omega_1/2\pi = 1/2\pi \sqrt{(k/m - b^2/4m^2)}.$$

Если затухание невелико (b мало), ω_1 мало отличается от частоты гармонических колебаний: $\omega_1 \approx \omega = \sqrt{k/m}$. В случае затухающих колебаний частота меньше, а период больше, чем для незатухающих. При большом затухании полученное решение теряет силу при $b^2 > 4mk$ (под корнем возникает мнимое выражение). В этом случае колебания прекращаются.

Вообще, чем больше b , тем быстрее колебания затухают. Промежуток времени t_1 , за который амплитуда колебаний уменьшается в e раз, называется временем релаксации колебаний: $t_1 = 2m/b$.

Для характеристики скорости затухания вводят также декремент затухания (от лат. decrementum — уменьшение, убыль) Логарифмический декремент затухания — количественная характеристика быстроты затухания колебаний в линейной системе — представляет собой натуральный логарифм отношения двух последующих максимальных отклонений колеблющейся величины в одну

и ту же сторону. Декремент затухания d равен обратной величине времени релаксации t_1 .

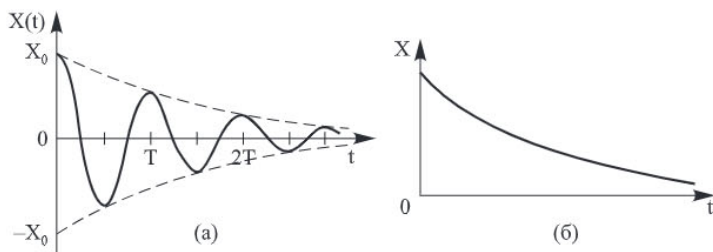


Рис. 15.17. Зависимость амплитуды колебаний пружинного маятника от времени с учетом диссипации энергии для случая малых декрементов затухания

Затухание колебаний не всегда явление нежелательным. Необходимость снижения амплитуды колебаний (вибраций) до допустимого уровня называется демпфированием. Это осуществляется с помощью устройств или приспособлений, поглощающих энергию колебаний (демпферов). Такие устройства применяются в подвесках автомобилей. Демпфирование поглощает некоторую или всю энергию, переданную подвеске ухабом, а значит, колебание будет меньше или его вовсе не будет, в зависимости от степени демпфирования.

Вынужденные колебания. Резонанс. При рассмотрении пружинного маятника мы выяснили, как изменяются потенциальная и кинетическая энергии маятника при колебаниях. При этом если пренебречь силой трения, тогда в любой момент времени сумма потенциальной и кинетической энергий остается неизменной: $E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \text{const}$.

При наличии силы трения энергия расходуется на совершение работы против этой силы, амплитуда колебаний уменьшается и колебания затухают. Таким образом, свободные колебания маятника, происходящие за счет первоначального запаса энергии, всегда затухающие. Возникает вопрос: что нужно сделать для того, чтобы колебания с течением времени не прекращались? Очевидно, для получения незатухающих колебаний необходимо компенсировать потери энергии. Это можно сделать разными способами. Рассмотрим один из них.

Известно, что колебания качелей не будут затухать, если их постоянно подталкивать, т. е. действовать на них с некоторой силой. В этом случае колебания качелей уже не являются свободными, они будут происходить под действием внешней силы. Работа этой внешней силы как раз и восполняет потери энергии, вызванные трением.

Выясним, какой должна быть внешняя сила. Предположим, что модуль и направление силы постоянны. Очевидно, в этом случае колебания прекратятся, потому что тело, пройдя положение равновесия, не будет в него возвращаться. Следовательно, модуль и направление внешней силы должны периодически изменяться. Таким образом, вынужденными колебаниями называют колебания, происходящие под действием внешней, периодически изменяющейся силы. Вынужденные колебания, в отличие от свободных, могут происходить с любой частотой. Частота вынужденных колебаний равна частоте изменения действующей на тело силы, в данном случае называется вынуждающей.

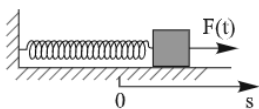


Рис. 15.18. Осциллятор при действии гармонической внешней силы

Пусть внешняя сила синусоидальна (что бывает нередко) и может быть записана следующим образом: $F_{\text{вн}}(t) = F_0 \cos(\omega t)$, где ω — круговая частота внешней силы, действующей на осциллятор (рис. 15.18).

Гармоническое возбуждение в виде силы $F_{\text{вн}}(t)$ часто встречающееся. Оно позволяет получить аналитическое решение уравнения движения.

Итак, уравнение движения с учетом затухания и при наличии внешней силы примет вид

$$d^2x/dt^2 + bdx/dt + kx = F_0 \cos(\omega t).$$

Как мы видим, стоящий в правой части уравнения член не содержит неизвестной x и ее производных. Это позволяет записать одно решение этого уравнения в виде

$$x = A_0 \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где $A_0 = F_0/m\sqrt{[(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + b^2\omega^2/m^2]}$, а $\varphi_0 = \arctg[(\omega_0^2 - \omega^2)/\omega(b/m)]$.

Частота ω_0 является собственной частотой системы, и, как видно, амплитуда вынужденных колебаний сильно зависит от разницы между частотой возбуждения и собственной частотой системы. Максимального значения амплитуда вынужденных колебаний достигает при частоте ω колебаний внешней силы, примерно равной собственной частоте ω_0 колебаний системы: $\omega \approx \omega_0$.

Явление возрастания амплитуды установившихся вынужденных колебаний до максимального значения при приближении частоты изменения внешней силы к частоте свободных колебаний системы называется резонансом.

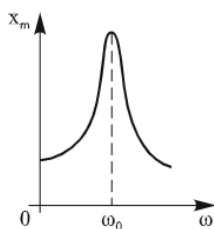


Рис. 15.19. Зависимость амплитуды колебаний x_m от частоты при резонансе

Пример зависимости амплитуды x_m вынужденных колебаний от частоты ω вынуждающей силы постоянной амплитуды представлен на рис. 15.19. По оси абсцисс отсчитывается частота ω изменения силы, действующей на систему; по оси ординат — амплитуда вынужденных колебаний. При совпадении частоты ω изменения силы с собственной частотой ω_0 колебаний системы сила в течение всего периода оказывается направленной в ту же сторону, что и вектор скорости колеблющегося тела. Поэтому в течение всего периода внешняя сила совершает положительную работу, увеличивая амплитуду колебаний тела. При любой другой частоте в течение одной части периода сила совершает положительную работу, увеличивая запас энергии

в системе, в течение другой части периода та же сила совершает отрицательную работу, уменьшая запас энергии в колебательной системе. Так как при резонансе внешняя сила совершает за период максимальную положительную работу над колебательной системой, то условие резонанса можно определить как условие максимальной передачи энергии колебательной системе. Собственная частота колебаний системы ω_0 называется резонансной частотой.

При отсутствии в системе трения (затухания) амплитуда вынужденных колебаний при резонансе должна возрастать со временем неограниченно. В реальных системах амплитуда колебаний в установившемся режиме резонанса определяется условием равенства потерь энергии в течение периода и работы внешней

силы за то же время. Чем меньше трение, тем больше амплитуда при резонансе. Так как в реальных системах b никогда не равен нулю, резонансный пик не уходит в бесконечность, а имеет конечную высоту. При этом вершина пика не приходится точно на $\omega = \omega_0$. Высоту и ширину резонансного пика часто характеризуют параметром Q , называемым добротностью: $Q = m\omega_0/b$. Чем меньше затухание, тем больше добротность и выше резонансный пик.

Значением Q можно также характеризовать ширину резонансного пика. Если ω_1 и ω_2 — частоты, соответствующие половине значения максимальной амплитуды и $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, тогда имеет место равенство $\Delta\omega/\omega = 1/Q$.

Резонанс широко распространен в природе и технике. В целом он представляет собой универсальный закон. Например, Тесла считал закон резонанса наиболее общим природным законом.

Наш рассказ мы начали с рассказа о качелях, но вот еще пример. Застывшую в ямке машину постепенно раскачивают и толкают вперед в моменты, когда она сама движется вперед. Так значительно повышают ее инерцию, усиливая амплитуду колебаний. Можно приводить множество подобных примеров, которые говорят о том, что мы на практике очень часто применяем явление резонанса, только делаем мы это интуитивно, не догадываясь, что применяем правила физики.

Выше говорилось о пользе резонанса. Однако резонанс может и вредить. Расплескивание воды из ведра при ходьбе, раскачивание вагона на стыках рельсов и т. п. — все это примеры резонанса. Иногда возникающее увеличение амплитуды колебаний может привести к весьма плачевным последствиям. Классический пример — обрушение, когда под шагами солдат реально разрушались и падали в воду мосты. Последний из них произошел около ста лет назад в Петербурге. В таких случаях частота ударов солдатских сапог совпадала с частотой колебаний моста, и мост рушился. Именно поэтому, на основе горького опыта, было введено правило для солдат сбрасывать шаг, заходя на мост. Мы еще встретимся на страницах этой книги с явлением резонанса при изучении электрических и магнитных явлений, атомов и молекул... А сейчас в продолжение путешествия мы оказались в очень интересной и важной области физики — в теории волновых процессов, тесно связанной с теорией колебаний.

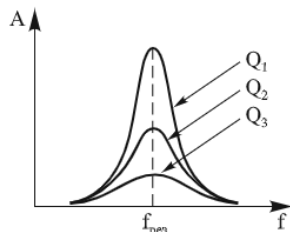


Рис. 15.20. Вид резонансной кривой в зависимости от добротности системы: добротность уменьшается от Q_1 до Q_3

16. Волны вокруг нас. Уравнение бегущей волны. Волновые эффекты. Законы отражения и преломления волн. Интерференция. Дифракция. Стоячие волны. Резонанс. Звуковые волны. Скорость звука. Частотный диапазон звуковых волн. Волновые эффекты звуковых волн. Эффект Доплера.

Волновые процессы чрезвычайно широко распространены в природе. Каждый из нас наблюдал, как от камня, брошенного на спокойную поверхность пруда или озера, кругами разбегаются волны (рис. 16.1), как волны набегают на берег.



Рис. 16.1. Волны на воде от брошенного камня

Волны от упавшего в спокойную воду камня не прекратились, после того как перестала действовать возмущающая сила (удар камня о поверхность воды). Само возмущение в виде круговых волн на поверхности воды побежало в стороны и будет распространяться и тогда, когда в месте падения камня вода уже успокоится. Источниками разных волн являются колебания. В предыдущей части мы изучали механические колебания. Здесь мы сосредоточим внимание на

изучении механических волн. Эти волны распространяются в веществе — в воде, в натянутой струне и т. п. Причины, вызывающие волновые движения, могут быть весьма различны. Но, подобно колебаниям, все виды волн описываются количественно одинаковыми или почти одинаковыми законами.

Характеристики волнового движения. Механические волны распространяются в материальных средах (твердых, жидких или газообразных). Отдельные частицы любого тела — твердого, жидкого или газообразного — взаимодействуют друг с другом. Поэтому если какая-либо частица тела начинает совершать колебательные движения, то в результате взаимодействия между частицами это движение начинает с некоторой скоростью распространяться во все стороны.

Волна — это колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени. В воздухе, твердых телах и внутри жидкостей механические волны возникают благодаря действию сил упругости. Эти силы осуществляют связь между отдельными частями тела. Так, образование волн на поверхности воды вызывают сила тяжести и сила поверхностного натяжения. Следовательно, среда должна обладать инертными и упругими свойствами. В реальных средах эти свойства распределены по всему объему. Так, например, любой малый элемент твердого тела обладает массой и упругостью. В простейшей одномерной модели твердое тело можно представить как совокупность шариков и пружинок (рис. 16.2).

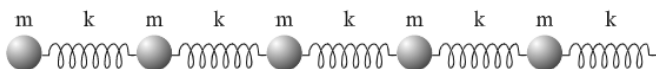


Рис. 16.2. Простейшая одномерная модель твердого тела

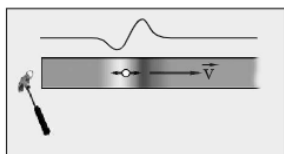


Рис. 16.3. Распространение продольного волнового импульса по упругому стержню

В этой модели инертные и упругие свойства разделены. Шарики обладают массой m , а пружинки — жесткостью k .

Механические волны бывают разных видов. Если в волне частицы среды испытывают смещение в направлении, перпендикулярном направлению распространения, то волна называется *поперечной*. Примером волны такого рода могут служить волны, бегущие по натянутому резиновому жгуту (рис. 16.3) или по струне.

Если смещение частиц среды происходит в направлении распространения волны, то волна называется *продольной*. Волны в упругом стержне (рис. 16.3) или звуковые волны в газе являются примерами таких волн. Продольные волны легко

наблюдать в опытах с пружиной. Попеременно сжимая и растягивая за свободный конец не слишком жесткую пружину, можно видеть, как по пружине перемещаются области растяжения и сжатия.

В продольных волнах шарики испытывают смещения вдоль цепочки, а пружинки растягиваются или сжимаются (деформация растяжения или сжатия). В жидкостях или газах деформация такого рода сопровождается уплотнением или разрежением. Продольные механические волны могут распространяться в любых средах — твердых, жидких и газообразных.

Если в одномерной модели твердого тела один или несколько шариков сместить в направлении, перпендикулярном цепочке, то возникнет деформация сдвига.

Деформированные при таком смещении пружины будут стремиться вернуть смещенные частицы в положение равновесия. При этом на ближайшие несмещенные частицы будут действовать упругие силы, стремящиеся отклонить их от положения равновесия. В результате вдоль цепочки побежит поперечная волна. Обратимся к модели рис. 16.2. Если взяться за крайний шар и качать его из стороны в сторону, можно легко наблюдать, как посредством деформации пружин колебание передается от шара к шару и как колебание каждого шара отстает от колебания предыдущего.

В результате возникает поперечная волна, бегущая вдоль по цепочке (рис. 16.5). Чем жестче пружины и чем легче шары, тем меньше отстает колебание каждого шара от колебания его предшественника, а значит, тем длиннее при одном и том же периоде получится волна.

В жидкостях и газах упругая деформация сдвига не возникает. Если один слой жидкости или газа сместить на некоторое расстояние относительно соседнего слоя, то никаких касательных сил на границе между слоями не появится. Поперечные упругие волны могут распространяться только в твердых телах, в которых возникают силы упругости при деформациях сдвига.

Тот факт, что поперечные волны не распространяются в жидкостях, дало возможность геофизикам сделать определенные заключения о внутреннем строении Земли. Изучение распространения сейсмических волн при землетрясениях показало, что значительное по интенсивности отражение наблюдается на глубине 2900 км. На этой глубине сильно отражаются поперечные сейсмические волны. Отсюда был сделан вывод, что ниже лежит жидкое ядро. Этот слой расплавленного металла называют внешним ядром.

Как в поперечных, так и в продольных волнах переноса вещества в направлении распространения волны не происходит. В процессе распространения частицы среды лишь совершают колебания около положений равновесия.

Когда мы говорим, что волна или одиночный изгиб шнура «бежит вдоль по шнуру», то это лишь краткое описание следующего явления: каждая точка шнура совершает такое же колебание, какое мы заставили совершать нижний конец шнура, но колебание каждой точки тем больше запаздывает (отстает по фазе), чем эта точка дальше от конца шнура.

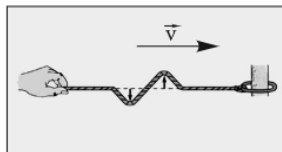


Рис. 16.4. Распространение поперечного волнового импульса по натянутому резиновому жгуту



Рис. 16.5. Поперечная волна

Рассмотрим основные характеристики волн на примере поперечной волны, показанной на рис. 16.6.

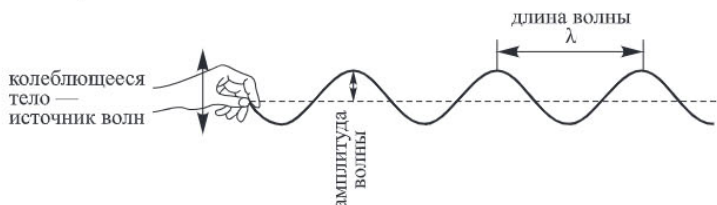


Рис. 16.6

Максимумы волн называются *гребнями*. Расстояние между соседними гребнями называется длиной волны λ . Модуль *наибольшего* смещения частицы среды от положения равновесия называется амплитудой волны A . Частота колебаний каждой точки среды называется частотой волны ν (или f). Величина T , обратная частоте, называется периодом волны. За время, равное одному периоду, любая точка среды совершает одно полное колебание, а волна смещается в пространстве вдоль направления своего распространения на расстояние, равное длине волны. Следовательно, скорость волны $v = \lambda/T$ или $v = \lambda\nu$ (или $f\lambda$). Скорость волны зависит от свойств среды, в которой она распространяется. Например, в растянутой струне скорость зависит от силы натяжения струны F_n и от массы на единицу длины струны μ : $v = \sqrt{(F_n/\mu)}$. Это выражение качественно согласуется с механикой Ньютона.

Уравнение бегущей волны. Рассмотрим пример волны, бегущей по длинному тонкому шнуру. Ось Ox направим вдоль шнура, а начало отсчета свяжем с левым концом шнура. Смещение колеблющейся точки шнура от положения равновесия обозначим буквой s . Для описания волнового процесса нужно знать смещение каждой точки шнура в любой момент времени. Следовательно, надо знать вид функции

$$s = s(x, t).$$

При $t = 0$ это выражение оказывается функцией только x . Если взять более поздний момент времени и несколько увеличить x , мы получим ту же самую величину s . Например, если максимум s возникает при $x = x_0$ и в момент времени $t = 0$, то положение максимума в момент времени t находится из равенства

$$x - vt = x_0, \quad \text{или} \quad x = x_0 + vt.$$

Мы видим, что функция $s_1(x - vt)$ отвечает распространению волны. Существует еще и другая возможность, когда источник излучает волны не направо, как указано на рис. 16.6, а налево, в направлении уменьшения x , так что волны будут двигаться в сторону отрицательных x . Тогда распространение волны описывалось бы функцией $s_2(x + vt)$.

Заставим конец шнура (точка с координатой $x = 0$) совершать гармонические колебания с циклической частотой ω . Колебания в точке $x = 0$ будут происходить по закону $s = s_m \sin(\omega t)$. Здесь приняли начальную фазу равной нулю, а амплитуда колебаний — s_m . Колебания, распространяясь со скоростью v в произвольную точку шнура, в соответствии с рассмотренным выше, придут спустя время

$\Delta t = x/v$. Если пренебречь затуханием волны по мере ее распространения, то колебания в точке x будут происходить с той же амплитудой s_m , но с другой фазой:

$$s(x, t) = s_m \sin[\omega(x/v - t)].$$

Это и есть уравнение гармонической бегущей волны, распространяющейся в положительном направлении оси Ox . Используя это уравнение, можно определить смещение различных точек шнура в любой момент времени. Используя приведенные выше соотношения между частотой f и периодом T , а также учитывая, что $v = \lambda/T$, перепишем формулу для $s(x, t)$ следующим образом:

$$s(x, t) = s_m \sin(2\pi x/\lambda - 2\pi t/T).$$

Положим $2\pi/\lambda = k$. Тогда $s = s_m \sin(kx - \omega t)$. Величина k называется *волновым числом*. Величина $kx - \omega t$ называется фазой волны, при этом скорость v называют фазовой скоростью, поскольку она характеризует перемещение фазы волны: $v = \lambda f = (2\pi k/\omega 2\pi) = \omega/k$.

Формула для $s(x, t)$, написанная выше, отражает перемещение волны в положительном направлении оси Ox . Как следует из общего выражения для функций распространения волны $s(x, t)$, чтобы получить формулу для волны, распространяющейся в сторону уменьшения x , достаточно поменять знак перед v .

Положив в формуле для $t = 0$, мы получим исходный синусоидальный профиль волны $s(x, 0)$. В любой другой момент времени t_1 , отличный от 0, мы обнаружим нашу синусоиду с фазовым сдвигом ωt_1 .

Если зафиксировать координату x , например $x = 0$, то получим характер изменения волны во времени: $s = s_m \sin \omega t$. Таким образом, в любой фиксированной точке пространства смещение в волне совершает гармоническое колебание.

Если потери на трение малы, то, как показывают рассуждения, приведенные в начале этого раздела, волна при своем распространении сохраняет свою форму. Таким образом, любая волна, движущаяся вдоль оси x , должна описываться выражениями, даваемыми функциями $s = s(x \pm vt)$.

Энергия упругой волны. Выше отмечали, что при волновом движении в результате взаимодействия между частицами, начавшееся в каком-либо месте, это движение начинает с некоторой скоростью распространяться во все стороны. Распространение механической волны, представляющее собой последовательную передачу движения от одного участка среды к другому, означает тем самым передачу энергии. Эту энергию доставляет источник волны, когда он приводит в движение непосредственно прилегающий к нему слой среды. От этого слоя энергия передается следующему слою и т. д. Таким образом, распространение волны создает в среде поток энергии, расходящийся от источника. При встрече волны с различного рода телами переносимая ею энергия может произвести работу или превратиться в другие виды энергии. Диапазон энергий для различного вида волн очень широк: от огромных энергий сейсмических волн при землетрясениях до «комариного писка» (летающий комар излучает звуковые волны). Рассчитаем энергию, переносимую упругой волной. Рассмотрим синусоидальную волну, частицы которой совершают гармонические колебания. Каждая частица имеет максимальное смещение (колеблется с максимальной амплитудой) A_m и частотой f . Как было показано в предыдущей главе, энергия такой колеблющейся частицы равна $1/2 k A_m^2$. Это выражение справедливо как для продольной,

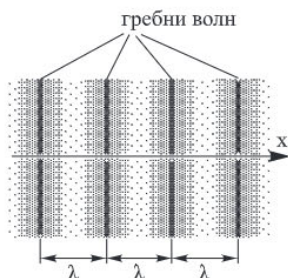


Рис. 16.7. Волновые поверхности плоской волны

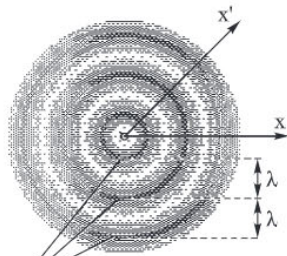


Рис. 16.8. Сферическая волна

Интенсивность волны пропорциональна квадрату ее амплитуды.

Волна от точечного источника распространяется во всех направлениях (например, это происходит в звуковой волне, при землетрясениях).

Волна, распространяясь от источника, охватывает все новые и новые области пространства. Если источник колебаний очень мал (точечный источник), то волны от него радиально расходятся во все стороны, так как это показано на рис. 16.8. Имеем радиальный пучок лучей. Вдоль луча x , как и вдоль луча x' , распространение колебаний происходит как в рассмотренных случаях гармонических волн. При этом волновые поверхности (например, гребни волны) являются сферами. Такая волна называется *сферической*.

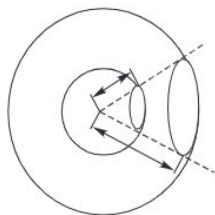


Рис. 16.9

Энергия, излучаемая точечным источником, равномерно распространяется по всей поверхности волновой среды. Нетрудно видеть, что энергия, приходящаяся на единицу поверхности этой сферы, будет тем меньше, чем больше радиус сферы. Площадь сферы или любого вырезанного в ней конусом участка растет пропорционально квадрату радиуса, т. е. при увеличении расстояния от источника вдвое площадь увеличивается вчетверо, и на каждую единицу поверхности сферы приходится вчетверо меньшая энергия волны.

Отсюда отношение амплитуды волны для двух расстояний R_1 и R_2 от источника будет обратно пропорционально отношению радиусов: $A_m/R_1 = A_m/R_2$. С расстоянием убывает также и интенсивность волны. При этом $I_2/I_1 = R_1^2/R_2^2$.

так и для поперечной волны. Так как $f = 1/2\pi v(k/m)$, средняя энергия частицы $W = 2\pi^2 f^2 m A_m^2$. Масса $m = \rho V$ (ρ — плотность среды, V — ее объем). Если S — площадь поперечного сечения, через которое проходит волна, а vt — расстояние, проходимое волной за время t , тогда $W = 2\pi^2 f^2 S v t A_m^2$. Все лучи, вдоль которых распространяется волна, параллельны друг другу (параллельны оси x) на рис. 16.7. В однородной среде колебание вдоль всех параллельных лучей распространяется с одинаковой фазовой скоростью v . Значит, все волновые поверхности суть плоскости. Такая волна называется плоской.

От одной волновой поверхности до другой переносится энергия, даваемая формулой, приведенной выше. Следовательно, энергию W следует рассматривать как среднюю энергию переносимую волной через волновую поверхность. Из приведенного выражения видим, что энергия, переносимая волной, пропорциональна квадрату ее амплитуды.

Введем еще ряд понятий. Энергия, переносимая в единицу времени, называется средней мощностью $\langle P \rangle$: $\langle P \rangle = W/t = 2\pi^2 f^2 S v A_m^2$. Энергия, переносимая через единицу площади в единицу времени, называется интенсивностью волны: $I = \langle P \rangle / S = 2\pi^2 f^2 v A_m^2$.

При рассмотрении энергии волны мы не учитывали эффект затухания, вызванного трением. С учетом затухания уменьшение амплитуды будет больше, чем дают полученные выше соотношения.

Волновые эффекты. В этом разделе мы рассмотрим ряд явлений, связанных с распространением волн в ограниченной среде.

1. *Отражение и преломление волн.* Выше мы получили уравнение бегущей волны, представляющее собой две функции. Эти функции дают смещение точки волны в любой момент времени. Одна из функций, $s_1(x - vt)$, описывает движение волны вправо в сторону увеличения координаты x , вторая, $s_2(x + vt)$, описывает волну, распространяющуюся влево.

Рассмотрим простой случай одномерной волны в шнуре, один конец которой закреплен в стене в точке $x = 0$. В этой точке в любой момент времени амплитуда s должна равняться нулю. Отсюда следует, что функция s , описывающая распространение волны, должна иметь следующий вид:

$$S = F(x - vt) - F(-x - vt).$$

На рис. 16.10 представлена волна, идущая в отрицательном направлении вблизи точки $x = 0$, и гипотетическая волна, идущая в противоположном направлении с обратным знаком и с другой стороны от начала координат. Истинное же движение шнура должно рассматриваться как сумма этих двух волн в области положительных x .

Достигнув начала координат, они в точке $x = 0$ полностью уничтожат друг друга, а затем вторая (отраженная) волна, идущая, разумеется, в противоположном направлении, окажется единственной волной в области положительных x . Эти результаты эквивалентны следующему утверждению: волна, достигнув зашпеленного конца, отражается от него с изменением знака. Такое отражение всегда можно понять, если представить себе, как нечто дошедшее до конца шнура вылетит затем из-за стены «вверх ногами». То есть отраженная волна будет отличаться по фазе от падающей на 180° . Короче говоря, если мы предположим, что длина шнура бесконечна, то, где бы ни находилась волна, бегущая в одном направлении, всегда существует симметричная ей относительно точки $x = 0$ другая волна, бегущая в противоположном направлении; в самой точке $x = 0$ никакого перемещения не будет, а поэтому безразлично, зашпелена ли струна в этом месте или нет.

Заметим, что, когда волновой импульс достигает стенки, отражается не вся энергия. Часть ее передается стенке, где она частично переходит в тепловую, а частично продолжает распространяться в виде волны в самой стене. Легкая стенка будет «дрожать», а массивная «не шелохнется».

Если волна переходит из одной среды в другую, где скорость ее распространения иная, то прошедшая волна может двигаться в направлении, отличном

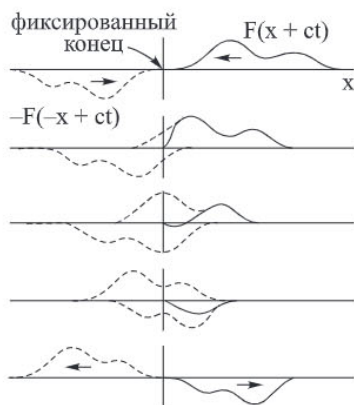


Рис. 16.10. Отражение волнового импульса, распространяющегося по шнуру, от закрепленного конца

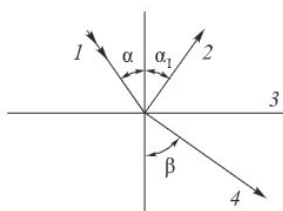


Рис. 16.11. Отражение и преломление волн на границе раздела двух сред

от падающего. Изменение направления распространения волн на границе раздела двух сред при переходе волн из одной среды в другую называется *преломлением волн*. На рис. 16.11 показано преломление падающего луча на границе двух сред.

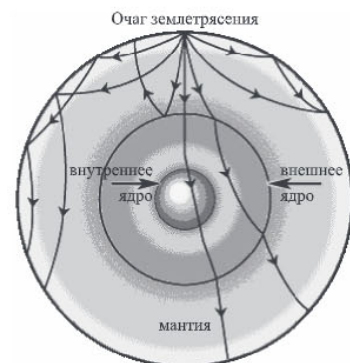
Угол падения α_1 и угол отражения α_2 отсчитываются от перпендикуляра (нормали) к линии раздела в точке падения луча. Угол β носит название угла преломления. Между углом падения и углом отражения имеет место следующее соотношение:

$$\sin \alpha_1 / \sin \beta = v_2 / v_1.$$

То есть отношение синуса угла отражения к синусу угла преломления равно отношению скорости волны во второй среде к скорости волны в первой. Мы более подробно рассмотрим вопросы отражения и преломления волн в главе, посвященной свету.

Отметим, что законы отражения и преломления волн важны при исследовании строения земного шара и в прикладных геофизических исследованиях. Сейсмические волны распространяются в глубинах земли через породы, имеющие разную плотность, и, следовательно, с разными скоростями.

Упругие волны в мантии распространяются так же, как в твердом теле. На границе мантии скачкообразно увеличивается скорость распространения сейсмических волн, что связано с резким повышением плотности вещества до 5600 кг/м^3 . Значительное по интенсивности



Трассы распространения сейсмических волн, отраженных и преломленных глубинными границами разного рода.

Рис. 16.12. Распространение сейсмических волн в Земле, возникших в результате землетрясения. Видно и отражение, и преломление волн на границах раздела земных слоев

отражение наблюдается на глубине 2900 км. На этой глубине сильно отражаются поперечные сейсмические волны (об этом упоминалось выше).

Регистрируются сейсмические волны приборами — сейсмографами.

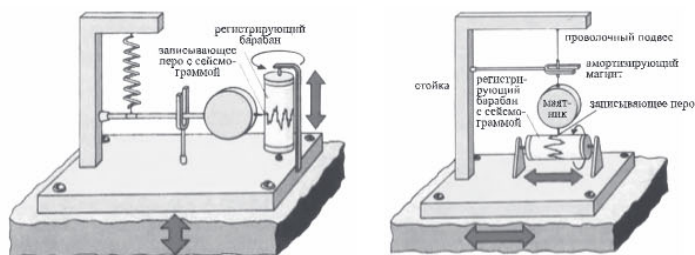


Рис. 16.13. Действие сейсмографа основывается на том принципе, что свободно подвешенные маятники при землетрясениях остаются почти неподвижными. Левый сейсмограф фиксирует горизонтальные колебания земли, а правый — вертикальные (www.diagram.com.ua)

Сейсмограф состоит из маятника, например стальной гирьки, которая на пружине или тонкой проволоке подвешена к стойке, прочно закрепленной в грунте. Маятник соединен с пером, чертящим непрерывную линию на бумажной ленте. При быстрых колебаниях почвы бумага сотрясается вместе с ней, маятник же с пером по инерции остаются неподвижными. На бумаге появляется волнистая линия, отражающая колебания почвы. Кривая на бумажной ленте, укрепленной на медленно вращающемся барабане под наносящим линию пером, называется сейсмограммой.

2. Интерференция. Интерференция — это результат сложения колебаний. В результате интерференции в каких-то точках пространства происходит рост амплитуды колебаний, а в других — их уменьшение. Интерференция характерна для волн любой природы: волн на поверхности жидкости (рис. 16.14), упругих (например, звуковых), световых и т. д.



Рис. 16.14. Интерференция волн на воде

Интерферировать могут все волны, однако устойчивая интерференционная картина будет наблюдаться только в том случае, если волны имеют одинаковую частоту и колебания в них не перпендикулярны.

Таким образом, необходимые условия для наблюдения интерференции следующие:

- 1) волны должны иметь одинаковые (или близкие) частоты, чтобы картина, получающаяся в результате наложения волн, не менялась во времени (или менялась не очень быстро, что бы ее можно было успеть зарегистрировать);
- 2) волны должны быть однонаправленными (или иметь близкое направление); две перпендикулярные волны никогда не дадут интерференции (попробуй-те сложить две перпендикулярные синусоиды!).

Волны, для которых выполняются эти два условия, называются *когерентными*. Рассмотрим в качестве примера результат сложения двух одинаковых однонаправленных синусоид. Варьировать будем только их относительный сдвиг. Иными словами, мы складываем две когерентные волны, которые отличаются только начальными фазами (либо их источники сдвинуты друг относительно друга, либо то и другое вместе). Возможны две ситуации, показанные на рис. 16.15. Наглядно оба рассмотренных случая показаны на рис. 16.15.

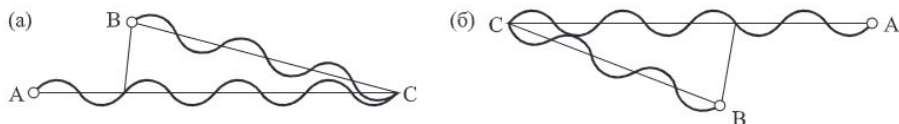


Рис. 16.15. а) В точку С приходят две волны с одинаковой фазой; там происходит увеличение амплитуды; б) волны от двух источников приходят в противофазе и гасят друг друга

Посмотрим на рис. 16.16, где показана картина интерференции круговых волн, образовавшихся на воде от двух брошенных камней. Там, где гребни одной волны встречаются с гребнями другой (а впадины с впадинами), происходит усиление (интерференция): частицы воды колеблются вверх и вниз с большей ам-

плитудой. В других местах, где гребни встречаются с впадинами, происходит уменьшение колебаний — гасящая интерференция. В реальных условиях нет строгой когерентности колебаний, а значит, нельзя получить устойчивую интерференционную картину. Так что имеет место не полное, а лишь частичное усиление или ослабление колебаний.

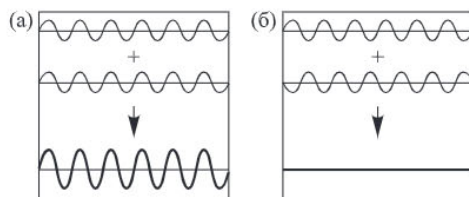


Рис. 16.16. Интерференция: усиление (а); затухание (б)

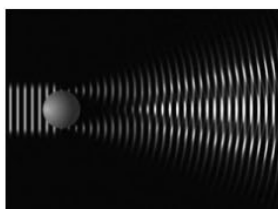


Рис. 16.17. Дифракция волн за препятствием (шаром)

3. **Дифракция.** Дифракцией называют явления, связанные со свойством волн огибать препятствия, т. е. отклоняться от прямолинейного распространения. На рис. 16.17 показана дифракция волн, распространяющихся слева направо за шаром. Видно, что дифракция волн практически уничтожает тень от шара, а в ее центре появляется область, где интенсивность волн очень велика.

Дифракция зависит от соотношения между длиной волны и размером препятствия. Если длина волны значительно больше препятствия, то волна проходит «не замечая» его, как будто его вовсе нет. Если длина волны заметно меньше размеров препятствия, то за препятствием будет значительная область тени.

Интерференция и дифракция — это чисто волновые явления, свойства волн, а не материальных тел. Эти явления будут подробно рассмотрены в части, посвященной свету.

Стоячие волны. Резонанс. Волна, бегущая по резиновому жгуту или по струне, отражается от неподвижно закрепленного конца; при этом появляется волна, бегущая во встречном направлении. В струне, закрепленной на обоих концах, возникают сложные колебания, которые можно рассматривать как результат сложения (суперпозиции) двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях. Волны, бегущие по струне во встречных направлениях, при определенных условиях могут образовать так называемую стоячую волну.

Для вывода уравнения стоячей волны примем следующие условия: 1) волны распространяются в среде без затухания; 2) $A_1 = A_2 = A$ — имеют равные амплитуды; 3) $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ — равные частоты; 4) начальные фазы $\varphi_{10} = \varphi_{20} = 0$.

Уравнение бегущей волны, распространяющейся вдоль положительного направления оси x :

$$S_1 = A \sin \omega(t - x/v). \quad (1)$$

Уравнение бегущей волны, распространяющейся в отрицательном направлении оси x :

$$S_2 = A \sin \omega(t + x/v). \quad (2)$$

Сложив уравнения (1) и (2), получим уравнение стоячей волны и, приняв во внимание, что $\omega = 2\pi f$, после несложных тригонометрических преобразований получим

$$S = S_1 + S_2 = 2A \cos(2\pi x/\lambda) \cos \omega t.$$

Особенностью стоячей волны является то, что амплитуда ее зависит от координаты x . При перемещении от одной точки к другой амплитуда меняется по закону

$$A_{\text{стб}} = |2A \cos(2\pi x/\lambda)|,$$

где $A_{\text{стб}}$ — амплитуда стоячей волны.

Те точки среды, в которых амплитуда стоячей волны максимальна и равна $2A$, называются пучностями. Координаты пучностей можно найти из условия, что функция косинуса максимальна, т. е.

$$\cos(2\pi x/\lambda) = 1.$$

Отсюда $2\pi x/\lambda = \pm \pi$, $k = 0, 1, 2, \dots$. Значения x , в которых располагаются пучности: $x = \pm k\lambda/2$.

Расстояние между соседними пучностями равно $\lambda/2$.

Точки, в которых амплитуда стоячей волны минимальна и равна 0, называются узлами. Координата узлов можно найти из условия равенства нулю: $|\cos(2\pi x/\lambda)| = 0$.

Отсюда $2\pi x/\lambda = \pm(2k + 1)\pi/2$, $k = 0, 1, 2, \dots$, а $x = \pm(2k + 1)\lambda/4$. Расстояние между двумя соседними узлами равно $\lambda/2$.

В отличие от бегущей волна, все точки которой колеблются с одинаковой амплитудой, но с разными фазами, зависящими от координаты x точки $S = A \cos(\omega t - kx)$, точки стоячей волны между двумя узлами колеблется с разными амплитудами, но с одинаковыми фазами ($S = |A \cos(2\pi x/\lambda)|$).

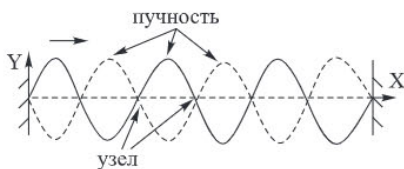


Рис. 16.18. Вид стоячей волны

Стоячая волна получается в результате интерференции падающей и отраженной волн. На характере отражения сказывается граница раздела двух сред, от которой происходит отражение. Если волна отражается от среды менее плотной, то фаза волны на границе раздела не меняется и на границе раздела двух сред будет пучность. Если волна отражается от более плотной среды, то ее фаза, как отмечалось выше, изменяется на противоположную, т. е. отражение от более плотной среды происходит с потерей половины длины волны ($\lambda/2$).

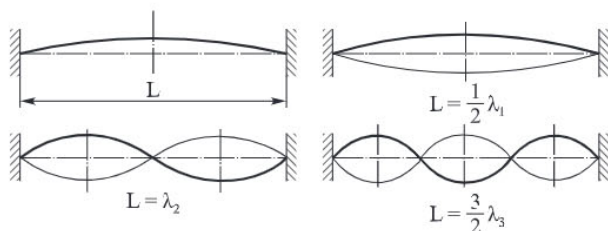


Рис. 16.19

Бегущая волна переносит энергию колебательного движения в направлении распространения волны. Стоячая волна энергию не переносит, так как падающая и отраженная волны одинаковой амплитуды несут одинаковую энергию в противоположных направлениях. Поэтому полная энергия результирующей стоячей волны, заключенной между узлами, остается постоянной. Лишь в пределах расстояний, равных $\lambda/2$, происходит превращение кинетической энергии в потенциальную.

Рассмотрим для примера струну длиной L . В точках закрепления струны ($x = 0$, $x = L$) колебаний не будет, как и в узлах. Подставив $x = L$ в выражение $x = \pm k\lambda/2$, получим связь длин стоячих с длиной струны (в зависимости от значений k). Случай $k = 1$ реализует низшую частоту, или основную моду, или первую гармонику. В этом случае длина струны равна половине длины волны. Для других значений k получаем другие гармоники: вторая $L = \lambda$, третья $L = (3/2)\lambda$ и т. д. При этом целые значения k обозначают номер гармоники (рис. 16.19). При этом $k = 1$ соответствует основной моде, $k = 2$ — второй гармонике, называемой также первым обертоном; вторая гармоника — вторым обертоном и т. д.

Частоты, на которых возникают стоячие волны, называются собственными или резонансными частотами. Если стоячая волна образуется на частотах, на которых имеет место резонанс, то без больших усилий можно поддерживать колебания со значительной амплитудой. Отсюда следует, что стоячие волны относятся к тому же типу колебаний, что и резонансные колебания, рассмотренные ранее на примере груза на пружине или маятника. Отличие в том, что в первом случае была одна резонансная частота, в то время как в струне их целый спектр. Стоячие волны возбуждаются не только в струнах, но и в любых телах, способных совершать колебания.

Уж коль заговорили о струнах, самое время перейти к рассмотрению звука. Ведь звук — это тоже колебания.

Звуковые волны. Звук — непрменный атрибут жизни человека. Под звуком обычно мы понимаем те ощущения, которые возникают у слушателя при воздействии звуковой волны через слуховой аппарат на мозг. Самые разнообразные эмоции вызывает у нас тот сложный комплекс звуков, который мы называем музыкой. Звуки составляют основу речи, которая служит главным средством общения в человеческом обществе.

Звуки начали изучать еще в глубокой древности. Первые наблюдения по акустике были выполнены в VI веке до н. э. Тогда Пифагор установил связь между высотой тона и длиной трубы, издающей звук. В IV век до н. э. Аристотель первый правильно представил картину распространения звука в воздухе. Он утверждал, что звучащее тело вызывает сжатие и разрежение воздуха, он также объяснил явление эха отражением звука от препятствия.

Уже в Средние века Леонардо да Винчи сформулировал принцип независимости звуковых волн от различных источников. В более поздние времена в исследованиях слуха и зрения Гельмгольц (1821–1894) пользовался математическим аппаратом, развитым в значительной мере им самим для изучения волновых процессов. Кажется, что не существует звука без субъекта, человека, который его воспринимает. Но, если, к примеру, в горах упал камень, а рядом не было никого, кто мог бы слышать звук его падения, существовал звук или нет?

Очевидно, что звук существует как физическое явление. Звук — это распространяющиеся в упругих средах — газах, жидкостях и твердых телах — механические колебания, воспринимаемые органами слуха. При достижении звуковой волной какой-либо точки пространства частицы вещества, до того не совершавшие упорядоченных движений, начинают колебаться. Все, что мы слышим, будь то приятный голос или шум дорожного движения, это не что иное, как колебания воздуха. Любое движущееся тело, в том числе и колеблющееся, способно совершать работу, то есть оно обладает энергией. Следовательно, распространение звуковой волны сопровождается распространением энергии.

Источники звука. Источником этой энергии является колеблющееся тело, которое и излучает в окружающее пространство (вещество) энергию. Существуют как естественные, так и искусственные источники звука. Один из искусственных источников звука, камертон, был изобретен в 1711 году английским музыкантом Дж. Шором для настройки музыкальных инструментов.

Камертон представляет собой изогнутый (в виде двух ветвей) металлический стержень с держателем посередине.

Стандартная частота колебаний камертона — 440 Гц. Это означает, что за 1 с его ветви совершают 440 колебаний. На глаз они незаметны. Если, однако, прикоснуться к звучащему камертону рукой, то можно почувствовать его вибрацию. Для усиления звука, создаваемого камертоном, его держатель укрепляют на деревянном ящике, открытом с одной стороны. Этот ящик называют резонатором. При колебаниях камертона вибрация ящика передается находящемуся в нем воздуху.

Из-за резонанса, возникающего при правильно подобранных размерах ящика, амплитуда вынужденных колебаний воздуха возрастает и звук усиливается. Нечто подобное происходит и в таких музыкальных инструментах, как гитара, скрипка. Сами по себе струны этих инструментов создают слабый звук. Громким он становится благодаря наличию у них корпуса определенной формы с отверстием, через которое могут выходить звуковые волны.

Как возникают колебательные движения? Ударив резиновым молоточком по одной из ветвей камертона, мы услышим определенный звук. Ветви камертона начинают вибрировать, создавая вокруг себя попеременные сжатия и разрежения воздуха. Распространяясь по воздуху, эти возмущения образуют звуковую волну.

Аналогично колебания струны или металлической пластинки передаются окружающему воздуху. Когда зажатую в тисках стальную пластинку отпустить, пластинка отклонится, например, в правую сторону, она уплотняет (сжимает) слои воздуха, прилегающие к ней справа; при этом слой воздуха, прилегающий к пластине с левой стороны, разрежится. При отклонении пластины в левую сторону она сжимает слои воздуха слева и разрезает слои воздуха, прилегающие к ней с правой стороны, и т. д. Сжатие и разрежение прилегающих к пластине слоев воздуха будут передаваться соседним слоям. Этот процесс будет периодически повторяться, постепенно ослабевая, до полного прекращения колебаний.

Когда вы хлопаете в ладоши, воздух между ладонями выталкивается и создается звуковая волна. Повышенное давление заставляет молекулы воздуха распространяться во все стороны со скоростью звука. Когда волна достигает уха,



Рис. 16.20. Камертон

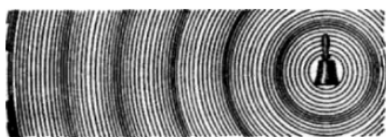


Рис. 16.21. Распространение звука
(разрежения–сгущения воздуха)
от колокола

она заставляет вибрировать барабанную перепонку, с которой сигнал передается в мозг, и вы слышите хлопок. Хлопок — это короткое одиночное колебание, которое быстро затухает. Другой типичный пример простой звуковой волны — периодическое колебание. К примеру, когда звонит колокол, воздух сотрясается от периодических колебаний стенок колокола.

Источниками звука могут быть не только колеблющиеся твердые тела, но и некоторые явления, вызывающие колебания давления в окружающей среде: взрывы, завывания ветра, гром и т. д. Число естественных и созданных человеком источников звука невозможно перечислить.

Скорость звука. Первые попытки измерить скорость звука предпринимались во Франции в XVII веке. Звуковыми «генераторами» служили огнестрельные орудия (мушкеты и пушки). В начале семнадцатого века изучением звука занялся известный в то время уже неоднократно упоминавшийся физик и математик М. Мерсенн. В 1630 году Мерсенн, заметив вспышку, подсчитывал удары пульса или отмечал по часам время, когда до него доносился звук выстрела. По результатам экспериментов скорость звука у него получилась равной 448 м/с.

Первую математическую формулу для расчета скорости звука предложил И. Ньютон. В «Началах» он на основании недавно открытого закона Бойля–Марриотта вывел значение скорости звука как квадратный корень из отношения атмосферного давления к удельному весу (плотности) воздуха. Для нормальных условий скорость звука получалась равной 298 м/с. Ньютон понял, что его формула некорректна после того, как сам экспериментально проверил результат. Он измерял время эха от хлопка в ладоши, стоя между двумя параллельными стенами, находившимися на расстоянии 200 м одна от другой, и получил скорость звука около 340 м/с.

В 1822 году измерениями скорости звука занялся цвет французской науки: члены Комиссии мер и весов и Парижской академии наук Д. Араго (1786–1853), Ж. Гей-Люссак (1778–1850), А. Гумбольдт (1769–1859) и другие. Чтобы компенсировать влияние ветра на измерения, распорядились установить вблизи Парижа артиллерийские пушки на расстоянии 18 613 м, а исследователи, разбившись на две группы, дежурили у обеих. Пушки стреляли по очереди с интервалом 5 мин. Усредненное время прохождения звуковых сигналов при температуре 20 °C составило 54,6 с, что соответствовало скорости звука 340,9 м/с.

Дым из ствола пушки виден раньше, чем будет услышан звук выстрела. Свет обгоняет звук. А до первых измерений скорости света Ремером скорость света считалась бесконечной. Поэтому световой сигнал мог быть использован в опытах по определению скорости звука. В 1826 году Ж. Колладон и Я. Штурм провели опыт по определению скорости звука в воде на Женевском озере (рис. 16.22).

Эксперимент Колладона считается рождением современной гидроакустики. Удар в подводный колокол в Женевском озере происходил с одновременным поджогом пороха. Вспышка от пороха наблюдалась Колладоном на расстоянии 10 миль. Он также слышал звук колокола при помощи подводной слуховой тру-

бы. Измеряя временной интервал между этими двумя событиями, Колладон вычислил скорость звука — 1435 м/с, т. е. за одну секунду звук в воде проходит 1435 метров. Разница с современными вычислениями только 3 м/с.

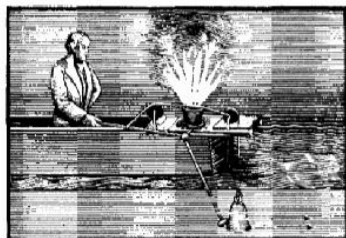


Рис. 16.22. Измерение скорости звука в воде. Человек, сидящий в левой лодке, передает звук, а человек, сидящий во второй лодке, регистрирует приход звука

Скорость звука различна в разных веществах. В газах (и в воздухе) она определяется формулой $v = \sqrt{B/\rho}$, где B — модуль всестороннего сжатия, ρ — плотность среды. В жидкостях и твердых телах, у которых модули упругости значительно больше (в силу малой сжимаемости), чем у газов, скорости звука больше. Так, скорость звука в железе и стали ≈ 5000 м/с, много больше, чем в воздухе или в воде (см. рис. 16.23).

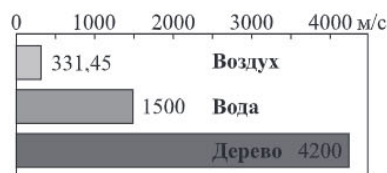


Рис. 16.23. Скорость звука в газообразных, жидких и твердых веществах

Также скорость звука зависит от температуры. Скорость звука в воздухе при температуре 20 °С и нормальном атмосферном давлении на уровне моря равна 344 м/с (1238 км/ч); при температуре 30 °С — 349 м/с; при 10 °С — 337 м/с; при 0 °С — 331,45 м/с; при –10 °С — 325,2 м/с. Как мы видим, скорость звука зависит от температуры, но незначительно.

Частотный диапазон. А каковы частотные границы человеческого слуха? Первым попытался определить частотные границы человеческого слуха французский ученый Ж. Савер (1653–1716). В 1700–1707 гг. вышли его мемуары по акустике, опубликованные Парижской академией наук. По его данным, опубликованным в Трудях Парижской академии наук, человек слышит звуки частотой от 25 до 12 800 Гц. Спустя почти 100 лет, в 1802 году, немецкий физик Э. Хладни (1756–1827) привел более точные данные и указал, что верхняя граница слышимых звуков составляет 22 000 Гц. Он же ввел в научный обиход термин «акустика» от греческого слова, означавшего «способность слышать».

В 1830 году французский физик Ф. Савар (1791–1841) (похожие фамилии с Савером) установил пределы слышимости нормального уха человека: 24 000 Гц (верхний предел) и 14–16 Гц (нижний предел). Правда, находились и исключения: известный немецкий физик и врач Г. Гельмгольц (1821–1894) сообщал о пациентах, слышавших писк с частотой 40 000 Гц. Человеческое ухо номинально слышит звуки в диапазоне от 16 до 20 000 Гц. Верхний предел имеет тенденцию снижаться с возрастом. Большинство взрослых людей не могут слышать

звук частотой выше 16 кГц. Ухо само по себе не реагирует на частоты ниже 20 Гц. В настоящее время установлено, что звуки частотой 25–34 кГц способны слышать некоторые дети в возрасте до 7 лет. Звуковые частоты, лежащие ниже диапазона слышимости (меньше 20 Гц), называются инфразвуком.

Ультразвук относится к диапазону выше слышимости человеческого уха и лежит в диапазоне более 20 кГц. Ультразвуковые волны по своей природе не отличаются от волн слышимого диапазона и подчиняются тем же физическим законам.

Существование неслышимых звуков было обнаружено с развитием акустики в конце XIX века. Тогда же начались первые исследования ультразвука, но основы его применения были заложены только в первой трети XX века. Первый генератор ультразвука сделал в 1883 году англичанин Фрэнсис Гальтон (1822–1911). Ультразвук создавался подобно свисту на острие ножа, если на него дуть. Роль такого острия в свистке Гальтона играл цилиндр с острыми краями. Воздух или другой газ, выходящий под давлением через кольцевое сопло диаметром таким же, как и кромка цилиндра, набегал на кромку, и возникали высокочастотные колебания. Продувая свисток водородом, удалось получить колебания до 170 кГц. Другая разновидность механических источников ультразвука — сирена. Она обладает относительно большой мощностью и применяется в милиейских

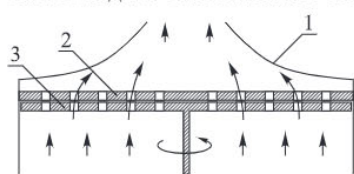


Рис. 16.24. Ультразвуковая механическая сирена: 1 — корпус; 2 — неподвижный диск; 3 — вращающийся диск

и пожарных машинах. Все ротационные сирены состоят из камеры, закрытой сверху диском (статором), в котором сделано большое количество отверстий. Столько же отверстий имеется и на вращающемся внутри камеры диск-роторе. При вращении ротора положение отверстий в нем периодически совпадает с положением отверстий на статоре. В камеру непрерывно подается сжатый воздух, который вырывается из нее в те короткие мгновения, когда отверстия на роторе и статоре совпадают.

У ультразвука есть специфические особенности, которые определили его широкое применение в науке и технике, правда, сравнительно недавно. Сейчас ультразвук широко применяется в различных физических и технологических методах.

Продольная звуковая волна. Звук — это колебания, т. е. периодическое механическое возмущение, в упругих средах — газообразных, жидких и твердых. Такое возмущение, представляющее собой некоторое физическое изменение в среде (например, изменение плотности или давления, смещение частиц), распространяется в ней в виде звуковой волны.

Рассмотрим длинную трубу, наполненную воздухом. С левого конца в нее вставлен плотно прилегающий к стенкам поршень (рис. 16.25). Если поршень резко двинуть вправо и остановить, то воздух, находящийся в непосредственной близости от него, на мгновение сожмется (рис. 16.25, а). Затем сжатый воздух расширится, толкнув воздух, прилегающий к нему справа, и область сжатия, первоначально возникшая вблизи поршня, будет перемещаться по трубе с постоянной скоростью (рис. 16.25, б). Эта волна сжатия и есть звуковая волна в газе.

Звуковая волна в газе характеризуется избыточным давлением, избыточной плотностью, смещением частиц и их скоростью. Для звуковых волн эти отклонения от равновесных значений всегда малы. Так, избыточное давление, связанное с волной, намного меньше статического давления газа. В противном случае мы имеем дело с другим явлением — ударной волной. В звуковой волне, соответствующей обычной речи, избыточное давление составляет лишь около одной миллионной атмосферного давления. Важно то обстоятельство, что вещество не уносится звуковой волной. Волна представляет собой лишь проходящее по воздуху временное возмущение, по прохождении которого воздух возвращается в равновесное состояние.

Волна в трубе на рис. 16.25 называется звуковым импульсом. Очень важный тип волны возбуждается, когда поршень колеблется туда-сюда подобно грузу, подвешенному на пружине. Такие колебания называются простыми гармоническими или синусоидальными, а возбуждаемая в этом случае волна — гармонической. При простых гармонических колебаниях движение периодически повторяется.

Предположим, что поршень колеблется в соответствии с формулой гармонических колебаний. Тогда при движении его вправо возникает, как и прежде, сжатие, а при движении влево давление и плотность будут уменьшаться относительно своих равновесных значений. Возникает не сжатие, а разрежение газа. В этом случае вправо будет распространяться, как показано на рис. 16.26, волна чередующихся сжатий и разрежений. В каждый момент времени кривая распределения давления по длине трубы будет иметь вид синусоиды, и эта синусоида будет двигаться вправо со скоростью звука v .

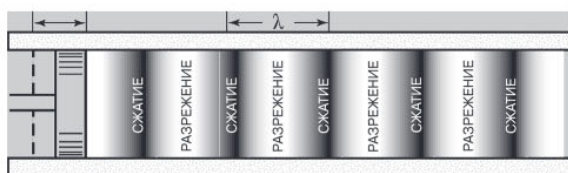


Рис. 16.26. Поршень, колеблющийся в трубе, создает стоячие волны с длиной волны λ , равной расстоянию между областями наибольшего сжатия

Изменение давления в такой волне дается выражением $p = -p_m \cos(kx - \omega t)$, где максимальное давление $p_m = \rho v^2 D_m k$. Здесь D_m — максимальное значение смещения, k — волновое число, связанное с длиной волны соотношением $k = 2\pi/\lambda$. Знак минус в формуле связан с тем, что с ростом давления объем уменьшается. Смещение в продольной волне направлено вдоль распространения волны (оси x). Заметим, что смещение отличается по фазе от волны давления на 90° (четверть длины волны). Там, где давление достигает минимума или мак-



Рис. 16.25. Звуковая волна:
а) поршень, резко сдвинувшийся в трубе в направлении стрелки, смещает соседние частицы воздуха, создает волну сжатия, т. е. звуковую волну, которая начинает распространяться в сторону от поршня;
б) звуковая волна движется в воздухе с постоянной скоростью, вызывая временное повышение давления

сигнума, смещение равно нулю, а где изменение давления равно нулю, там смещение минимально или максимально.

Звуковое давление можно измерить в таком воображаемом эксперименте. Образно говоря, нужно поставить на пути звуковой волны мембрану, связанную с очень чувствительными пружинными весами или динамометром (рис. 16.27).

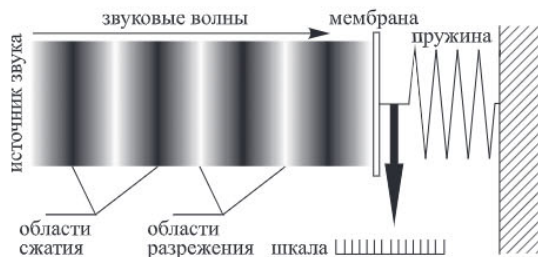


Рис. 16.27. Звуковые волны и звуковое давление

Показания этого прибора будут циклически меняться много раз в секунду. Если вы сможете уследить за колебаниями стрелки, то по величине максимальных ее отклонений в ту и другую сторону, зная чувствительность весов и площадь мембраны, удастся рассчитать абсолютное звуковое давление, например, в килограммах на квадратный метр.

На практике чаще говорят об относительном звуковом давлении, или уровне звука. Было измерено звуковое давление, или мощность самого тихого звука, который еще способен расслышать среднестатистический человек. Это значение приняли за ноль и назвали порогом слышимости. О любом другом звуке можно сказать, что его мощность, или звуковое давление, во столько-то раз выше порога слышимости. Максимальное звуковое давление, при котором звук вызывает уже болевые ощущения (болевой порог), примерно в 100 000 000 раз превышает порог слышимости. Для удобства отношение силы звука к порогу слышимости измеряют не в разгах, а в логарифмических единицах — децибелах (дБ, dB).

$1 \text{ дБ} = 20 \lg(p_2/p_1)$, где p_2 — звуковое давление измеряемого звука, а p_1 — звуковое давление, соответствующее порогу слышимости. Болевой порог в таком случае составляет примерно 140 дБ. С небольшими оговорками уровень звука можно называть и просто громкостью. Громкость звука — субъективное качество слухового ощущения, позволяющее располагать все звуки по шкале от тихих до громких.

Понятно, что громкость звука должна быть связана с энергией, переносимой звуковой волной. Поэтому объективной характеристикой является интенсивность звуковой волны. Она определяется как энергия, переносимая волной за единицу времени через единичную площадь, и, как мы видели, пропорциональна амплитуде волны. Интенсивность обычно выражается в Вт/см² (или в Вт/м²).

Слух человека устроен так, что субъективно мы оцениваем громкость именно в логарифмическом масштабе: увеличение мощности сигнала в десять раз ощущается как увеличение громкости всего в два раза. Минимальное различие уровня двух сигналов, которое способен заметить человек, составляет 1 дБ.

По характеру колебательных движений звуки делятся на две группы — тоны и шумы. Если колебание совершается ритмично, т. е. через определенные

промежутки времени повторяются одинаковые фазы звуковой волны, то образующийся при этом звук воспринимается как музыкальный тон.

Простейший вид тона — гармоническое колебание, так называемый чистый тон. Примером чистого тона может служить звук камертона. Другую группу звуков составляют шумы. К шумам относят такие звуки, как скрип, стук, крик, гул, шорох и т. п. Шумы представляют собой совокупность беспорядочных (хаотических) колебаний, не связанных между собой какой-либо правильной числовой зависимостью, которая характерна для гармонических колебаний, входящих в состав музыкальных звуков.

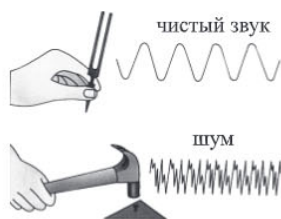


Рис. 16.28. Чистый звук камертона и шум от удара молотком

Наряду с высотой, громкостью и длительностью, как установил в 1837 году Ч. Уитстон, создатель инструмента концертино, есть еще одна его характеристика — тембр звука. Он определяется относительной интенсивностью звука. Тембр придает те особенности музыкальных звуков, которые дают музыкальным инструментам и голосам их неповторимую специфику, даже если сравнивать звуки одинаковой высоты и громкости. Тембр зависит от частотного спектра звука и его изменения во времени. Он определяет качество звука, это один из признаков музыкального звука. Качество звука помогает отличать звуки одного инструмента от другого. Оно определяется наличием обертонов — их числом и относительными амплитудами.

Волновые эффекты, связанные со звуком. Для звуковых волн также имеют место явления, рассмотренные для механических волн в предыдущей главе.

Отражение и прохождение звука. Когда звуковая волна, движущаяся в одной среде, падает на границу раздела с другой средой, одновременно могут происходить три процесса. Волна может отражаться от поверхности раздела, она может проходить в другую среду без изменения направления (рис. 16.29) или изменять направление на границе, т. е. преломляться.

Когда плоская звуковая волна падает под углом на границу раздела сред, угол ее отражения равен углу падения. Прошедшая же волна отклоняется от направления падающей волны, если угол падения отличен от 90° . Такое изменение направления движения волны называется рефракцией.

Если звуковые волны, вызванные нашим собственным голосом или другим каким-либо источником звука, при своем распространении встречают препятствие (стену, отвесную скалу, лес), то они отражаются и могут достигнуть снова уха наблюдателя иногда значительно позже, чем при непосредственном своем распространении. Такой повторный звук, обусловленный отражением звуковых волн, и называется эхом.

Так как скорость распространения звука в одну секунду равна примерно (в зависимости от температуры) 333 м, то понятно, что если отражающая звук

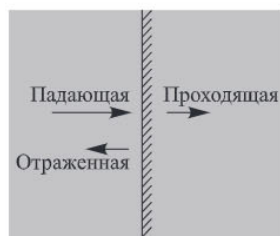


Рис. 16.29. Отражение и прохождение звука. На границе двух сред падающая волна может отражаться или проходить из одной среды в другую

стена находится от нас на таком именно расстоянии (333 м), то мы услышим повторение вызванного нами звука (слова или целой фразы) через две секунды. Отсюда понятно, что можно воспользоваться эхом и для самого определения скорости звука, для чего необходимо измерить расстояние и соответствующий промежуток времени. Такой способ определения скорости звука был применен на самом деле (см. Журн. Рус. физ.-хим. общ., 1895, Н. Гезехус).

Поглощение звука. Интенсивность звуковых волн в процессе их распространения всегда уменьшается вследствие того, что определенная часть акустической энергии рассеивается. В силу процессов теплообмена, межмолекулярного взаимодействия и внутреннего трения звуковые волны поглощаются в любой среде. Интенсивность поглощения зависит от частоты звуковой волны и от других факторов, таких как давление и температура среды. Поглощение волны в среде количественно характеризуется коэффициентом поглощения. Он показывает, насколько быстро уменьшается избыточное давление в зависимости от расстояния, проходимого распространяющейся волной. Поглощение звука, обусловленное как вязкостью, так и теплопроводностью, обычно увеличивается пропорционально квадрату частоты. Таким образом, звуки высоких частот поглощаются гораздо сильнее, чем низкочастотные. Поэтому для достижения большого звукопоглощения, в частности, необходима достаточная толщина звукопоглотителя (тем большая, чем ниже частота звука).

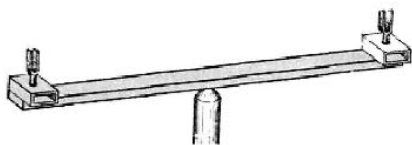


Рис. 16.30. К опыту с интерференцией звуковых волн

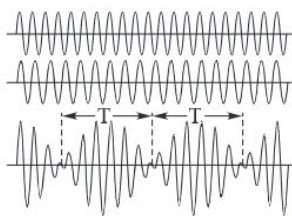


Рис. 16.31. Две волны, имеющие слегка отличающиеся частоты, дают усиление, пока разность фаз невелика

Интерференция звуковых волн. Для наблюдения интерференции звуковых волн можно поставить такой опыт. На планке, которую можно поворачивать вокруг вертикальной оси (рис. 16.30), укреплены два одинаковых камертона, звучащих в унисон. Если возбудить камертоны (например, смычком) и медленно поворачивать планку, то области усиления и ослабления звука будут перемещаться мимо наблюдателя, и он услышит, как поочередно сменяются звук большой громкости и почти полное его замирание. Опыт служит непосредственным подтверждением того, что звук — волновое явление.

Если два камертона обладают близкими, но не совпадающими точно частотами, то возникает эффект, называемый биениями. Причиной биений является интерференция звуковых волн, исходящих из двух источников. При этом уровень громкости звука последовательно то возрастает, то уменьшается.

По мере нарастания разности фаз результирующее смещение все уменьшается, но затем снова начинает нарастать по мере приближения разности фаз к 2π .

Явление биений возникает для любых волн и служит чувствительным методом сравнения частот колебаний. Биения звука можно слышать при настройке музыкальных инструментов, например струнных, по камертону. Если частота

струны незначительно отличается от частоты камертона, то слышно, что звук пульсирует, это и есть биения. Настройка частоты производится до тех пор, пока биения не перестанут прослушиваться. Даже если частота биений очень мала, человеческое ухо способно уловить периодическое нарастание и убывание громкости звука. Поэтому биения являются весьма чувствительным методом настройки в звуковом диапазоне. Струну для настройки в унисон с камертоном нужно подтягивать или ослаблять так, чтобы частота биений уменьшалась. При совпадении высоты звука с эталонным биения полностью исчезают.

Дифракция звуковых волн. При рассмотрении дифракции отмечалось, что степень огибания волной препятствия зависит от соотношения между длиной волны и размером препятствия или отверстия. Поскольку длина звуковой волны велика, дифракция звуковых волн вызывает меньше удивления, чем, скажем, дифракция световых волн (см. с. 243). Так, можно разговаривать с кем-то стоящим за углом здания, хотя он и не виден. Звуковая волна с легкостью огибает угол, тогда как свет из-за малости своей длины волны дает резкие тени.

Эффект Доплера. Эффект Доплера легко наблюдать на практике, когда мимо наблюдателя проезжает машина с включенной сиреной. Предположим, сирена выдает какой-то определенный тон и он не меняется. Когда машина не движется относительно наблюдателя, тогда он слышит именно тот тон, который издает сирена. Но если машина будет приближаться к наблюдателю, то частота звуковых волн увеличится (а длина уменьшится) и наблюдатель услышит более высокий тон, чем на самом деле издает сирена. В тот момент, когда машина будет проезжать мимо наблюдателя, он услышит тот самый тон, который на самом деле издает сирена. А когда машина проедет дальше и будет уже отдаляться, а не приближаться, то наблюдатель услышит более низкий тон вследствие меньшей частоты (и, соответственно, большей длины) звуковых волн. Таким образом, *эффект Доплера — это изменение воспринимаемой частоты колебаний, обусловленное движением источника или приемника волн либо и того и другого.*



Рис. 16.32. Иллюстрация эффекта Доплера

Свой эффект Доплер (1803–1853) вывел на основании волновой теории в 1842 году. Три года спустя, в 1845 году, голландский метеоролог Христофор Бейс-Баллот (1817–1890) решил проверить гипотезу Доплера. Он нанял паровоз с грузовой платформой, посадил на платформу двух трубачей и попросил их держать ноту соль (два трубача были нужны для того, чтобы один из них мог набирать воздух, пока другой тянет ноту, и, таким образом, звук не прерывался). На перроне одного полустанка между Утрехтом и Амстердамом метеоролог разместил нескольких музыкантов без инструментов, но с абсолютным музыкальным слухом. После чего паровоз стал с разной скоростью таскать платформу с трубачами мимо перрона со слушателями, а те отмечали, какую ноту слышат. Потом наблюдателей заставили ездить, а трубачи играли, стоя на перроне. Опыты продолжались два дня, в результате стало ясно, что Доплер прав. (Подробнее см.: Десять самых странных опытов в истории науки // Наука и жизнь, № 5, 2010.)



Рис. 16.33. От голландского музыкально-железнодорожного эксперимента по проверке эффекта Доплера не осталось почти ничего, за исключением этой фотографии. Несмотря на шум и тряску паровоза «Шарп Робертс Геркулес», разогнавшегося более чем до 70 км/ч, проверка прошла успешно (Витковски Н. Сентиментальная история науки. М.: КоЛибри, 2007)

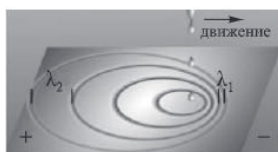


Рис. 16.34. Схематичная картина эффекта Доплера, возникающая при движении источника волн (падающих капель)

Рассмотрим систему отсчета, в которой воздух покоится, наблюдатель стоит на месте. Если источник звука движется со скоростью $v_{\text{ист}}$, меньшей скорости звука v , то за период колебаний $T = 1/f$ гребень волны пройдет расстояние $S = vT$ (v не зависит от движения источника). За это время источник звука переместится на расстояние $S_{\text{ист}} = v_{\text{ист}}T$ (см. рис. 16.34). Расстояние между последовательными гребнями волн, равное половине новой длины волны, $\lambda_1 = S - S_{\text{ист}} = (v - v_{\text{ист}})T$. Отсюда имеем $f_1 = v/\lambda_1 = [(v/(v - v_{\text{ист}}))]f$ или $f_1 = [1/(1 - v/v_{\text{ист}})]f_2$. Если источник удаляется,

то для наблюдателя новая частота звука, которую он будет воспринимать, равна $f_2 = [1/(1 + v/v_{\text{ист}})]f_1$.

Эффект Доплера нашел широкое применение в науке и технике, медицине. Так, доплерография проводится при появлении признаков нарушения кровоснабжения мозга (обмороки, головокружения, шаткость походки, изменения слуха, зрения, обоняния).

Обычный полицейский радар использует в своей работе этот эффект. Радар состоит из двух основных компонентов: излучатель радиосигнала и приемник сигнала. Если направить прибор на движущуюся цель и включить его, он начнет посылать радиоволны в направлении цели, а затем улавливать отраженные волны. Только в отличие от радаров, используемых в армии, полицейский радар фиксирует не задержку отраженного сигнала (зная задержку и скорость распространения сигнала в воздухе, легко измерить расстояние), а изменение частоты у отраженного сигнала, и по этому изменению он может вычислить скорость цели.

Мы еще поговорим о применении эффекта Доплера в астрофизике, где он привел к замечательным открытиям. На этом закончим рассмотрение звуковых волн.

А сейчас в нашем путешествии мы подошли к изучению самого «темного» места в физике — света. И здесь нам пригодятся сведения, которые мы получили ранее, в путешествии по колебаниям и волновым процессам.

Солнечный свет, свет звезд, свет от лучины и костра, тень и многое другое, связанное со светом, было интересно человеку с самых древних времен. Основным вопросом, интересовавшим людей, был вопрос практический — вопрос об освещенности. Дневной свет, называемый естественным, не был единственным источником. Помимо него люди широко пользуются и другим, так называемым искусственным светом: свечи, электрические лампы, керосиновые и газовые горелки и т. п. Разнообразие источников света огромно.

Свет давно привлекал внимание ученых, они стремились выяснить его природу и свойства. Варка прозрачного стекла была известна древним египтянам и жителям Месопотамии за 1600 лет до нашей эры. Первые представления о природе света были заложены в глубокой древности. Греческий философ Платон (427–327 гг. до н. э.) создал одну из первых теорий света.

Примерно в 300 году до н. э. Евклидом был написан труд «Оптика», дошедший до наших дней, в котором были исследованы свойства света. Евклид утверждал, что свет распространяется по прямой линии, он изучал законы отражения света и описал их математически. То же утверждал и Аристотель, впервые объяснивший сущность зрения. Евклид выразил сомнение в том, что зрение является следствием исхождения луча из глаза, задаваясь вопросом о том, как человек, открыв в ночное время глаза, устремленные в небо, может моментально увидеть звезды. Проблема решалась, только если скорость луча света, исходящего из человеческого глаза, была бесконечно большой. В 55 году до н. э. римский писатель Лукреций Кар, продолживший идеи ранних греческих философов-атомистов, в своем сочинении «О природе вещей» писал, что свет и тепло солнца состоят из мельчайших движущихся частиц. Однако общего признания взгляды Лукреция на природу света не получили. Несмотря на то что теоретические положения древних философов, а позднее и ученых средних веков были недостаточными и противоречивыми, они способствовали формированию правильных взглядов на сущность световых явлений и положили начало дальнейшему развитию теории света и созданию разнообразных оптических приборов. По мере накопления новых исследований о свойствах световых явлений изменилась точка зрения на природу света.

Самое «темное» место в физике

Удивительная область физики — свет. Скорость света огромна, но не бесконечна. Очевидные явления и неочевидные объяснения. Среди физиков нет согласия. Широкое распространение различных оптических приборов. Человек изучает состав звездного вещества на Земле.

17. *Свет — самое «темное» место в физике. Световые лучи. Определение скорости света. Законы Снелла. Явление полного внутреннего отражения. Что увидели физики в зеркалах.*

Ученые считают, что историю изучения природы света следует начинать с XVII века. Именно с этого времени проявляется большой интерес к световым измерениям. Семнадцатый век открыл многие важные свойства света, тогда были созданы разные оптические приборы, которые в усовершенствованном виде используются и в настоящее время. И все последующее время ознаменовалось чередой фундаментальных открытий, о которых будет рассказано в этой и последующих главах. Однако ответить на вопрос о том, что же такое свет, ученые смогли лишь относительно недавно, фактически в прошлом веке.

Световые лучи. Прямолинейное распространение света — факт, установленный еще в глубокой древности. Понятие светового луча давным-давно пришло к нам из повседневной жизни. Это и наблюдения за тенями и небесными светилами, и освоение художниками и строителями метода перспективы, и измерения земельных участков. Фактически о положении окружающих нас предметов в пространстве мы судим, подразумевая, что свет от объекта попадает в наш глаз по прямолинейным траекториям. Наша ориентация во внешнем мире целиком основана на предположении о прямолинейном распространении света. Предположение о прямолинейном распространении света привело к понятию о световых лучах. Световой луч — прямая линия, и светящаяся точка — начало этой линии. *Световой луч — это траектория, по которой распространяется свет.* Изображая распространение света на чертежах, световые пучки обычно заменяют лучами. Таким образом, луч является геометрической моделью физического понятия «пучок света». До второй половины XVII века оптика представляла собой, по существу, один из разделов геометрии. Прямолинейностью распространения света в однородной среде объясняется образование тени. Тени людей, деревьев, зданий и других предметов хорошо наблюдаются на Земле в солнечный день.

При освещении предмета точечным источником получается резкая тень (рис. 17.1), вид которой подобен форме некоторого сечения предмета, параллельного плоскости экрана; размеры же тени определяются взаимным расположением источника, предмета и экрана в полном соответствии с проецированием при помощи прямых линий.

Чаще всего видимый предмет отражает падающий на него свет (от Солнца или различных рукотворных источников света). Наши глаза — орган зрения. При помощи них мы воспринимаем свет и благодаря этому «видим» окружающий нас мир. Световые лучи, проникая через зрачок внутрь глаза, оказывают определенное действие на чувствительные окончания нервов, которыми заполнена задняя сторона глаза. Это воздействие по нервам передается в мозг, где отдельные возбуждения складываются в целую картину того, что находится перед нашими глазами.

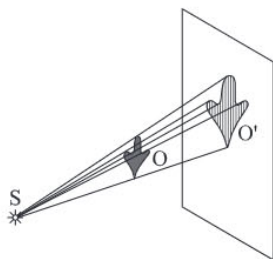


Рис. 17.1. При освещении точечным источником света S плоского объекта O , параллельного экрану, на экране появляется резкая, подобная этому объекту, тень O'

Скорость света. Первым, кто получил оценку скорости света, был датчанин Олаф Ремер (1644–1710). Он воспользовался открытием Галилея лун (спутников) Юпитера, которое давало теоретическую возможность использовать моменты затмения этих лун для регистрации времени прихода светового сигнала.

С точки зрения задачи определения долгот наиболее интересным оказался первый спутник — Ио. Период его обращения вокруг Юпитера составляет около 42,5 часа; периодически спутник Ио, как и другие спутники, заходит в тень планеты и перестает быть видимым с Земли — наступает его затмение. В 1672 году астроном Жан Доминик Кассини (1625–1712) предпринял систематическое исследование спутников Юпитера. Он заметил определенные запаздывания в моментах вхождения первого спутника в конус тени планеты и выхода из нее, как если бы время обращения спутника вокруг Юпитера было больше, когда он находится дальше от Земли. А поскольку представлялось невероятным, чтобы время обращения спутников Юпитера зависело от расстояния до Земли, то этот астрономический факт представлялся необъяснимым. Вот этот факт и использовал О. Ремер.

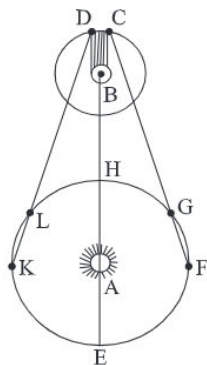


Рис. 17.2. Схема, иллюстрирующая расчеты Ремера

На рис. 17.2 A — Солнце, B — Юпитер, C — первый спутник Юпитера, который входит в тень планеты, чтобы выйти из нее в точке D , а E, F, G, H, L, K — положения Земли на различных расстояниях.

Предположим, что с Земли, находящейся в L , вблизи второй квадратуры Юпитера (квадратура — расположение Юпитера, Земли и Солнца по прямому углом, см. с. 30) виден его первый спутник во время выступления из тени в точке D , и затем спустя примерно 42,5 часа, то есть после одного оборота этого спутника, когда Земля находится в точке K , он виден вновь возвращающимся в точку D . Так как свету требуется время, чтобы пройти расстояние LK , то спутник будет виден возвратившимся в точку D позже, чем если бы Земля оставалась в точке L . Таким образом, обращения этого спутника, наблюдаемые так по выступлениям из тени, будут запаздывать на такое время, которое требуется свету, чтобы пройти от L до K и наоборот; в другой квадратуре FG , где Земля прибли-

жается, идя навстречу свету, обращения, наблюдаемые по вступлению в тень, будут казаться настолько же укороченными, насколько обращения, наблюдавшиеся по выступлению из тени, казались удлиненными. И поскольку за 42,5 часа, которые этот спутник тратит, чтобы совершить приблизительно одно обращение, расстояние между Землей и Юпитером в той или иной квадратуре изменится по меньшей мере на 210 диаметров Земли, то отсюда следует, что если бы для прохождения каждого диаметра Земли требовалась 1 с, то свету потребовалось бы 3,5 минуты для прохождения каждого интервала FG, KL, что приведет к разнице примерно в половину четверти часа между двумя обращениями первого спутника, из которых одно наблюдается в FG, а другое — в KL, в то время как никакой ощутимой разницы не отмечается. Однако из этого не вытекает, что свету совсем не требуется времени: ибо после более тщательного изучения вещей он обнаружил, что незаметное для двух обращений становится весьма значительным для многих обращений, взятых вместе, и что, например, 40 оборотов, наблюдаемых со стороны точки F, были бы заметно короче, чем 40 других, наблюдаемых с противоположной стороны, в каком бы месте зодиака ни оказался Юпитер. По этой причине необходимо 22 минуты для прохождения интервала HE, который является удвоенным расстоянием от нас до Солнца. Олаф Ремер в результате наблюдения спутников Юпитера сделал вывод о конечности скорости распространения света и по данным наблюдений впервые определил ее величину — 214 000 км/с (современное значение равно $3,0 \cdot 10^5$ км/с) (УИФ).

Скорость света была первой фундаментальной постоянной, вошедшей в арсенал физических констант.

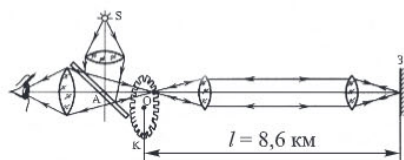


Рис. 17.3. Схема опыта Физо

В 1849 году французский физик Ипполит Физо предложил новый способ определения скорости света — с помощью быстро вращающегося зубчатого колеса. Этот способ описан во многих учебниках физики. Схема опыта Физо показана на рис. 17.3. Здесь свет от источника S проходит через прерыватель К,

представляющий собой зубья вращающегося колеса, и, отразившись от зеркала З, возвращается назад к зубчатому колесу. Пусть зубец и прорезь зубчатого колеса имеют одинаковую ширину и при вращении место прорези на колесе занял соседний зубец. В окуляре станет темно (то есть в него не поступит свет), когда время прохождения света туда и обратно, $t_1 = 2l/c$ (c — скорость света), будет равно времени поворота зубчатого колеса на половину прорези: $t_2 = T/(2n)$. Здесь T — период вращения зубчатого колеса, n — число оборотов.

Приравняв время, $t_1 = t_2$, получим, что $c = 4nl/T$.

Так как скорость света огромна, чтобы получить измеряемый результат для расстояния между зубчатым колесом и зеркалом (l) пришлось брать километровые величины. Используя этот метод, Физо получил для скорости света $c = 3,13 \cdot 10^5$ км/с, что весьма близко к современному значению.

Скорость света оказалась, пожалуй, самой важной физической константой. Ее измерения, выполненные в конце девятнадцатого–начале двадцатого веков привели к переосмыслению основ классической физики. Об этом наш рассказ в части 32. Оказалось, что скорость света в веществе отлична от скорости в ва-

кууме. Это иллюстрируют данные, приведенные в таблице 14. В воздухе скорость света не намного меньше, чем в вакууме, но заметно меньше в различных прозрачных средах (см. таблицу 15).

Таблица 14. Скорость света в различных средах

Среда	v , км/с	Среда	v , км/с
Воздух	299 704	Кедровое масло	197 174
Лед	228 782	Кварц	194 613
Вода	225 341	Рубин	170 386
Стекло	199 803	Алмаз	123 845

Таблица 15

Вещество	Показатель преломления относительно воздуха
Вода (при 20 °C)	1,33
Кедровое масло (при 20 °C)	1,52
Сероуглерод (при 20 °C)	1,63
Лед	1,31
Каменная соль	1,54
Кварц	1,54
Рубин	1,76
Алмаз	2,42
Различные сорта стекла	от 1,47 до 2,04

Отношение скорости света (c) в вакууме к скорости света в данной среде (v) называется показателем преломления этой среды: $n = c/v$. Данные в таблице относятся к желтому цвету. Это замечание приводится потому, что показатель преломления несколько меняется для разных цветов (т. е. от длины волны света).

Преломление света. Закон Снелла. Между геометрическим лучом и лучом света есть принципиальное различие: геометрический луч прямолинеен всегда, а луч света — только в прозрачной однородной среде. Проведем опыт. В стеклянный аквариум нальем воды. Направим теперь внутрь аквариума луч света от маленького лазера. Мы обнаружим, что пока луч распространяется в воздухе, то есть в однородной среде, он прямолинеен. На границе раздела двух однородных сред луч преломляется.

Однако после выхода в однородную среду — воздух — луч света опять становится прямолинейным.

Преломление света на границе двух сред дает парадоксальный зрительный эффект, который можно наблюдать и в стакане с водой, и в бассейне. Стоя у бортика бассейна, можно видеть, как у вашего друга, стоящего по пояс в воде, ноги кажутся непропорционально короткими.

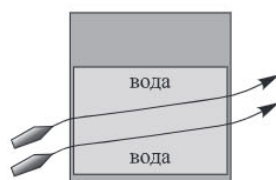


Рис. 17.4. Преломление света на границе воздуха и стенки аквариума



Рис. 17.5. Кажущееся преломление прямых предметов, косо пересекающих границу раздела сред с разной оптической плотностью (воздух–вода)

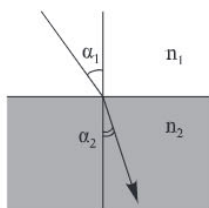


Рис. 17.6



Рис. 17.7. Взгляните на фото: на нем не две рыбы, а одна; сверху — зеркальное отражение от границы между водой и воздухом (Физика.ru)

Итак, опыт показывает, что если свет падает под углом к поверхности раздела двух сред (например, воздух–вода), отличным от прямого, то на границе световой луч изменяет свое направление (это называется преломлением света). Выше мы отмечали, что каждую из сред можно характеризовать определенным числом — показателем преломления. Он определяет собой преломляющие свойства среды. Примерно в 1611 году голландский математик и физик, профессор Лейденского университета Виллеброд Снелл (1580–1626) (известный также под латинизированным именем Снеллиус) экспериментально открыл простой закон преломления света. При жизни Снеллиуса он опубликован не был и впервые стал известен в 1637 году благодаря Рене Декарту. Смысл этого закона в том, что если известны коэффициенты преломления света в двух граничащих средах и угол падения луча, можно рассчитать, насколько отклонится луч после пересечения границы между средами. Угол падения света на поверхность связан с углом преломления соотношением

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2,$$

n_1 — показатель преломления среды, из которой свет падает на границу раздела; α_1 — угол падения света — угол между падающим на поверхность лучом и нормалью к поверхности; n_2 — показатель преломления среды, в которую свет попадает, пройдя границу раздела; α_2 — угол преломления света — угол между прошедшим через поверхность лучом и нормалью к поверхности.

Из закона Снелла следует, что если $n_2 > n_1$, т. е. коэффициент преломления второй среды больше, чем первой, то $\alpha_2 < \alpha_1$. Значит, в этом случае луч приближается к нормали.

Когда свет переходит из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления (например, из воды в воздух), то при определенном угле падения угол преломления достигает 90° . Такую ситуацию можно наблюдать, например, если смотреть из-под воды на ее поверхность: при определенных углах зрения наблюдается не внешняя часть (то, что в воздухе), а зеркальное отражение объектов, которые находятся в воде.

Впервые такое явление *полного внутреннего отражения* света описал в начале XVII века Иоганн Кеплер.

При определенном угле падения наступит момент, когда преломленный луч *пойдет вдоль границы раздела сред*, то есть угол преломления достигнет 90° (рис. 17.8).

Угол падения, соответствующий этому значению, называется предельным (критическим) углом полного внутреннего отражения — β . Значение угла β получим из закона Снелла: $\sin \beta = n_2/n_1$. Отсюда $\beta = \arcsin(n_2/n_1)$.

Если угол падения превышает угол β , то согласно закону Снелла $\sin \alpha_2$ становится больше единицы, что невозможно. При падении света на границу раздела под углом большим, чем предельный угол полного внутреннего отражения, преломления света наблюдаться не будет, свет будет только отражаться — луч 4 на рис. 17.8). В таблице 16 приведены значения угла β для некоторых веществ.

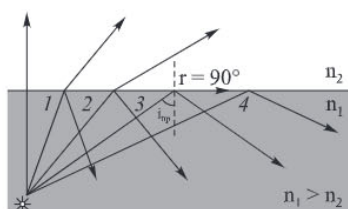


Рис. 17.8. Показано, как при увеличении угла падения при переходе света из оптически более плотной среды в менее плотную растет угол преломления

Таблица 16. Значения предельных углов полного внутреннего отражения β

Бензин	45°	Вода	49°	Стекло	30°–42°
Спирт	47°	Алмаз	24°	Лед	50°

Эти значения справедливы, если мы рассматриваем распространение света из названного вещества в воздух или вакуум. Значения будут иными, если на месте воздуха или вакуума будет другое вещество.

Явление полного внутреннего отражения используется во многих оптических приборах, например в биноклях, перископах. Перископ (от греч. *peri* — «вокруг» и греч. *scopo* — «смотреть») — оптический прибор для наблюдения из укрытия. Простейшая форма перископа — труба, на обоих концах которой закреплены зеркала, наклоненные относительно оси трубы на 45° для изменения хода световых лучей. В более сложных вариантах для отклонения лучей вместо зеркал используются призмы, а получаемое наблюдателем изображение увеличивается с помощью системы линз. Наиболее известные виды перископа — перископы на подводных лодках, ручные перископы и стереотрубы (их также можно использовать как перископ) — широко применяются в военном деле.



Рис. 17.9. Принципиальная схема перископа

Явление полного внутреннего отражения света лежит в основе *волоконной оптики* — раздела оптики, в котором рассматривается передача света и изображения по световодам. Дорогу оптоволоконной оптике положило открытие, сделанное в середине XX века китайским, британским и американским инженером-физиком Чарльзом Као. Ему удалось разработать метод производства сверхчистого оптического волокна, благодаря чему сигналы стало возможным передавать без искажений на расстояние до 100 км! В 2009 году ему присуждена Нобелевская премия по физике.

Волоконный световод представляет собой тонкую нить из оптически прозрачного материала, оболочка которой имеет больший показатель преломления, чем сердцевина. Лучи, попавшие в световод под достаточно малыми углами

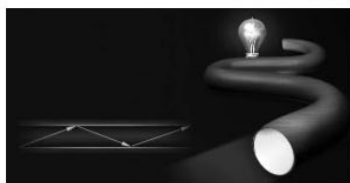


Рис. 17.10. Ход лучей света в световоде

к его оси, испытывают полное внутреннее отражение на поверхности раздела сердцевины и оболочки.

Как правило, отдельные волокна объединяют в пучки с регулярной укладкой.

Если луч попадает в световод, то из-за постоянного отражения от наружного слоя луч без потерь дойдет до конца кабеля. Однако при сильном изгибе волокна закон полного внутреннего отражения нарушается и свет частично выходит из волокна через боковую поверхность.

Оптоволоконная оптика используется в телевидении и интернет-связи. В медицине световоды используют для освещения светом внутренних полостей и для передачи изображения (например, в таком широко известном методе обследования, как гастродентероскопия).

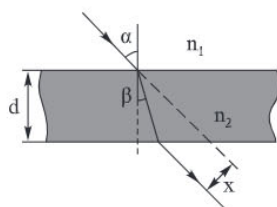


Рис. 17.11. Прохождение света через стеклянную пластинку

Прохождение света через плоскопараллельную пластинку. При прохождении света через плоскопараллельную пластину свет дважды на своем пути претерпевает преломление. При этом направление прошедшего луча света совпадает с направлением падающего, однако луч смещается параллельно самому себе. Расстояние x , измеренное в направлении, перпендикулярном лучу, носит название смещения луча (рис. 17.11). Оно пропорционально толщине пластинки d и зависит от ее показателя преломления.

Величину x можно вычислить по формуле

$$x = d(\sin \alpha - \operatorname{tg} \beta \cos \alpha).$$

С открытием закона Снеллиуса оптика стала неразрывной частью геометрии, что будет наглядно продемонстрировано далее.

Отражение света. Изображение в плоском и сферическом зеркалах.

Зеркала появились в глубокой древности. Археологи обнаружили первые небольшие зеркала из серебра, меди или бронзы, относящиеся к бронзовому веку. Распространены они были преимущественно в странах Древнего Востока. Позже научились делать зеркала из стекла, нанося на тыльную сторону стеклянной пластинки тонкий слой серебра, золота или олова. Наибольшую известность получили знаменитые венецианские зеркала, которые стоили столь дорого, что для их покупки французские аристократы иногда были вынуждены продавать целые имения.

Но зеркала не только предмет быта, в физике это еще объект изучения различных оптических явлений и элемент многих физических приборов.

Вообще, отражают свет любые поверхности, не только гладкие, как зеркала. Все несветящиеся тела, освещаемые каким-нибудь источником, становятся видимыми только благодаря рассеиваемому ими свету. Именно благодаря этому мы видим все тела. Различные тела способны по-разному отражать свет. Чем светлее

кажется нам предмет, тем больше света он отражает. Поверхности, которые поглощают большую часть света, выглядят темными или черными. Впервые закон отражения упоминается в «Катоптрике» Евклида, датированной примерно 300 до н. э. Рассмотрим этот закон.

На поверхность раздела двух сред MN из точки S падает луч света, направление которого задано лучом SO (рис. 17.12). Направление отраженного луча показано лучом OB. SO — падающий луч, OB — отраженный. Из точки падения луча O проведен перпендикуляр OC к поверхности MN. Угол SOC, образованный падающим лучом SO и перпендикуляром OC, называется углом падения. Угол COB, образованный тем же перпендикуляром OC и отраженным лучом, называется углом отражения (всё, как рассмотрено выше).

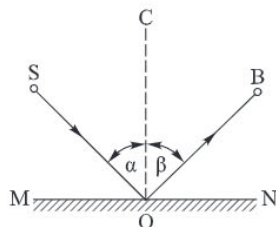


Рис. 17.12

При изменении угла падения луча будет меняться и угол отражения. Это явление удобно наблюдать на специальном приборе. Прибор представляет собой диск на подставке. На диске нанесена круговая шкала с ценой деления 10° и проведены два перпендикулярных друг к другу диаметра: 0–0 и 90–90. По краю диска можно передвигать осветитель, дающий узкий пучок света. Установим плоское зеркало на диске так, как показано на рис. 17.13. Если пучок света падает на зеркало под углом 40° , то под таким же углом он и отражается от зеркала. Передвигая осветитель по краю диска, будем менять угол падения луча и каждый раз отмечать соответствующий ему угол отражения. Мы обнаружим, что во всех случаях угол отражения равен углу падения луча ($\alpha = \beta$).

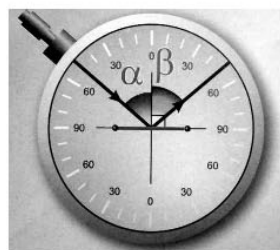


Рис. 17.13

При этом отраженный и падающий лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным к зеркалу в точке падения луча. Таким образом, отражение света происходит по следующим законам.

1. Луч падения, луч отражения и перпендикуляр к границе раздела двух сред, поставленный в точку падения луча, лежат в одной плоскости.

2. Угол падения равен углу отражения.

3. Падающий и отраженный лучи могут меняться местами, т. е. обратимы (т. е. если луч падает на зеркало в направлении BO (рис. 17.12), то отраженный луч пойдет в направлении OS).

Сказанное выше иллюстрирует изложенные выше законы Снелла.

Большинство тел лишь отражают падающее на них излучение, не являясь при этом источником света. Освещенные предметы видны со всех сторон, так как от их поверхности свет отражается в разных направлениях, рассеиваясь. Это явление называется диффузным отражением или рассеянным отражением.

Диффузное отражение света (рис. 17.14) происходит от всех шероховатых поверхно-

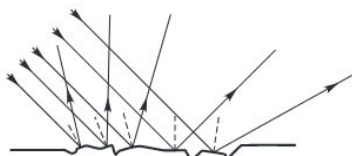


Рис. 17.14. Диффузное отражение света от шероховатой поверхности

стей. Для определения хода отраженного луча такой поверхности в точке падения луча проводится плоскость, касательная к поверхности, и по отношению к этой плоскости строятся углы падения и отражения.

Различные тела способны по-разному отражать свет. Например, кусок белого картона, отражая свет, рассеивает его. Темный матовый материал не рассеивает свет, а, наоборот, поглощает его. Так, бархат глубокого черного цвета полностью поглощает свет.

Зеркало или фольга отражают свет лучше, чем другие предметы.

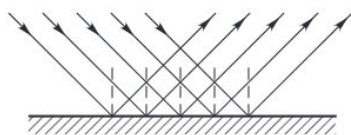


Рис. 17.15. Отражение от зеркальной поверхности

Например, от посеребренного зеркала может отражаться более 95 % падающего света. 85 % белого света отражается от поверхности снега, 75 % — от белой бумаги, 0,5 % — от бархата глубокого черного цвета. Диффузное отражение света не вызывает неприятных ощущений в глазу человека в отличие от зеркального. Зеркальное отражение света происходит в случае, когда падающие на гладкую поверхность под определенным углом лучи света отражаются преимущественно в одном направлении (рис. 17.15).

Отражающая поверхность в этом случае называется зеркалом (или зеркальной поверхностью) (рис. 17.15). Зеркальные поверхности можно считать оптически гладкими, если размеры неровностей и неоднородностей на них не превышают длины световой волны (меньше 1 мкм). Для таких поверхностей выполняется закон отражения света.

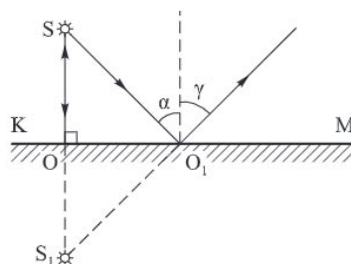


Рис. 17.16. Изображение, возникающее с помощью плоского зеркала

1. Плоское зеркало. Плоское зеркало — это простейшее оптическое устройство, способное создавать изображение предмета. Изображение предмета, даваемое плоским зеркалом, формируется за счет лучей, отраженных от плоской зеркальной поверхности. Плоское зеркало дает возможность видеть предметы, находящиеся перед ним. В геометрической оптике каждая точка источника света S считается центром расходящегося пучка лучей (рис. 17.16). Если свет, рассеянный поверхностями различных тел, попадает на плоское зеркало, а затем, отражаясь от него, падает в глаз наблюдателя, то в зеркале видны изображения этих тел.

Изображение S_1 называется мнимым, если в точке пересечения не сами отраженные (преломленные) лучи, а их продолжения. Световая энергия в эту точку не поступает. На рис. 17.16 представлено изображение светящейся точки S , возникающее с помощью плоского зеркала.

Луч SO падает на зеркало KM под углом 0° , следовательно, угол отражения равен 0° , и данный луч после отражения идет по пути OS . Из всего множества попадающих из точки S лучей на плоское зеркало выделим луч SO_1 . Луч SO_1 падает на зеркало под углом α и отражается под углом γ ($\alpha = \gamma$). Если продолжить отраженные лучи за зеркало, то они сойдутся в точке S_1 , которая является мнимым изображением точки S в плоском зеркале. Таким образом, человеку кажется,

что лучи выходят из точки S_1 , хотя на самом деле лучей, выходящих из этой точки и попадающих в глаз, не существует. Изображение точки S_1 расположено симметрично самой светящейся точке S относительно зеркала KM .

Для того чтобы найти изображение предмета AB в плоском зеркале, достаточно опустить перпендикуляры из крайних точек предмета на зеркало и, продолжив их за пределы зеркала, отложить за ним расстояние, равное расстоянию от зеркала до крайней точки предмета (рис. 17.17). Это изображение будет мнимым и в натуральную величину. Размеры и взаимное расположение предметов сохраняются, но при этом в зеркале левая и правая стороны у изображения меняются местами по сравнению с самим предметом. Параллельность падающих на плоское зеркало световых лучей после отражения также не нарушается.

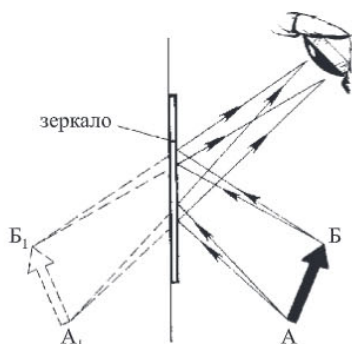


Рис. 17.17. Построение изображения предмета в плоском зеркале

Мнимое изображение в плоском зеркале всегда прямое, но повернутое к предмету, так сказать лицом к лицу. Глядя на плоское зеркало, мы не смотрим на предмет, находящийся перед зеркалом, поэтому свет от предмета непосредственно не попадает в глаза, а попадает лишь после отражения от зеркала. Свет, отраженный от зеркала, распространяется прямолинейно, и благодаря зрительной привычке нам кажется, что мы видим предмет по прямолинейному направлению, а именно за зеркалом, где его на самом деле нет.

Посмотрим на циферблат часов с римскими цифрами в зеркале. У вас таких часов никогда не бывало: расположение и начертание цифр на них необычное; например, цифра восемь изображена так, как ее нигде не изображают — ПХ, и помещена на месте двенадцати; двенадцати же нет совсем; после шести следует пять и т. д.; кроме того, движение стрелок на часах вашего двойника обратно обычному.



Рис. 17.18

Человечество издревле считало зеркала магическими предметами. Девушки высматривали в них суженого, маги узнавали будущее. Зеркала носили как амулеты на груди. Немало сказок связано с зазеркальем, миром по ту сторону зеркала.

2. *Сферическое зеркало.* В технике часто применяют зеркала со сложной кривой отражающей поверхностью, например сферические зеркала.

Сферическое зеркало — это поверхность тела, имеющая форму сферического сегмента и зеркально отражающая свет.

Параллельность лучей при отражении от таких поверхностей нарушается. Зеркало называют вогнутым (а), если лучи отражаются от внутренней поверхности сферического сегмента. Параллельные световые лучи после отражения от такой поверхности собираются в одну точку, поэтому вогнутое зеркало называют собирающим. Если лучи отражаются от наружной поверхности зеркала, то оно будет выпуклым (б). Параллельные световые лучи рассеиваются в разные стороны, поэтому выпуклое зеркало называют рассеивающим (рис. 17.19).

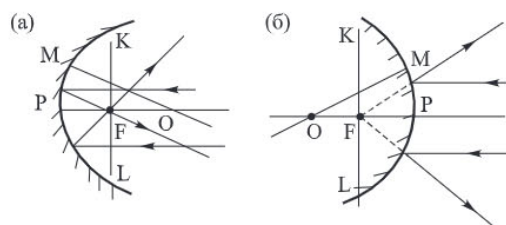


Рис. 17.19. Вогнутое (а) и выпуклое (б) сферические зеркала

Геометрический центр O сферической поверхности зеркала радиусом R называется центром зеркала, а точка P , являющаяся вершиной сферического сегмента, — полюсом зеркала. Любая прямая (например, OM и OP), проходящая через центр O зеркала, называется оптической осью. Оптическая ось OP , проходящая через полюс зеркала, называется главной оптической осью, все остальные оси — побочными оптическими осями. Ясно, что любая оптическая ось в точке пересечения с поверхностью зеркала является нормалью к последней (любой радиус перпендикулярен к касательной к поверхности сферы). Точка F на главной оптической оси, через которую проходят после отражения от зеркала лучи (или их продолжения), падающие на зеркало параллельно главной оптической оси, называется фокусом зеркала. У вогнутого зеркала фокус действительный, у выпуклого зеркала фокус мнимый. Расстояние от фокуса сферического зеркала до его полюса PF называется фокусным расстоянием. Его принято обозначать также буквой F . Плоскость KL , проходящая через фокус перпендикулярно к главной оптической оси, называется фокальной плоскостью. В фокальной плоскости пересекаются после отражения от зеркала лучи (или их продолжения), падающие на зеркало параллельно какой-либо побочной оптической оси.

Утверждение о том, что все лучи проходят через точку F , выполняется лишь приближенно. Поэтому изображение является расплывчатым. Этот эффект сферических зеркал называется сферической аберрацией.

Линейное увеличение сферических зеркал. Увеличением зеркала m называется отношение высоты изображения к высоте объекта (рис. 17.20).

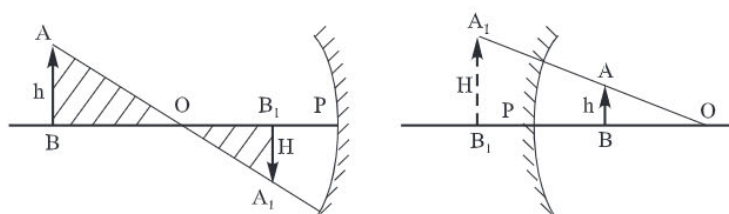


Рис. 17.20. К выводу формулы для m

$A_1P = a$ — расстояние от полюса зеркала до изображения.

$AP = b$ — расстояние от полюса зеркала до предмета.

$A_1B_1 = H$ — линейный размер изображения.

$AB = h$ — линейный размер предмета.

Из подобия треугольников AOB и A_1OB_1 видим, что $b/a = H/h$. Это отношение показывает, во сколько раз отличаются размеры изображения и предмета. С точки зрения геометрии это есть коэффициент подобия, но этот коэффициент подобия имеет и физический смысл и называется линейным увеличением.

$$m = H/h = b/a.$$

Если $m > 1$, то изображение увеличенное; когда $m < 1$ — то уменьшенное. Если $m = 1$, тогда изображение равно по размеру предмету. Это имеет место только для вогнутого зеркала, когда предмет находится в оптическом центре. Нетрудно видеть, что если объект расположен к зеркалу ближе фокальной плоскости, то изображение будет мнимым, прямым и увеличенным. В этом можно убедиться, приближая лицо к зеркалу до тех пор, пока оно не окажется ближе фокальной точки. Тогда-то мы и видим свое прямое увеличенное изображение. Заметим, что в соответствии с соглашением высота объекта и высота изображения считаются положительными или отрицательными, в зависимости от того, находится объект и изображение соответственно выше или ниже главной оси.

Выше мы рассмотрели вогнутые зеркала. Проведенный анализ применим и к выпуклым зеркалам. И здесь имеет место сферическая аберрация, но мы предполагаем, что размеры зеркала малы по сравнению с его радиусом кривизны. В выпуклом зеркале отраженные лучи расходятся, но наблюдателю кажется, что они расходятся из точки f , позади зеркала. У выпуклого зеркала фокус мнимый. Фокусное расстояние выпуклого зеркала принято считать отрицательным.

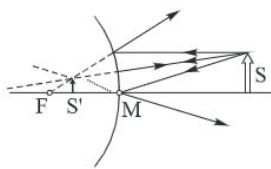


Рис. 17.21. Изображение предмета в выпуклом зеркале

Замечание. Соглашение о знаках в случае вогнутых и выпуклых зеркал. Если объект, изображение или фокальная точка находятся с отражающей стороны зеркала, то расстояние до объекта, расстояние до изображения и фокусное расстояние следует считать положительными. Если же объект, изображение или фокальная точка окажутся за зеркалом, то соответствующее расстояние следует считать положительными.

В наше время вогнутые зеркала чаще используются для освещения. В карманном электрическом фонарике стоит крошечная лампочка всего в несколько свечей. Если бы она посылая свои лучи во все стороны, то от такого фонарика было бы мало пользы: его свет не проникал бы дальше одного-двух метров. Но за лампочкой поставлено маленькое вогнутое зеркальце, а спереди — линза (линза — деталь из оптически прозрачного однородного материала, ограниченная двумя полированными преломляющими поверхностями вращения, например сферическими или плоской и сферической). Зеркальце и линза помогают друг другу создавать направленный луч света.

Так же устроены и автомобильные фары и прожекторы, рефлектор синей медицинской лампы, фонарь маяка и многочисленные оптические приборы, вооружившие глаз человека и давшие возможность увидеть доселе неизвестные миры.

Линзы и другие оптические приборы. На протяжении всей истории естествознания оптика находилась в центре внимания ученых, а оптические приборы всегда играли важнейшую роль в развитии науки, техники и культуры. Использование «приборов» в виде увеличительного стекла было известно еще в глубо-

кой древности. Материалом для их изготовления были прозрачные кристаллы минералов. В Древней Ассирии и Вавилоне они изготавливались из горного хрусталя, а в Древнем Китае — из темно-зеленого турмалина и темно-коричневого топаза. Среди других большая, хорошо сохранившаяся плоско-выпуклая линза из горного хрусталя диаметром 55 мм в оправе, изготовленная 2500 лет до нашей эры, была обнаружена Г. Шлиманом в 1890 году при его знаменитых раскопках Трои.



Рис. 17.22. Иллюстрация, на которой Архимед поджигает римские корабли перед Сиракузами, используя параболические зеркала (Wikimedia Commons)

У каждого оптического прибора со временем появляется своя история. Проста история появления линзы. Люди заметили способность сосуда с водой искажать и увеличивать предметы. Такой сосуд стал прототипом всем сейчас известной выпуклой линзы. Линзы были известны многим цивилизациям, включая римскую, греческую, эллиническую и исламскую. Тем не менее, согласно доступным фактам, они не использовались для увеличения, но применялись для разведения огня путем концентрации солнечных лучей на фокусе линзы, отсюда они получили название «воспламеняющие зеркала». Вогнутая линза прочно вошла в историю благодаря тому, что известный всем Архимед применил вогнутые зеркала для того, чтобы сжечь флот противников у родных Сиракуз. Архимед соорудил вогнутую линзу из полированных бронзовых щитов и сфокусировал ее таким образом, чтобы солнечные лучи, отражаясь, попали на корабли римлян.

Итогом этого стало то, что в течение нескольких минут весь римский флот превратился в пылающие остатки. Вероятно, это всего лишь легенда, но важен факт — люди увидели возможность таких линз фокусировать световую энергию.

Стоит отметить, что попытки реконструировать «зажигательную машину» Архимеда ведутся давно. Еще в XVIII веке французский естествоиспытатель Ж. Л. Бюффон при помощи зеркала, составленного из многих небольших полосок, каждая из которых направляла «зайчик» в одну точку, зажег дерево с расстояния 50 м. Уже в наше время, в 1973 году, греческий ученый Иоанис Сакас решил провести эксперимент и повторить подвиг Архимеда. Он выстроил вдоль одной линии семьдесят моряков с покрытыми бронзой зеркалами размером метр на полтора и направил лучи зеркал на деревянное судно. На расстоянии пятидесяти метров судно вспыхнуло через три минуты. Значит, в принципе такой способ мог быть применен Архимедом. Хотя справедливости ради следует заметить, что эксперимент не был проведен достаточно чисто, ведь медные щиты древнегреческих воинов были не плоскими, а сферическими.

Применению линз на практике предшествовало появление оптических деталей из силикатного технического стекла, а затем и оптического. Первые линзы из технического стекла были обнаружены при раскопках Геркуланума и Помпеи (начало нашей эры). До XVI века оптические детали делались из технического стекла.

Еще в XIII веке монополисты-венецианцы придумали вставлять отшлифованные линзы в красивые деревянные или металлические оправы. На протяжении

сотни лет этот модный аксессуар носили венецианские франты, и лишь спустя век осознали, что такой прибор может компенсировать недостатки зрения. Но лишь начиная с периода книгопечатания люди ощутили потребность в таком устройстве.

Зрительная труба со временем стала главным атрибутом мореплавателей. Первое достоверное описание способности линз создавать увеличенное изображение предмета мы находим в трудах монаха францисканского ордена Роджера Бэкона (1214–1294), выпускника Оксфордского университета, одного из замечательных ученых и мыслителей XIII века. «Удивительный доктор», как называли Бэкона современники, соединил в своем устройстве выпуклые линзы и вогнутые зеркала, теоретически обосновав возможность многократного увеличения. По стопам Роджера Бэкона пошел Леонардо да Винчи, сделавший в 1509 году рисунок двухлинзовой подзорной трубы. Но лишь знаменитый Галилей, первым направив зрительную трубу в просторы космоса и сделав удивительные открытия, открыл путь применению зрительной трубы для исследования небесных тел.

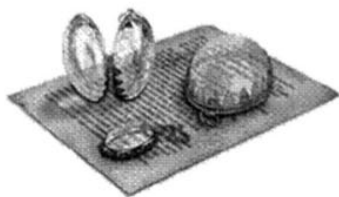


Рис. 17.23. «Камни для чтения», XIII в.

Зрительная труба. Для наблюдения удаленных объектов издревле применяется зрительная труба (подзорная труба). В «классическом» случае подзорная труба состоит из объектива (положительной, собирающей линзы), создающего действительное изображение объектов, и окуляра (отрицательной, рассеивающей линзы) для рассматривания увеличенного изображения. Увеличение «зрительной трубы», или «телескопа», равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра, $K = F/f$.

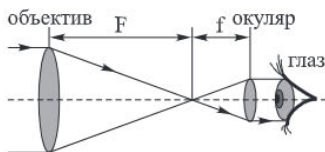


Рис. 17.24. Ход лучей в зрительной трубе

Определить эти величины очень просто. Достаточно направить исследуемую линзу на удаленный источник света (солнце, фонарь за окном, электрическую лампочку дома или просто окно в затененной комнате), а за линзой поместить белый экран (лист бумаги, лучше картона) и, передвигая экран относительно линзы, добиться резкого изображения на экране. Изображение будет уменьшенное и перевернутое. А далее — измерить расстояние от линзы до экрана. Зрительная труба, которая показывает «кверху ногами», не очень удобна в эксплуатации. Но эта проблема легко решается при помощи дополнительных линз. При чем линзы должны быть такие же, как и для окуляра.

Но есть другие проблемы, более сложные, чем рассмотренная. И связаны они с самими линзами. Погрешности изображений (абберация), даваемых линзами, проявляются в том, что оптические изображения в ряде случаев не вполне отчетливы, не точно соответствуют объекту или оказываются окрашенными. Из всех видов аббераций *сферическая абберация* является наиболее существенной и в большинстве случаев единственной практически значимой для оптической системы глаза. Сферическая абберация — недостаток оптического изображения, заключающийся в том, что световые лучи, прошедшие вблизи оптической оси,

и лучи, прошедшие через отдаленные от оси части оптической системы, не собираются в одну точку. Сферическая aberrация может быть практически полностью устранена применением специально рассчитанных комбинаций линз.

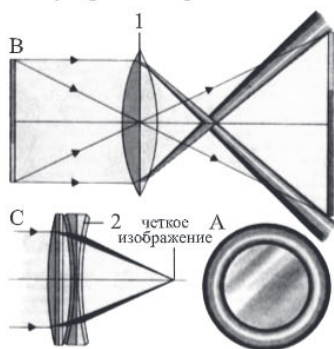


Рис. 17.25

Еще один вид aberrации, который стоит упомянуть, — это *хроматическая aberrация*. Хроматическая aberrация происходит в связи с тем, что лучи разных цветов, имеющие различную длину волны, не сходятся в один фокус; в таком случае искажается цвет изображения (рис. 17.25). Влияние хроматической aberrации проявляется в том, что по краю линзы возникают цветные ободки и часть изображения может быть нечеткой (А). Это происходит, в случае с одной выпуклой линзой (1), потому что она действует как призма и преломляет лучи синего цвета сильнее, чем красного (В). Сочетая выпуклую линзу с более слабой вогнутой (2), выполненной из другого стекла, можно устранить этот эффект, и тогда лучи синего и красного цвета сойдутся в одном фокусе; будет получено более отчетливое и ясное изображение (С).

лучи синего и красного цвета сойдутся в одном фокусе; будет получено более отчетливое и ясное изображение (С).

Телескоп. Назначение телескопа — собрать как можно больше света от исследуемого объекта и увеличить его видимые угловые размеры. Основной оптической частью телескопа служит объектив, который собирает свет и создает изображение источника. Есть два основных типа телескопов: рефракторы (на основе линз) и рефлекторы (на основе зеркал). Простейший телескоп — рефрактор, как и микроскоп, имеет объектив и окуляр, но в отличие от микроскопа (см. далее) объектив телескопа имеет большое фокусное расстояние, а окуляр — малое. Поскольку космические тела находятся на очень больших расстояниях от нас, то лучи от них идут параллельным пучком и собираются объективом в фокальной плоскости, где получается обратное, уменьшенное, действительное изображение. Чтобы сделать изображение прямым, используют еще одну линзу.

Первый телескоп был построен Галилеем. Этому телескопу предшествовало изобретение Леперсгеем (или Лепершеем) зрительной трубы. В 1610 году Галилей в книге «Звездный вестник» сообщил, что он построил прибор, увеличивающий все предметы в тридцать с лишним раз. Эта книга сразу же сделала Галилея знаменитостью. Он проехал со своим инструментом по главным городам Италии, чтобы показать всем то, что видел сам. Так началась история телескопа. Объективом в телескопе Галилея была двояковыпуклая собирающая линза, а окуляром — двояковогнутая линза. Вогнутая линза стояла перед фокусом объектива, тогда из окуляра выходил параллельный пучок лучей. Этот телескоп имел маленькое поле зрения. Позже Кеплер предложил другую линзовую систему из двояковыпуклых линз (рис. 17.26). В этой системе фокус находился внутри телескопа. В трубе Кеплера фокус объектива ($F_{об}$) совпадает с фокусом окуляра ($F_{ок}$), следовательно, длина l трубы Кеплера равна сумме фокусных расстояний объектива и окуляра: $l = F_{об} + F_{ок}$. Во время наблюдения в телескоп удаленных светящихся тел глаз и телескоп становятся единой оптической системой.

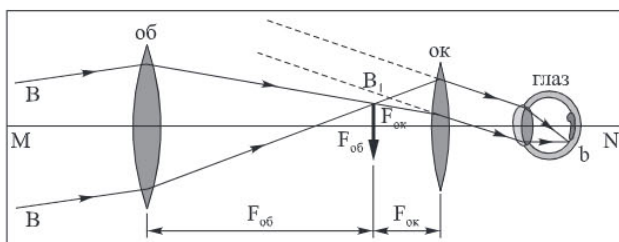


Рис. 17.26. Система Кеплера

Длиннофокусный и большого диаметра объектив телескопа (Об) собирает много света от далекого светила и формирует почти в фокусе действительное, уменьшенное и отчетливое световое изображение. Эту световую картину объектив направляет узким пучком сквозь окуляр в глаз на сетчатку, и мы отчетливо видим без напряжения глаза яркое, перевернутое изображение небесного объекта. Увеличение телескопа — это отношение угла, под которым видно изображение объекта в окуляр, к углу, под которым этот объект можно было бы наблюдать невооруженным глазом. Чтобы вычислить увеличение, надо знать фокусные расстояния объектива и окуляра. Увеличение, как и в зрительной трубе, равно отношению фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра. Для правильного действия телескопа требуется правильно подобранный окуляр к объективу в зависимости от размеров наблюдаемых объектов.

Эта система позволила расширить поле зрения, но все aberrации телескопа Галилея сохранились у телескопа Кеплера.

Чтобы уменьшить эти aberrации, нужно было либо уменьшить диаметр объектива, либо увеличить его фокусное расстояние, т. е. увеличить длину самого телескопа, но тогда становилось трудно управлять им. Такими были первые линзовые системы рефракторов.

Первые *рефлекторы* (зеркальные телескопы) появились практически одновременно с линзовыми, но от них пришлось отказаться, потому что хорошие зеркала тогда не делали. Тогда зеркала делали из бронзы, а она быстро тускнела и плохо отражала свет. Еще они были неудобными, потому что изображение объекта получалось внутри трубы. Строить зеркальные телескопы начали в конце XVII века, потому что считалось, что от aberrаций линзовых телескопов избавиться нельзя.

Первый телескоп-рефлектор был изобретен и собственноручно изготовлен Ньютоном в 1668 году. По своим размерам телескоп был малюткой — диаметром вогнутого металлического зеркала всего лишь 2,5 см, с фокусным расстоянием 15 см и увеличением в 38 раз. Этот телескоп хра-



Рис. 17.27. Телескоп Кеплера

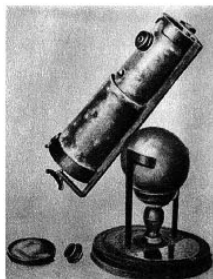


Рис. 17.28. Телескоп-рефлектор Ньютона, хранящийся в Королевском обществе в Лондоне (Вавилов С. И. Исаак Ньютон. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1945)

нится до сих пор в Лондоне. Позднее Ньютон изготовлял телескопы несколько больших размеров.

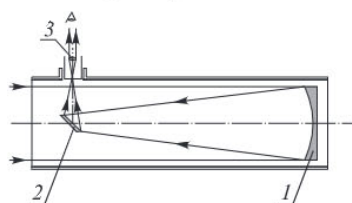


Рис. 17.29. Схема рефлектора системы Ньютона

На рис. 17.29 изображен ход лучей телескопа-рефлектора Ньютона. В открытое отверстие трубы телескопа входит свет от далекого светила в виде пучка параллельных лучей, световой пучок отражается от вогнутого зеркала (1) и образует сходящийся пучок. Если бы на пути отраженного пучка не было плоского зеркальца (2), то лучи сходящегося пучка образовали бы вблизи фокуса вогнутого зеркала действительное, уменьшенное, перевернутое изображение

далекого объекта. Но этого не происходит, потому что наклонное плоское зеркальце отражает сходящийся световой пучок в сторону окуляра (3), который действует подобно окуляру рефрактора. Поэтому изображение объекта получается увеличенным вблизи фокуса окуляра.

Телескопы-рефлекторы свободны от хроматической аберрации, так как при отражении от поверхности зеркала не происходит разложения света. Чтобы ликвидировать сферическую аберрацию, зеркалу-объективу придают так называемую параболическую форму. Параболическая поверхность обладает замечательным свойством: она сводит все лучи, падающие на нее параллельно оптической оси, в одну точку.

В течение трех с лишним столетий после изобретения телескопов Галилеем и Ньютоном выдающимися астрономами и конструкторами создавались телескопы все с большими и большими объективами и с большими фокусными расстояниями.

Используя различные окуляры в рефракторах, можно получать разные увеличения. При этом с ростом увеличения будет уменьшаться поле зрения телескопа. При 300-кратном увеличении на Луне можно различить значительно больше деталей, чем при 30-кратном. Однако в первом случае в поле зрения телескопа поместится гораздо меньший участок лунной поверхности.

Если наблюдаемый объект обладает заметными угловыми размерами (Солнце, Луна, планеты, кометы, туманности, галактики), то телескоп построит его протяженное изображение, позволяющее обнаружить такие детали, которые недоступны невооруженному глазу.

При наблюдениях звезд дело обстоит иначе. Даже ближайšie звезды столь далеки от нас, что при наблюдении в самые крупные телескопы остаются точками. Таким образом, телескопы не увеличивают видимые размеры звезд, зато они во много раз повышают их видимый блеск.

Луна. Существует ряд приборов, предназначенных для увеличения угла зрения (подробнее далее): лупа, микроскоп, зрительная труба. При визуальных наблюдениях глаз является неотъемлемой частью оптической системы, поэтому ход лучей в приборах, вооружающих глаз, зависит от аккомодации глаза.

Аккомодация глаза (лат. *accomodatio* — «приспособление») — свойство глаза изменять преломляющую силу для приспособления к восприятию предметов, находящихся от него на различных расстояниях. Аккомодация глаза возможна

в пределах, ограниченных ближайшей и дальней точками ясного зрения. Первая определяется наименьшим расстоянием, на котором возможно читать мелкий шрифт; вторая — наибольшим расстоянием, на котором ясно различим предмет при отсутствии аккомодации глаза.

При анализе работы оптических приборов для визуальных наблюдений удобнее всего полагать, что глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность. Это означает, что лучи от каждой точки предмета, пройдя через прибор, попадают в глаз в виде параллельного пучка.

В этих условиях понятие линейного увеличения теряет смысл. Отношение угла зрения ϕ при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения ψ при наблюдении невооруженным глазом называется угловым увеличением $\gamma = \phi/\psi$. Чтобы лучше рассмотреть мелкие предметы, приходится пользоваться лупой.

Лупой называется двояковыпуклая линза с небольшим фокусным расстоянием (от 10 до 1 см). Лупа является простейшим прибором, позволяющим увеличить угол зрения.

Наш глаз видит только те предметы, изображение которых получается на сетчатке. Чем больше изображение предмета, тем больше угол зрения, под которым мы его рассматриваем, тем отчетливее мы его различаем. Лупа увеличивает угол зрения, а также изображение предмета на сетчатке глаза, поэтому видимые размеры предмета увеличиваются по сравнению с его действительными размерами.

На рис. 17.30 показан ход лучей в лупе. Предмет АВ размещают на расстоянии, немного меньшем фокусного, от лупы.

При этом лупа дает прямое, увеличенное, мысленное изображение A_1B_1 . Лупу обычно размещают так, чтобы изображение предмета находилось на расстоянии наилучшего видения от глаза L_N (L_N — около 25 см). В этом случае увеличение лупы $\gamma = 1 + L_N/f$ (f — фокусное расстояние линзы). Чем короче фокусное расстояние линзы, тем больше увеличение.

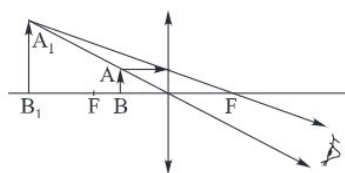


Рис. 17.30. Увеличение размера предмета при рассмотрении его через лупу

Микроскоп. Для получения больших угловых увеличений (от 20 до 2000) используют оптические микроскопы. Увеличенное изображение мелких предметов в микроскопе получают с помощью оптической системы, которая состоит из объектива и окуляра.

Простейший микроскоп — это система двух линз: объектива и окуляра. Предмет АВ размещается перед линзой, которая является объективом, на расстоянии $(d) F_1 < d < 2F_1$.

Принцип работы микроскопа состоит в том, что через прозрачный или полупрозрачный предмет (объект исследования), размещенный на предметном столике, проходят лучи света и попадают на систему линз объектива, которые увеличивают изображение. Эту же роль играют линзы окуляра, через которые исследователь изучает объект. Увеличение микроскопа γ равно произведению увеличения объектива γ_1 на увеличение окуляра γ_2 : $\gamma = \gamma_1\gamma_2$.

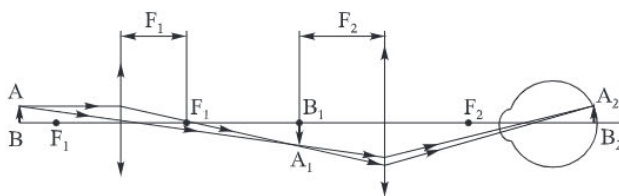


Рис. 17.31

Великое изобретение сделал Антони Ван Левенгук (1632–1723), который изобрел микроскоп, дающий увеличение в 270 раз, и открыл первые бактерии. «С величайшим изумлением я увидел в капле великое множество зверюшек, оживленно двигающихся во всех направлениях, как щука в воде. Самое мелкое из этих крошечных животных в тысячу раз меньше глаза взрослой вши». Левенгук дал возможность увидеть человечеству через увеличительное стекло микроскопа новый мир, полный неизведанного. Правда, на самом деле этот прибор был сконструирован и изготовлен задолго до него, Левенгук лишь его усовершенствовал. Причем настолько, что впервые за всю историю человеческой цивилизации стало возможным вторжение в миры микроорганизмов, будь то капля воды, крови либо иные жидкие или твердые вещества. Как ни удивительно, из современников изобретателя, занимавшего скромную должность в правлении нидерландского городка Дельф, никто, кроме его друга, российского монарха Петра I, сначала достойно не оценил. Только когда Левенгуку удалось отлить и отшлифовать крошечную линзу, обладавшую фантастическими характеристиками увеличения примерно в 270 раз, посыпались заказы из Парижской академии наук.

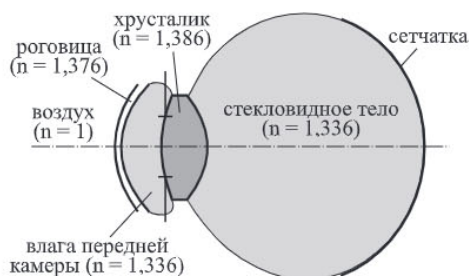


Рис. 17.32. Оптическая система глаза

Глаз как оптическая система.

У человека через глаз поступает около 90 % информации из окружающего мира. Поток излучения, отраженный от наблюдаемого предмета, проходит через оптическую систему глаза и фокусируется на внутренней поверхности глаза — сетчатой оболочке, образуя на ней обратное и уменьшенное изображение (мозг «переворачивает» обратное изображение, и оно воспринимается как прямое). Оптическую систему глаза составляют роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело (рис. 17.32).

Особенностью этой системы является то, что последняя среда, проходимая светом, обладает показателем преломления, отличным от единицы.

Вследствие этого фокусные расстояния оптической системы глаза во внешнем пространстве (переднее фокусное расстояние) и внутри глаза (заднее фокусное расстояние) неодинаковы. Преломление света в глазе происходит главным образом на его внешней поверхности — роговой оболочке, или роговице, а также на поверхностях хрусталика. Радужная оболочка определяет диаметр зрачка, величина которого может изменяться произвольным мышечным усилием от 1 до 8 мм. Способность глаза приспосабливаться к четкому различению предметов,

расположенных на разных расстояниях от глаза, называется аккомодацией. Аккомодация происходит путем изменения кривизны поверхностей хрусталика при помощи натяжения или расслабления ресничного тела. Когда ресничное тело натянуто, хрусталик растягивается и его радиусы кривизны увеличиваются. При уменьшении натяжения мышцы хрусталик под действием упругих сил увеличивает свою кривизну. В свободном, ненапряженном состоянии нормального глаза на сетчатке получаются ясные изображения бесконечно удаленных предметов, а при наибольшей аккомодации видны самые близкие предметы. Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке для ненапряженного глаза, называют дальней точкой глаза.

Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке при наибольшем возможном напряжении глаза, называют ближней точкой глаза. При аккомодации глаза на бесконечность задний фокус совпадает с сетчаткой. При наибольшем напряжении на сетчатке получается изображение предмета, находящегося на расстоянии около 9 см (рис. 17.33).

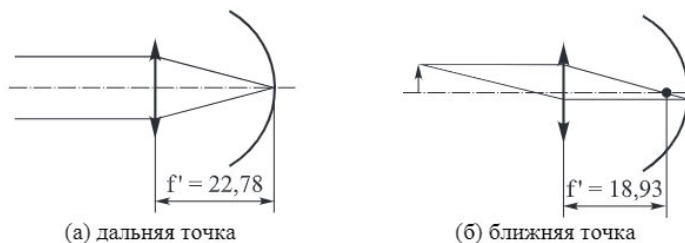


Рис. 17.33. Изображение ближней и дальней точки

Разность обратных величин расстояний между ближней и дальней точками называют диапазоном аккомодации глаза (измеряется в дптр). С возрастом способность глаза к аккомодации постепенно уменьшается. Скажем, в возрасте 20 лет для среднего глаза ближняя точка находится на расстоянии около 10 см (диапазон аккомодации — 10 дптр), в 50 лет ближняя точка располагается на расстоянии уже около 40 см (диапазон аккомодации — 2,5 дптр), а к 60 годам уходит на бесконечность, то есть аккомодация прекращается. Это явление называется возрастной дальнозоркостью.

Разрешающая способность глаза и расстояние наилучшего зрения. Сетчатая оболочка имеет сложное строение и состоит из отдельных светочувствительных элементов. Поэтому две точки объекта, расположенные настолько близко друг к другу, что их изображения на сетчатке попадают в один и тот же элемент, воспринимаются глазом как одна. Оценивать его можно в угловой или в линейной мере. Обычно разрешающую способность, или разрешение, характеризуют числом линий, видимых раздельно в интервале 1 мм. При нормальном, 100 %-ном, зрении наилучшее расстояние рассматривания мелких предметов — 25 см. Человеческий глаз способен рассмотреть на этом расстоянии несамосве-

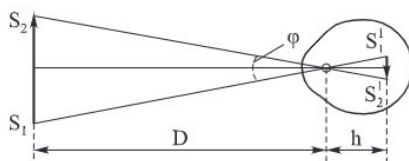


Рис. 17.34. К определению разрешающей способности глаза

тящийся предмет, размер которого около 1 угловой минуты, или, в пересчете на линейные величины, около 70 микрон.

Приближая предмет к глазу, мы увеличиваем угол зрения α , следовательно, получаем возможность лучше различать мелкие детали. Однако очень близко к глазу приблизить мы не можем, так как способность глаза к аккомодации ограничена. Для нормального глаза наиболее благоприятным для рассматривания предмета оказывается расстояние около 25 см, при котором глаз достаточно хорошо различает детали без чрезмерного утомления. Это расстояние называется расстоянием наилучшего зрения. Для близорукого глаза это расстояние несколько меньше. Поэтому близорукие люди, помещая рассматриваемый предмет ближе к глазу, чем люди с нормальным зрением или дальнозоркие, видят его под большим углом зрения и могут лучше различать мелкие детали.

Коррекция зрения достигается с помощью соответствующих линз (очков). Близорукие глаза должны быть снабжены очками с рассеивающими линзами. (рис. 17.35)

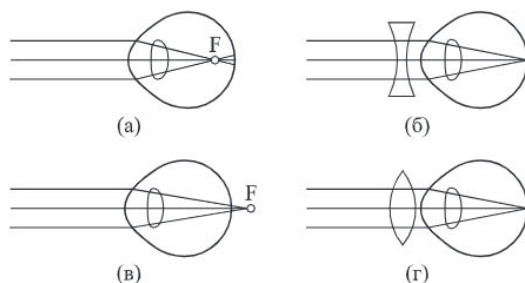


Рис. 17.35. Близорукость глаза (а) исправляется с помощью рассеивающей линзы (б); дальнозоркость (в) — с помощью собирающей линзы (г)

В дальнозорком глазе фокус при спокойном состоянии глаза находится за сетчаткой (рис. 17.35, в). Дальнозоркий глаз преломляет слабее нормального. Для того чтобы видеть даже весьма удаленные предметы, дальнозоркий глаз должен делать усилие; для видения близлежащих предметов аккомодационная способность глаза уже недостаточна. Поэтому для исправления дальнозоркости употребляются очки с собирающими линзами (рис. 17.35, г), приводящие фокус глаза в спокойном состоянии на сетчатку.



Рис. 17.36. Мастерская очков
(Физика Средневековья — Библиотека по физике, physiclib.ru/books/item/f00/s00/.../st025.shtm)

И в заключение немного об истории возникновения очков.

Изготавливать стеклянные линзы и даже посуду люди научились очень давно. Однако их делали из толстого и непрозрачного стекла. А для очков необходимо было тонкое, бесцветное и прозрачное. Секрет такого стекла был найден в XIII веке в Венеции. Тайна эта строгойше охранялась вплоть до XVI столетия. И очки, как считают многие ученые, были изобретены, скорее всего, в Венеции или в Северной Италии в конце

XIII века. В начале XIV века очки уже часто упоминаются в дошедших до нас источниках. Можно считать, что в конце XIII века в Италии очки уже хорошо известны. Однако долгое время они были очень дорогими, что объяснялось трудностью изготовления по-настоящему чистых и прозрачных стекол. Их, наряду с драгоценностями, включали в свои завещания короли, князья и другие богатые люди. Офтальмологи сначала отвергали пользу очков, поэтому на протяжении многих веков после изобретения очков, вплоть до середины XIX века, использовались глазные капли. Интересно, что до XVI века очками пользовались только дальновзоркие, потом появились очки с вогнутыми стеклами для близоруких.

18. *Конкурирующие теории света. Дисперсия. Дифракция. Принцип Гюйгенса. Интерференция. Опыт Юнга. Интерференция в тонких пленках. Кольца Ньютона. Дифракция на одной щели. Дифракционная решетка. Спектроскопия. Поляризация. Двойное лучепреломление. Почему небо голубое?*

Пожалуй, вопрос о природе света оказался самым трудным для понимания. Казалось очевидным, что наличие тени, явления преломления света не оставляет сомнений, что свет состоит из отдельных частиц, корпускул, испускаемых светящимися телами. Ньютон считал, что движение световых корпускул подчиняется законам механики. Так, отражение света понималось аналогично отражению упругого шарика от плоскости. Преломление света объяснялось изменением скорости корпускул при переходе из одной среды в другую. Для случая преломления света на границе «вакуум—среда» корпускулярная теория приводила к закону преломления, который рассматривался в предыдущих главах. На основе этой идеи можно построить изображение в зеркале, объяснить увеличение света линзой и т. д. Вся геометрическая оптика построена на понятии луча света.

Но некоторые явления свидетельствовали явно не в пользу этой концепции. Среди них — явления интерференции и дифракции света. В некоторых частных случаях эти явления были известны еще во времена Ньютона, но это не повлияло на взгляды большинства ученых.

В конце XVII века возникли две теории света: корпускулярная (Ньютон) и волновая (Р. Гук и Х. Гюйгенс). Волновая теория, в отличие от корпускулярной, рассматривала свет как волновой процесс, подобный механическим волнам.

Дисперсия. 1648 год ознаменовался открытием дисперсии света. Что это такое? Проходя через призму, луч солнечного света не только преломляется, но и разлагается на различные цвета (дисперсия света). Произведем такой опыт: в солнечный день закроем окно в комнате плотной шторой, в которой сделаем маленькое отверстие. Через это отверстие будет проникать в комнату узкий солнечный луч, образующий на противоположной стене светлое пятно. Если на пути луча поставить стеклянную призму, то пятно на стене превратится в разноцветную полоску, в которой будут представлены все цвета радуги — от фиолетового до красного. Описанный опыт, по сути дела, был знаком древним уже в I в. н. э. Ряд ученых занимались этой проблемой, но не получили общих результатов. А вот Ньютон получил в своих исследованиях основополагающие результаты. Опыты по разложению белого света он проделал в своей квартире в Кембридже.

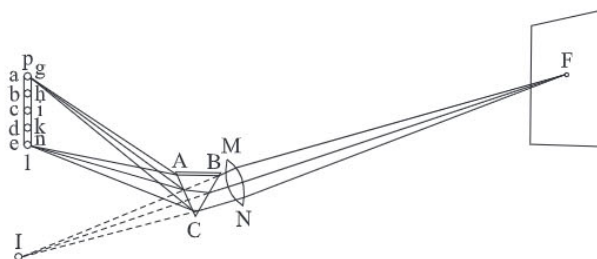


Рис. 18.1. Рисунок из «Оптики» Ньютона. Пояснения: «На фигуре F представляет круглое отверстие в оконной ставне, MN — линза, отбрасывающая отчетливое изображение отверстия на бумагу в I, ABC — призма, посредством которой лучи, выходящие из линзы, преломляются и круглое изображение в I превращается в удлинненное изображение pI, падающее на другую бумагу. Это изображение pI состоит из кругов, расположенных один за другим в прямолинейном порядке...; эти круги равны кругу I и, следовательно, соответствуют по величине отверстию F; уменьшая отверстие, можно, следовательно, по желанию уменьшить эти круги, оставляя их центры на прежних местах. Таким способом я получил ширину изображения, в сорок, а иногда в шестьдесят и семьдесят раз меньшую, чем длина»

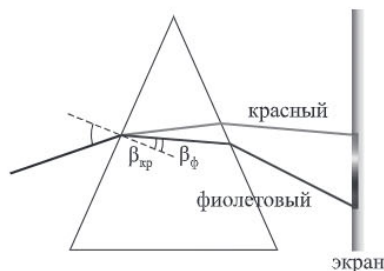


Рис. 18.2. Дисперсия света (опыт Ньютона)

Физическим прибором ему служила призма, купленная на собственные деньги. Исаак Ньютон выполнил целый комплекс оптических экспериментов с призмами, подробно описав их в своей «Оптике», вышедшей в 1704 году. «Мое намерение в этой книге — не объяснять свойства света гипотезами, но изложить и доказать их рассуждениями и опытами». Такими словами начинается его книга, где Ньютон скрупулезно описал проведенные им эксперименты по обнаружению дисперсии света — разложения белого света

с помощью призмы на отдельные компоненты разного цвета. Ньютон убедительно доказал ложность представлений о возникновении цветов из смешения темноты и белого света. На основании проделанных опытов он смог заявить: «Никакого цвета не возникает из белизны и черноты, смешанных вместе, кроме промежуточных темных; количество света не меняет вида цвета». Ньютон показал, что белый свет не является основным, его надо рассматривать как составной (по Ньютону — «неоднородный»; по современной терминологии — «немонохроматический»); основными же являются различные цвета («однородные» лучи, или, иначе, «монохроматические» лучи). Возникновение цветов в опытах с призмами есть результат разложения составного (белого) света на основные составляющие (на различные цвета). А ведь еще упомянутый выше Роджер Бэкон в XIII столетии утверждал, что цвет не есть собственное свойство света, а вносится самой призмой.

Само разложение происходит по той причине, что каждому цвету соответствует своя степень преломляемости. Именно это отличие и позволяет разложить световой пучок в спектр. Так, в соответствии с законом преломления имеем $n_{кр} = \sin \alpha / \sin \beta_{кр}$ и $n_{\phi} = \sin \alpha / \sin \beta_{\phi}$. Так как $n_{кр} < n_{\phi}$, то $\beta_{кр} > \beta_{\phi}$.

Порядок расположения цветов после преломления в призме легко запоминается по известному (довольно глупому и поэтому легко запоминающемуся) предложению, приведенному на рис. 18.3.

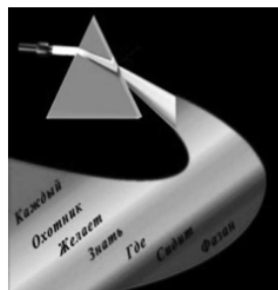


Рис. 18.3

Теперь можно было понять физику радуги, которая издревле была известна людям. По-видимому, первая попытка объяснить это явление принадлежит персидскому астроному Аль-Ширази (1236–1311). Окончательно понял явление радуги Ньютон. Радуга возникает из-за того, что солнечный свет испытывает преломление в капельках воды дождя или тумана, парящих в атмосфере. Эти капельки по-разному отклоняют свет разных цветов (показатель преломления воды для более длинноволнового (красного) света меньше, чем для коротковолнового (фиолетового), поэтому красный свет меньше отклоняется при преломлении — красный на $137^{\circ}30'$, фиолетовый на $139^{\circ}20'$ и т. д.), в результате чего белый свет разлагается в спектр. Наблюдателю кажется, что из пространства по концентрическим кругам (дугам) исходит разноцветное свечение (при этом источник яркого света всегда должен находиться за спиной наблюдателя).

Не все сразу согласились признать выводы Ньютона. Так, великий поэт и естествоиспытатель Гете считал, что исследованный Ньютоном свет — это уже не тот свет, с каким мы встречаемся в естественной обстановке, а свет, «замученный всякого рода орудиями пытки — щелями, призмами, линзами». Важно было доказать, что свет действительно имеет волновую природу.

Явления, свидетельствующие в пользу волновой природы света: дифракция и интерференция

Дифракция. Как показывает опыт, свет при определенных условиях может заходить в область геометрической тени. Если на пути параллельного светового пучка расположено круглое препятствие (круглый диск, шарик или круглое отверстие в непрозрачном экране), то на экране, расположенном на достаточно большом расстоянии от препятствия, появляется система чередующихся светлых и темных колец. Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных полос. Такое явление получило название «дифракция». Дифракцией света называется явление отклонения света от прямолинейного направления распространения при прохождении вблизи препятствий. Еще в 1665 году был опубликован труд итальянского физика и астронома Марио Гримальди (1618–1663) (уже после смерти) под названием «Физико-математический трактат о свете, цветах и радуге», содержащий описание открытого им явления дифракции света, и сформулированы некоторые правила.

Явление дифракции света оказалось невозможным объяснить с точки зрения лучевой модели, то есть с точки зрения геометрической оптики. Построить теорию дифракции суждено было голландскому физiku Христиану Гюйгенсу (1629–1695). В 1678 году он выпустил на латинском языке «Трактат о свете» — набросок волновой теории света. Этот трактат Гюйгенса вошел в историю науки как первое научное сочинение по волновой оптике, хотя идею волновой

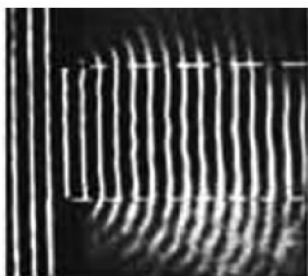


Рис. 18.4. Наблюдение дифракции волн на водной поверхности при прохождении волн через узкую щель (с краю видны закругления плоских волн)

о бетонный волнорез под углом к нему. Согласно принципу Гюйгенса из тех точек волнового фронта, которые пришились на волнорез, вторичные волны распространяться не будут, а из остальных — будут. В результате волна продолжит свой путь и восстановится позади волнореза. То есть фактически при столкновении с препятствием волна спокойно огибает его.

Явление дифракции можно наблюдать на воде при прохождении волн через узкую щель (рис. 18.4).

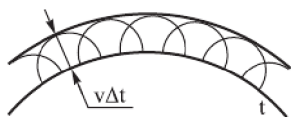


Рис. 18.5

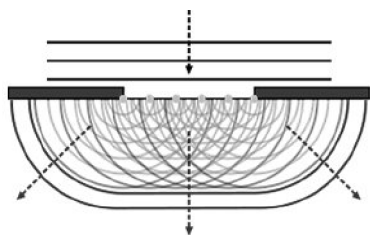


Рис. 18.6. Дифракция волн по Гюйгенсу

механических, световых и т. д. Гюйгенс сформулировал его первоначально именно для световых волн.

Если обратиться к дифракции на щели, то наблюдаемый волновой фронт, согласно принципу Гюйгенса, будет выглядеть так, как показано на рис. 18.6.

Наблюдаемый волновой фронт представляет собой результат сложения множества элементарных волн. Используя принцип Гюйгенса, можно получить законы отражения и преломления света, о которых речь шла выше.

природы света высказывали и ранее. Гюйгенс, разработав идею Гримальди о том, что свет распространяется не только прямолинейно с преломлением и отражением, а и с «разбиением» (дифракция), дал объяснение известным оптическим явлениям. Гюйгенс сформулировал принцип распространения волны, известный ныне под названием принципа Гюйгенса, согласно которому каждая точка пространства, которой достигла в данный момент распространяющаяся волна, становится источником элементарных сферических волн, а наблюдаемые оптические эффекты есть результат сложения (интерференции) этих волн.

Явление дифракции можно наблюдать на водной поверхности. Представим, что волна ударилась

Итак, согласно Гюйгенсу наблюдаемый фронт представляет собой результат сложения множества элементарных волн: *каждую точку волнового фронта можно рассматривать как источник элементарных волн, распространяющихся в первоначальном направлении со скоростью волны: новое положение волнового фронта совпадает с огибающей элементарных волн* (см. рис. 18.5).

Для того чтобы, зная положение волновой поверхности в момент времени t , найти ее положение в следующий момент времени $t + \Delta t$, нужно каждую точку волновой поверхности рассматривать как источник вторичных волн. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени (рис. 18.5). Этот принцип в равной мере пригоден для описания распространения волн любой природы:

Принципа Гюйгенса раскрывает физический смысл показателя преломления. Он равен отношению скоростей света в средах, на границе между которыми происходит преломление: $n = v_1/v_2$.

Если угол преломления β меньше угла падения α , то согласно этому соотношению скорость света во второй среде меньше, чем в первой. Показатель преломления среды относительно вакуума (где $n = 1$) называют *абсолютным показателем преломления этой среды*. Он равен отношению синуса угла падения к синусу угла преломления при переходе светового луча из вакуума в данную среду. Так как показатель первой среды $n_1 = c/v_1$, а $n_2 = c/v_2$ (здесь c — скорость света), то $n = v_1/v_2 = n_2/n_1$.

Абсолютный показатель преломления определяется скоростью распространения света в данной среде, которая зависит от физического состояния среды, т. е. от температуры вещества его плотности, наличия в нем упругих напряжений. Показатель преломления зависит также и от характеристик самого света. Для красного света он меньше, чем для зеленого, а для зеленого меньше, чем для фиолетового.

Скорость связана с длиной волны соотношением $v = \lambda \nu$ (это соотношение установил Томас Юнг (1773-1829)). Отсюда можно получить, что отношение длин волн в двух средах обратно пропорционально отношению коэффициентов преломления в этих средах: $\lambda_2/\lambda_1 = n_1/n_2$.

Таблица 17. Зависимость показателя преломления от длины волны для разных веществ

Длина волны λ в нм (цвет)	Показатель преломления			
	стекло, тяжелый флинт	стекло, легкий крон	сероуглерод	вода
656,3 (красный)	1,6444	1,5145	1,6219	1,3311
589,3 (желтый)	1,6499	1,5170	1,6308	1,3330
486,1 (голубой)	1,6657	1,5230	1,6799	1,3371
404,7 (фиолетовый)	1,6852	1,5318	1,6990	1,3428

Так как показатель преломления зависит от длины волны, то становится ясно, почему, падая на призму, волны различной длины преломляются под разными углами. Так как показатель преломления больше для более коротких волн, фиолетовый свет преломляется сильнее, а красный слабее.

Принцип Гюйгенса решает лишь задачу о направлении распространения волнового фронта, объясняет явление дифракции, но не затрагивает вопроса об амплитуде, а следовательно, и об интенсивности волн, распространяющихся по разным направлениям. Френель (1788–1827) вложил в принцип Гюйгенса физический смысл, дополнив его идеей интерференции вторичных волн.

Согласно принципу Гюйгенса–Френеля световая волна, возбуждаемая каким-либо источником S , может быть представлена как результат суперпозиции когерентных вторичных волн, «излучаемых» фиктивными источниками. Такими источниками могут служить бесконечно малые элементы любой замкнутой поверхности, охватывающей источник S . Обычно в качестве этой поверхности выбирают одну из волновых поверхностей, поэтому все фиктивные источники действуют синфазно. Таким образом, волны, распространяющиеся от источника,

являются результатом интерференции всех когерентных вторичных волн. Учет амплитуд и фаз вторичных волн позволяет в каждом конкретном случае найти амплитуду (интенсивность) результирующей волны в любой точке пространства, т. е. определить закономерности распространения света.

Интерференция. Опыт Юнга. В части 19 мы рассказывали о явлении интерференции, о том, как, складываясь друг на друга, волны могут взаимно гасить либо взаимно усиливать друг друга. Английский физик и врач Томас Юнг (1773–1829) проделал в 1801 году следующий опыт с лучом света, который проходил через два отверстия в непрозрачном экране, образуя, таким образом, два независимых источника света. Солнечный свет, проходя сквозь две щели в плотной шторке, падает на белый экран. В опыте Юнга экран был удален от отверстий на расстояние 5 м. Расстояние между отверстиями — 0,5 мм. Если исходить из того, что свет состоит из частиц (корпускулярная теория света), то на проекционном экране можно было бы увидеть только две параллельные полосы света.

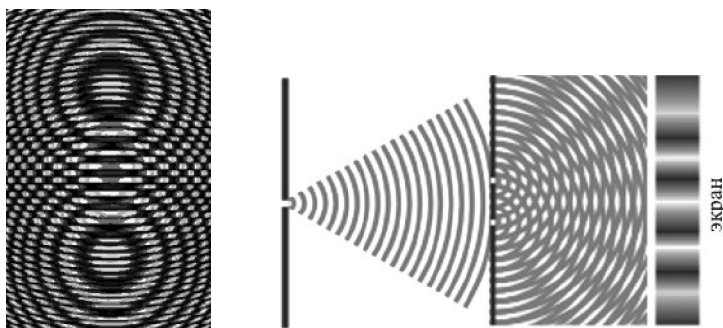


Рис. 18.7. Схема опыта Юнга



Рис. 18.8. Томас Юнг

Между ними проекционный экран оставался бы практически неосвещенным. С другой стороны, если предположить, что свет представляет собой распространяющиеся волны (волновая теория света), то согласно принципу Гюйгенса каждая прорезь является источником вторичных волн. Если вторичные волны достигнут линии в середине проекционного экрана, находящейся на равном удалении от прорезей, синхронно и в одной фазе, то на срединной линии экрана их амплитуды прибавятся, что создаст максимум яркости. То есть максимум яркости окажется там, где, согласно корпускулярной теории, яркость должна быть практически нулевой. На определенном удалении от центральной линии, напротив, волны окажутся в противофазе — их амплитуды компенсируются, что создаст минимум яркости (темная полоса). По мере дальнейшего удаления от средней линии яркость периодически изменяется, возрастая до максимума и снова убывая. На проекционном экране получится целый ряд чередующихся интерференционных полос, что и было продемонстрировано Томасом Юнгом. Это явление Юнг назвал интерференцией.

Вместо сплошного светлого пятна на экране возникли чередующиеся темные и светлые полосы. Два световых луча, складываясь, дали тень!

Этот опыт наглядно доказал, что свет не поток частиц, как считалось со времен Ньютона, а волна. Только волны, по-разному складываясь, способны и усиливать, и гасить друг друга — интерферировать. А вот как излагал Юнг открытый им закон интерференции света: «Везде, где части одного и того же света попадают в глаз различными путями, либо точно, либо весьма близко по направлению, свет становится сильным там, где разность путей есть целое кратное некоторой длины, и наименее сильным в промежуточных состояниях интерферирующих частей; и эта длина различна для света различных цветов».

Найдем условия возникновения интерференционной картины в опыте Юнга (см. рис. 18.9).

Отверстие S , согласно принципу Гюйгенса, служит источником волны. Эта волна достигает преграды с отверстиями S_1 , S_2 , которые, в свою очередь, одновременно излучают две вторичные волны. Эти вторичные волны являются когерентными (о когерентности см. с. 205), так как порождены, по сути, одним источником, волной S . Интерференция этих когерентных волн наблюдается на экране.

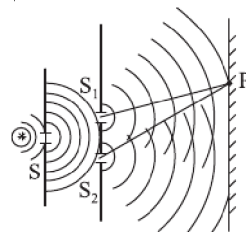


Рис. 18.9

В точку P приходят две когерентные волны:

$$E_1 = E_m \cos(\omega t - kr_1) = E_m \cos 2\pi(vt - r_1)/\lambda = E_m \cos \phi_1,$$

$$E_2 = E_m \cos(\omega t - kr_2) = E_m \cos 2\pi(vt - r_2)/\lambda = E_m \cos \phi_2.$$

Здесь r_1 — расстояние $S_1 - P$, r_2 — расстояние $S_2 - P$. Амплитуда результирующего колебания равна

$$E_{\text{рез}} = 2E_m \cos(\Delta\phi/2) = 2E_m \cos[2\pi(r_2 - r_1)/2\lambda].$$

Здесь $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ — разность фаз. Величину $\Delta = r_2 - r_1$ называют разностью хода. В точках, для которых выполняется условие $\Delta = (2k + 1)\lambda/2$ (k — любое целое число), значение $\cos(\Delta\phi/2) = 0$ и амплитуда результирующих колебаний равна нулю. В этих точках образуются минимумы интерференции.

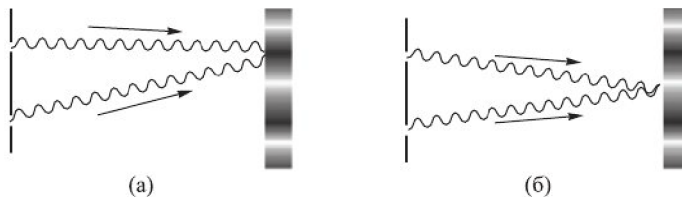


Рис. 18.10. Если волны приходят в данную точку в одинаковой фазе, они взаимно усиливают друг друга и на экране в этом месте наблюдается светлая полоса (б); в противофазе они взаимно ослабляют друг друга и на экране в этом месте наблюдается темная полоса (а)

Если же выполняется $\Delta = 2k \cdot \lambda/2 = k \cdot \lambda$, то амплитуда максимальна. В этих точках образуются максимумы интерференции.

Необходимо заметить, что в том случае, если интерферирующие волны проходят расстояния r_2 , r_1 в средах с разными показателями преломления, то раз-

ность хода определяется формулой $\Delta = r_2 n_2 - r_1 n_1$. Эта величина называется оптической разностью хода.



Рис. 18.11. Цветные картины на поверхности луж, возникшие от тонкой пленки бензина

Интерференция в тонких пленках. В жизни мы не раз наблюдали интерференционные картины. Достаточно вспомнить о мыльном пузыре, меняющем свою окраску, или радужные картины на поверхности луж от разлившегося бензина (рис. 18.11). Бензин не смешивается с водой. Поэтому, попадая, например, в лужу на дороге, он растекается по ее поверхности и образует тончайшую пленку.

Все, что происходит в мыльном пузыре со светом или в пленках бензина на поверхности воды, — это примеры интерференции в тонких пленках. Световые лучи, попадающие на бензиновую пленку, разделяются: часть луча отражается от поверхности бензиновой пленки (границы воздуха и бензина), а часть проходит через бензиновый слой, доходит до границы бензин-вода и отражается уже от этой границы (еще одна часть уходит вглубь воды, но для нашего вопроса эта составляющая значения не имеет). В итоге получаются два отраженных луча, причем второй из них на пути к нашему глазу отстает от первого, потому что ему дважды пришлось преодолеть толщину пленки. Эти два луча накладываются друг на друга, при этом результирующие колебания либо усиливаются, либо ослабляются.

Рассмотренные явления смоделируем в следующем опыте. На поверхность оптического стекла наносят тонкую пленку. Для того чтобы волны 1 и 2 ослабляли друг друга, должно выполняться условие минимума. В отраженном свете разность хода волн равна $\Delta d = (2k + 1)\lambda/2$. Потеря полуволны происходит при отражении как от пленки, так и от стекла (показатель преломления стекла больше, чем пленки), поэтому эту потерю можно не учитывать. Следовательно, $\Delta d = (2k + 1)\lambda/2 = 2hn$, где n — показатель преломления пленки, h — толщина пленки. Минимальная толщина пленки будет при $k = 0$. Поэтому $\lambda/2 = 2hn$.

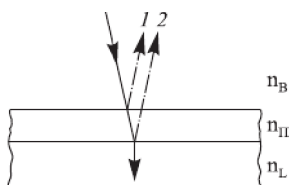


Рис. 18.12

При равенстве амплитуд гашение света будет полным. Толщину пленки подбирают так, чтобы полное гашение при нормальном падении имело место для длин волн средней части спектра (для зеленого цвета): $h = \lambda/4n$.

Чтобы рассчитать толщину пленки в этой формуле, необходимо взять длину волны и показатель преломления зеленого света.

Лучи красного и фиолетового цвета ослабляются незначительно. Поэтому объективы оптических приборов в отраженном свете имеют сиреневые оттенки.

Если на тонкую пленку, рассмотренную выше, падает белый свет от протяженного (не точечного) источника, то условия интерференции будут выполняться по-разному для разных длин волн. Поэтому под разными углами зрения мы увидим разноцветные полосы, расположенные друг за другом. В мыльном пузыре из-за постоянно меняющейся толщины пленки изменяется и его окраска.

Кольца Ньютона. Частным случаем интерференции в тонких пленках являются кольца Ньютона. Это явление наблюдается в таком опыте. Возьмите плоско-выпуклую линзу с малой кривизной сферической поверхности и положите ее на стеклянную пластину (рис. 18.13). Если внимательно разглядывать плоскую поверхность линзы (лучше через лупу), вы обнаружите в месте соприкосновения линзы и при виде сверху пластины темное пятно и вокруг него совокупность маленьких радужных колец. Расстояния между соседними кольцами быстро уменьшаются с увеличением их радиуса. Это и есть кольца Ньютона. Сам Ньютон наблюдал и исследовал их не только в белом свете, но и при освещении линзы одноцветным (мономатрическим) пучком.

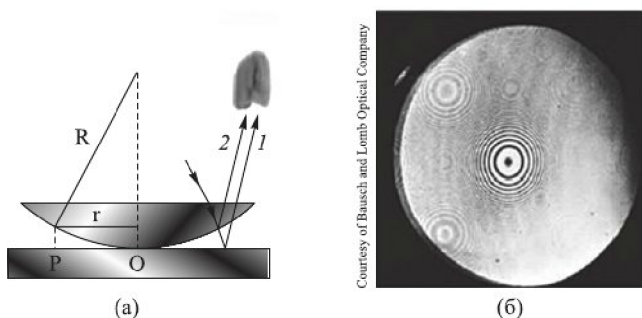


Рис. 18.13. Кольца Ньютона. а) эксперимент; б) картина

Несмотря на название, первым описываемый эксперимент провел не Исаак Ньютон. В 1663 году другой англичанин, Роберт Бойль, первым обнаружил кольца Ньютона, а через два года опыт и открытие были независимо повторены Робертом Гуком. Ньютон же подробно исследовал это явление, обнаружил закономерности в расположении и окраске колец. Удовлетворительно объяснить, почему возникают кольца, Ньютон не смог, хотя пытался это сделать на основе корпускулярной теории. Ему пришлось ввести некоторые искусственные допущения, чтобы объяснить эффект периодичности в наблюдаемой картине. А ведь то, что наблюдалось в опыте Ньютона, было типичной интерференционной картиной в тонкой прослойке воздуха между стеклянными пластинами. Действительно, волна 1 — отражение от плоской пластины (граница «воздух–стекло») (см. рис. 18.13). Волна 2 — результат отражения ее от границы «стекло–воздух». Лучи 1 и 2 когерентны, так как они возникли из одного луча. Если, попав в глаз, фаза этих лучей будет отличаться на целое число периодов, то эти лучи будут усиливать друг друга и мы увидим яркое пятно. В тех случаях, когда их разность фаз составит нечетное число полуволен ($\lambda/2$, $3\lambda/2$, $5/2$ и т. д.), лучи уничтожат друг друга и мы увидим темное пятно. Очевидно, что разность фаз между лучами 1 и 2 зависит от толщины зазора между линзой и пластинкой. Поэтому, смотря сверху, мы увидим чередующиеся темные и светлые кольца (см. рис. 18.13, б). Отметим, что в точке соприкосновения линзы со стеклом разность хода лучей равна нулю, то есть лучи находятся в фазе. Мы наблюдаем темноту (то есть в действительности волны находятся в противофазе). Это происходит вследствие того, что одна из волн при отражении меняет фазу на 180° . Так происходит при отражении света от среды с большим показателем преломления — фаза изменя-

ется на 180° . При отражении от среды с меньшим показателем преломления фаза не изменяется. Система светлых и темных полос получается только при освещении монохроматическим светом. При наблюдении в белом свете получается совокупность смещенных друг относительно друга полос, образованных лучами разных длин волн, и интерференционная картина приобретает радужную окраску. Интерференцию можно наблюдать и в проходящем свете, причем в данном случае не наблюдается потери полуволны. Следовательно, оптическая разность хода для проходящего и отраженного света отличается на $\lambda/2$, т. е. максимумам интерференции в отраженном свете соответствуют минимумы в проходящем, и наоборот. Эффект колец Ньютона применяются на практике. Одним из примеров такого применения является определение качества полировки оптической поверхности. Для этого исследуемую линзу накладывают на стеклянную пластинку. Сверху освещают монохроматическим светом. Если поверхности идеально ровные, в отраженном свете будут наблюдаться кольца Ньютона.

Дифракция (продолжение). Работы Юнга, представлявшие собой наиболее существенный вклад в теорию оптических явлений со времен Ньютона, тем не менее были восприняты физиками того времени с недоверием, а в Англии они подвергались даже грубым насмешкам.

Полное и окончательное теоретическое объяснение опыта Юнга было дано Огюстеном Френелем (1788–1827). В представленном во Французскую академию «Мемуаре о дифракции света» он высказал идею соединить принцип интерференции Юнга с принципом Гюйгенса. Эта идея дала возможность построить первую количественную теорию дифракционных явлений.

Мемуар Френеля, содержащий всестороннее исследование с волновых позиций и математическую модель всех известных тогда свойств света, победил на конкурсе Парижской академии наук (1818). Курьезный случай описывает Араго: на заседании комиссии академиков Пуассон выступил против теории Френеля, так как из нее следовало, что при определенных условиях в центре тени от непрозрачного кружка мог появиться ярко освещенный участок. На следующем заседании Френель продемонстрировал членам комиссии этот эффект. С этих пор формулы Френеля для дифракции, преломления и интерференции вошли во все учебники физики.

Успех волновой теории был обеспечен, а корпускулярная теория, хотя и поддерживаемая еще некоторыми учеными (например, Био, Лапласом), стала быстро терять своих приверженцев.

А. Дифракция на одной щели. Немецкий физик И. Фраунгофер (1787–1826) рассмотрел дифракцию плоских световых волн, или дифракцию в параллельных лучах. Дифракция Фраунгофера, имеющая большое практическое значение, наблюдается в том случае, когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию. Чтобы этот тип дифракции осуществить, достаточно точечный источник света поместить в фокусе собирающей линзы, а дифракционную картину исследовать в фокальной плоскости второй собирающей линзы, установленной за препятствием.

Рассмотрим следующий пример. Пусть на узкую щель (ширина $AB = b$ много меньше ее длины) падает нормально монохроматическая волна. Поместим за щелью собирательную линзу, а в ее фокальной плоскости — экран Э.

Разобьем щель на ряд узких полос — зон одинаковой ширины (на рис. 18.14 их 4). В соответствии с принципом Гюйгенса каждая из этих зон может рассматриваться как источник вторичных волн, имеющих одинаковую фазу, так как все зоны лежат на одной и той же волновой поверхности. Амплитуды этих вторичных волн, распространяющихся в одном и том же направлении, также одинаковы. Вторичные волны, посылаемые зонами под углом φ к оптической оси линзы, соберутся в точке Р экрана (точнее, это линия, проекцией которой на плоскость листа является точка Р). При некотором φ разность хода между любой парой соседних лучей может быть равна $\lambda/2$, в этом случае зоны называют зонами Френеля (рис. 18.14), и волны от соседних зон приходят в точку Р в противофазе. В таком разбиении волновой поверхности суть оригинального метода Френеля, разработанного им в 1815–1819 гг. Этот метод (метод зон Френеля) позволил сильно упростить решение задач.

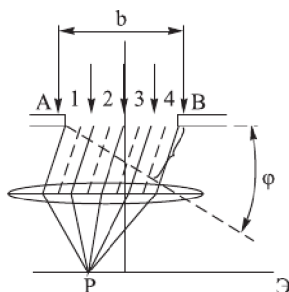


Рис. 18.14. Щель шириной b , разделенная на 4 полосы

После предварительного обзора рассмотрим дифракцию Фраунгофера от бесконечно длинной щели (для этого практически достаточно, чтобы длина щели была значительно больше ее ширины). Дифракционная картина есть интерференционная картина от огромного числа волн, испущенных практически непрерывно распределенными источниками. В соответствии со сказанным выше каждый элемент волновой поверхности является источником вторичных волн и вторичные волны когерентны. Для того чтобы выяснить характер интерференции вторичных волн, испущенных в разных направлениях, применяют упомянутый метод Френеля. Разбивают поверхность щели на n одинаковых зон (зон Френеля). У лучей света, падающего по нормали к плоскости щели, одна и та же фаза. Поэтому в центре экрана возникает светлое пятно. Лучи, идущие под углом, в итоге образуют интерференционную картину с чередующимися максимумами и минимумами света.

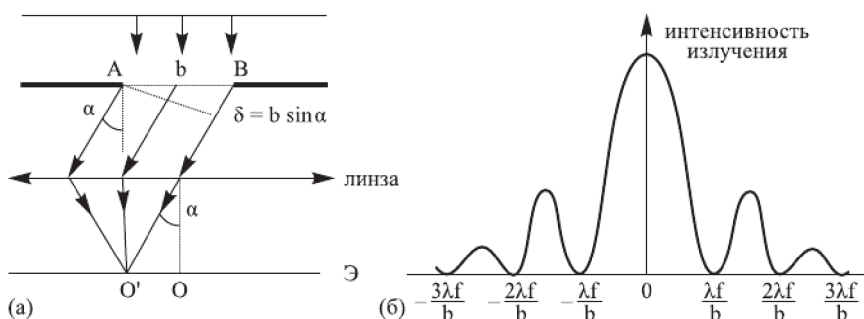


Рис. 18.15. Дифракция на одной щели: а) ход лучей; б) распределение интенсивности света (f — фокусное расстояние линзы)

На рис. 18.15, б показано распределение интенсивности света на экране в зависимости от расстояния до его центра. Основная часть световой энергии сосредоточена в центральном максимуме. При увеличении порядка максимума его

интенсивность быстро уменьшается. Расчеты показывают, что $I_0 : I_1 : I_2 = 1 : 0,047 : 0,017$.

Если щель освещена белым светом, то на экране центральный максимум будет белым (он общий для всех длин волн). Побочные максимумы будут состоять из цветных полос.

В. Дифракционная решетка. При дифракции на щели интенсивности побочных максимумов столь незначительны (см. выше), что не могут быть использованы для решения практических задач. Поэтому в качестве спектрального прибора используется *дифракционная решетка*, которая представляет собой систему параллельных равноотстоящих щелей. Дифракционную решетку можно получить нанесением *непрозрачных штрихов* (царапин) на плоскопараллельную стеклянную пластину. Пространство между штрихами (щели) пропускает свет. Штрихи наносятся на поверхность решетки алмазным резцом. Общее число щелей решетки обозначается N . Расстояние d между центрами или краями соседних щелей называют *постоянной (периодом)* дифракционной решетки.

Дифракционная картина на решетке определяется как результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей.

Первое описание дифракции в этом случае сделал шотландский математик и астроном Джеймс Грегори (1638–1675), который использовал в качестве решетки птичьи перья. А первую дифракционную решетку создал в 1786 году Дэвид Риттенгаус (1732–1796.) В первоначальном виде дифракционные решетки представляли собой подобие ресниц и состояли из параллельно натянутых тончайших проволок, до 20 штук, на одном миллиметре. Впоследствии для получения дифракционного спектра отражением стали изготавливать подобные решетки, нанося при помощи делительной машины на зеркальной металлической поверхности тончайшие параллельные бороздки до 800 на одном миллиметре (так что ширина гладких полосок, отражавших свет, равнялась $1/1600$ мм = $0,6$ мкм!).

Чтобы оценить тонкость этой работы, достаточно сказать, что усовершенствовавший изготовление подобных зеркальных решеток американский физик Генри Роуланд (1848–1901) помещал производившую нарезки делительную машину на дно глубокой шахты. В шахтах практически не изменяется температура. А чтобы температура не менялась от присутствия работника, машина приводилась в действие особым двигателем и все необходимые движения производила автоматически. Каждая бороздка требовала около 5 секунд времени. Вся решетка, имевшая 160 000 таких бороздок, изготавливалась в течение девяти суток, причем все это время машина работала без перерыва и без надзора!

Количество щелей определяет световой поток через решетку. Чем больше число щелей в дифракционной решетке (N), тем большее количество световой энергии проходит через решетку, тем более интенсивными и более острыми будут максимумы.

Хорошие современные решетки имеют до 2000 штрихов на 1 мм длины при общей длине, достигающей 120 мм. Таким образом, полное число штрихов решетки очень велико — до 250 000. Заметим, что нет заметной разницы в наблюдении дифракционной картины в проходящем и отраженном свете. Так, зеркальная поверхность компакт-диска представляет собой спиральную дорожку, шаг

которой соизмерим с длиной волны видимого света. На такой упорядоченной и мелкоструктурной поверхности в отраженном свете заметно проявляются дифракционные и интерференционные явления, что и является причиной радужной окраски создаваемых им бликов (рис. 18.16). Широкое использование дифракционная решетка получила у Й. Фраунгофера. В 1821 году он, впервые применив дифракционную решетку, получил дифракцию света. Это дало возможность измерить длину световой волны с точностью до 10^{-7} и положило начало спектроскопии.



Рис. 18.16. Дифракционная картина на поверхности компакт-диска

Спектроскоп и спектроскопия. Дифракционная решетка разлагает белый свет на составляющие, причем отклоняет свет с большей длиной волны (красный) на больший угол (в отличие от призмы, где все происходит наоборот). Основная формула дифракционной решетки позволяет определить длину волны света, измеряя угол φ , соответствующий положению k -го максимума.

Это свойство дифракционных решеток используется для определения спектрального состава света в приборах: дифракционных спектрографах, спектроскопах, спектрометрах.

Первыми появились спектроскопы (спектроскоп — от «спектр» и греч. *skopeo* — смотрю). В 1858 году М. Мейерштейн построил простейший оптический спектрометр. Спектрометр представляет собой комбинацию призмы,

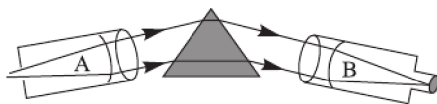


Рис. 18.17. Спектроскоп

разлагающую свет, и средства для наблюдения полученного спектра. Наиболее распространенный призматический спектроскоп состоит из двух труб, между которыми помещают трехгранную призму (рис. 18.17). В трубе А, называемой коллиматором, имеется узкая щель, ширину которой можно регулировать поворотом винта. Перед щелью помещается источник света, спектр которого необходимо исследовать. Щель располагается в фокальной плоскости коллиматора, и поэтому световые лучи из коллиматора выходят в виде параллельного пучка. Пройдя через призму, световые лучи направляются в трубу В, через которую наблюдают спектр. Если спектроскоп предназначен для измерений, то на изображение спектра с помощью специального устройства накладывается изображение шкалы с делениями, что позволяет точно установить положение цветовых линий в спектре.

В 1802 году английским физиком и химиком Уильямом Волластоном (1766–1828) были открыты линии поглощения на фоне непрерывного спектра звезд. Эти линии в дальнейшем в изобилии обнаружил Фраунгофер при спектроскопическом исследовании солнечного излучения. Он обнаружил темные линии, видимые при детальном рассмотрении на фоне непрерывного спектра (см. рис. 18.18). Всего Фраунгофер выделил и обозначил свыше 570 линий.

А затем за исследование спектров взялся Кирхгоф (1824–1887). Иногда в работе ему помогал его приятель Роберт Бунзен (1811–1899). Как-то их общий знакомый пошутил, что самым большим открытием Бунзена было «открытие»

Кирхгофа. В итоге в 1859 году Кирхгоф опубликовал в журнале «Ежемесячные сообщения Берлинской академии наук» небольшую статью «О фраунгоферовых линиях». В ней он писал: «В связи с выполненным мною совместно с Бунзеном исследованием спектров окрашенных пламен, благодаря которому стало возможным определить качественный состав сложных смесей по виду их спектров в пламени паяльной лампы, я сделал некоторые наблюдения, приводящие к неожиданному выводу о происхождении фраунгоферовых линий и позволяющие по ним судить о вещественном составе атмосферы Солнца и, возможно, также ярких неподвижных звезд...»

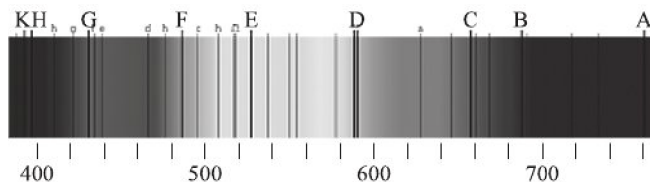


Рис. 18.18. Солнечный спектр с фраунгоферовыми линиями (Википедия)



Рис. 18.19. Густав Кирхгоф (слева) и Роберт Бунзен (справа)

Кирхгоф так объяснял наблюдения. В составе солнечного излучения имеется компонента, принадлежащая излучению натрия. При прохождении через атмосферу Земли она поглощается, и в спектре на месте желтой линии (натрия) появляется провал — темная линия. Немного времени прошло после открытия, сделанного Кирхгофом и Бунзеном, как в августе 1868 года французский астроном Пьер Жансен (1824–1907) во время солнечного затмения, которое он наблюдал в Индии, открыл в спектре солнечной короны желтую линию неизвестной природы. Два месяца спустя такую же линию наблюдал английский физик Джозеф Норман Локьер (1836–1920). Этот неизвестный элемент он назвал гелием, т. е. солнечным элементом. Оба ученых независимо друг от друга написали письма во Французскую академию. И, что удивительно, пришли эти письма туда одновременно. В честь этого события была выбита памятная золотая медаль: с одной стороны — профили Жансена и Локьера, а с другой — бог Аполлон на колеснице и надпись: «Анализ солнечных протуберанцев». На Земле гелий был открыт Уильямом Рамзеем в 1895 году в минералах тория.

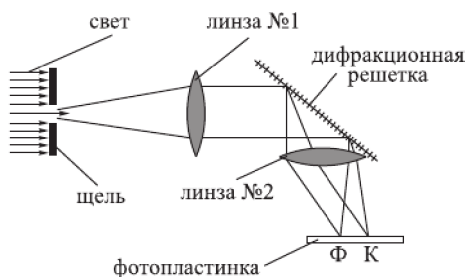


Рис. 18.20. Схема дифракционного спектрографа

При исследовании спектра часто бывает целесообразней сфотографировать его, а затем изучать с помощью микроскопа. Прибор для фотографирования спектров называется спектрографом. Дифракционный спектрограф устроен так же, как и призмный, но вместо призмы в нем стоит дифракционная решетка

(рис. 18.20). Свет, прошедший через щели и коллимирующие линзы, превращался в тонкий пучок параллельных лучей. Затем свет падает на дифракционную решетку. Изображение наблюдается через трубку со шкалой, накладываемой на спектральное изображение, или регистрируется на фотопластинке.

Современные спектрометры оснащены цифровыми камерами для просмотра в реальном времени, работают с компьютерами и коммутаторами, обладают встроенными охладителями и контрольными системами.

Максимум нулевого порядка (при $m = 0$ угол $\varphi = 0$) для всех длин волн наблюдается в одном месте: непосредственно в направлении первичного пучка (предполагается нормальное падение первичного пучка на решетку). При $m \neq 0$ каждой длине волны λ соответствует свой угол отклонения φ , что позволяет использовать дифракционную решетку в качестве спектрального прибора для определения длины волны.

В качественном спектральном анализе полученный спектр интерпретируют с помощью таблиц и атласов спектров элементов и индивидуальных соединений; в количественном спектральном анализе определяют содержание исследуемого вещества по относительной или абсолютной интенсивностям линий или полос в спектрах. Исследование спектров имело большое значение для понимания природы атомов, о чем будет рассказано в части 30.

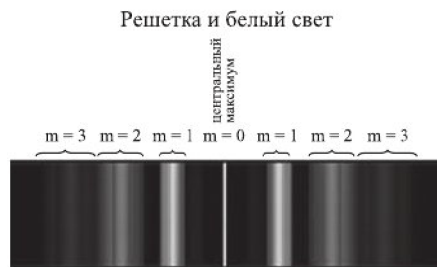


Рис. 18.21. Спектр, полученный на дифракционной решетке

Поляризация. При изучении явлений интерференции и дифракции вопрос о том, являются ли световые волны продольными или поперечными, имел второстепенное значение. В то время казалось невероятным, что свет — это поперечные волны, так как по аналогии с механическими волнами пришлось бы предполагать, что эфир — это твердое тело (поперечные механические волны не могут распространяться в газообразной или жидкой среде). Открытию поляризованных световых волн предшествовали работы многих ученых. В 1669 году датский ученый Эразм Бартолин (1695–1698) сообщил о своих опытах с кристаллами известкового шпата (CaCO_3), чаще всего имеющими форму правильного ромбоэдра, которые привозили возвращающиеся из Исландии моряки. Он с удивлением обнаружил, что луч света при прохождении сквозь кристалл расщепляется на два луча (называемых теперь обыкновенным и необыкновенным). Бартолин провел тщательные исследования обнаруженного им явления двойного лучепреломления, однако объяснения ему дать не смог.

В 1808 году французский физик Этьен Луи Малюс (1775–1812), глядя сквозь кусок исландского шпата на блестящие в лучах заходящего солнца окна Люксембургского дворца в Париже, к своему удивлению, заметил, что при определенном положении кристалла было видно только одно изображение. На основании этого и других опытов и опираясь на корпускулярную теорию света Ньютона, он предположил, что корпускулы в солнечном свете ориентированы беспорядочно, но после отражения от какой-либо поверхности или прохождения сквозь

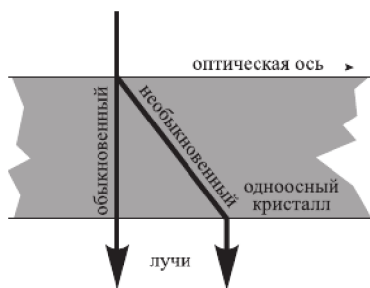


Рис. 18.22. Двойное лучепреломление

анизотропный кристалл они приобретают определенную ориентацию. Такой «упорядоченный» свет он назвал поляризованным.

В дальнейшем было обнаружено, что, пропуская через две одинаковые пластинки из турмалина (прозрачное кристаллическое вещество зеленоватой окраски) свет, можно было менять его интенсивность в зависимости от угла поворота одной пластины относительно другой. Когда один кристалл повернется на 90° относительно другого, свет не проходит вовсе.

Так что турмалин действует подобно щели,

которая пропускает луч только с подходящей поляризацией. Интенсивность прошедшего света оказалась пропорциональной квадрату косинуса угла поворота (закон Малюса).

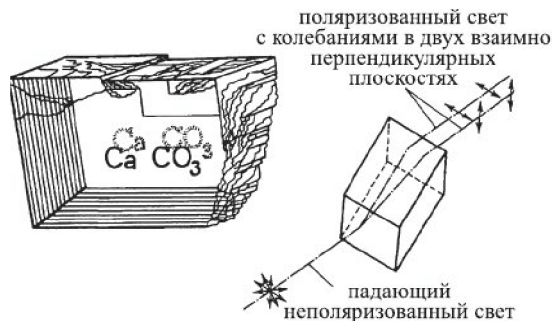


Рис. 18.23. Поляризация и двойное лучепреломление света в кристалле кальцита

Две совершенно одинаковые пластинки из слегка затемненного стекла или гибкого пластика, сложенные вместе, практически прозрачны. Но стоит повернуть какую-нибудь одну на 90° , как перед глазом окажется сплошная чернота. Это может показаться чудом: ведь каждая пластинка прозрачна при любом повороте. Однако внимательный взгляд обнаружит, что при определенных углах ее поворота блики от воды, стекла и полированных поверхностей исчезают. Это же можно наблюдать, рассматривая экран компьютерного ЖК-монитора через пластинку: при ее повороте яркость экрана меняется и при определенных положениях гаснет совсем. Виновник всех этих (и многих других) любопытных явлений — поляризованный свет. Поляризация — это свойство, которым могут обладать электромагнитные волны, в том числе видимый свет (Наука и жизнь. № 5. 2008).

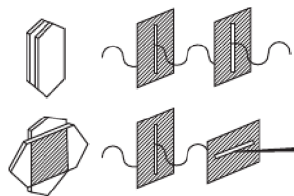


Рис. 18.24. Аналогия между гашением света в кристаллах турмалина и гашением колебаний при помощи двух щелей

Это «гашение» света объясняется поляризацией поперечных колебаний и может быть проиллюстрировано в опытах со шнуром, который ранее часто использовался нами для объяснения эффектов, возникающих при механических колебаниях. Если пропустить шнур через узкую щель в пластинке и раскачивать конец шнура, то по шнуру побежит поперечная волна, которая будет свободно распространяться, когда щель

совпадет с плоскостью колебаний, и тотчас же прекратится, если щель повернуть поперек плоскости колебаний. Если за первой пластинкой поставить вторую такую же, то и в этом случае волна будет распространяться свободно, когда щели лежат параллельно и совпадают с плоскостью колебаний шнура, и будет «гаснуть», если щели расположены накрест. Возвращаясь снова к кристаллам турмалина, следует представить себе, что свет, проходя через первый кристалл, приобретает свойство проходить только через определенно ориентированный кристалл, т. е. свет поляризуется, или, иначе, приобретает полярность (рис. 18.25). Такие тела, которые производят поляризацию, называются поляризаторами, а свойство некоторых веществ вращать плоскость проходящего через них света называется оптической активностью. Поляризация происходит не только при прохождении света через кристалл, но и при отражении от неметаллических поверхностей — стекла, воды и т. д. Если свет падает под углом полной поляризации, он поляризуется полностью. Углом полной поляризации называется угол, тангенс которого равен показателю преломления вещества, от поверхности которого свет отражается; например, для воды этот угол составляет 53° . Поэтому если сквозь поляризатор рассматривать блики, отраженные от воды, стекла и т. п., то при определенной ориентации поляризатора блики гаснут целиком или частично.

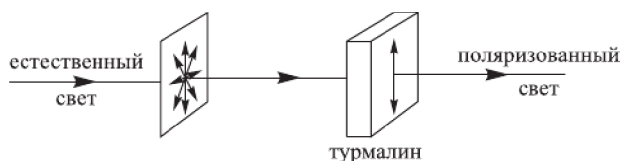


Рис. 18.25. Поляризация света при прохождении через турмалин

Брюстер (1781–1868), который открыл угол полной поляризации при отражении (угол Брюстера), кроме линейной установил существование круговой и эллиптической поляризации. Это свойство поляризаторов находит применение в фотографии, только вместо кристалла, который редко встречается таких больших размеров, чтобы покрыть зрачок объектива, применяют искусственный поляризатор — поляроид, представляющий собой множество игольчатых микроскопических кристаллов, расположенных вплотную один к другому и закрепленных в слое тонкой прозрачной пленки.

Во время своих экспериментов по поляризации света Дэвид Брюстер обратил внимание, что осколки стекла, помещенные в трубу с зеркалами, создают чудесные симметричные узоры, отражаясь в зеркалах. При поворачивании трубки вокруг продольной оси цветные элементы, находящиеся между зеркалами, отражаются и создают меняющиеся симметричные узоры. Узор менялся в зависимости от того, под каким углом зеркала располагались друг к другу, а также от того, какое количество зеркал использовалось. После публикации написанного Брюстером «Трактата о калейдоскопе» (1816 г.) изобретение стало чрезвычайно популярным, хотя в начале своего существования калейдоскоп не считался игрушкой, создавался Брюстером как научный прибор. Калейдоскопом (от греч. *καλός* — красивый, *εἶδος* — вид, *σκοπέω* — смотрю, наблюдаю) сразу увлеклась вся Европа. Баснописец А. Измайлов писал о нем в журнале «Благонамеренный» за 1818 год:

Смотрю — и что ж в моих глазах?
В фигурах разных и звездах
Сапфиры, яхонты, топазы,

И изумруды, и алмазы,
И аметисты, и жемчуг,
И перламутр — все вижу вдруг!
Лишь сделаю рукой движение —
И новое в глазах явление!

Известно, что в продольной волне все направления в плоскости, перпендикулярной лучу, равноправны. В поперечной волне (например, в волне, бегущей по резиновому жгуту) направление колебаний и перпендикулярное ему направление не равноправны. Если колебания происходят вертикально, то это значит, что распространяются волны, колебания которых происходят вверх и вниз, то есть свет поляризован вертикально. Если же мы говорим, что свет поляризован горизонтально, то под этим подразумеваем, что колебания происходят вправо и влево под прямым углом к линии распространения света. Естественный свет, испускаемый любым источником — солнцем, электрической лампой, газовой горелкой и т. д., — не поляризован, то есть он состоит из колебаний, которые не направлены специально ни в вертикальном, ни в горизонтальном, ни в каком-либо другом направлении. Эти световые колебания распространяются во всевозможных плоскостях, перпендикулярных к линии направления света. Для получения поляризованного света и его обнаружения существуют специальные физические приборы, называемые в первом случае поляризаторами, а во втором — анализаторами. Обычно они устроены одинаково. Невооруженным взглядом поляризацию увидеть нельзя, но ее можно увидеть через поляризационный фильтр, который чувствителен к этим поперечным колебаниям. Поляризованный свет нашел применение: регулировка освещенности, гашение зеркальных бликов при фотографировании, предупреждение ослепления водителя встречным транспортом, наблюдение ярких источников света в астрономии (например, солнечной короны), в геологии и ряде других областей науки и техники.

Поляризация света служит еще одним подтверждением его волновой природы. Явление поляризации показывает, что свет представляет собой поперечные волны, тем самым опровергая тезис о необходимости существования светящегося эфира с его упругими свойствами.

Рассеяние света. Этот эффект связан с рассеянием волн оптического диапазона и заключается в изменении пространственного распределения, частоты, поляризации оптического излучения при его взаимодействии с веществом. Часто рассеянием света называют только преобразование углового распределения светового потока, обусловленное пространственными неоднородностями показателя преломления среды и воспринимаемое как ее несобственное свечение, например при визуализации лучей света в пыли.

В 1869 году ирландский физик и инженер Джон Тиндаль (1820–1893) открыл рассеяние света малыми частицами при его прохождении через неоднородную среду. Этот эффект возникает при рассеянии на взвешенных частицах, размеры которых превышают размеры атомов в десятки раз. В результате опытов Тиндаль выяснил, что при пропускании через мутную среду белого света, например солнечных лучей, который содержит полный цветовой спектр, свет в синей части спектра частично рассеется, в то время как интенсивность зелено-желто-красной части света останется практически прежней. Поэтому, если смотреть

на рассеянный свет после прохождения им замутненной среды в стороне от источника света, он покажется нам синее, чем исходный свет.

Можно было подумать, что небо кажется нам сине-голубым благодаря эффекту Тиндала, но это не так. В отсутствие облачности или задымления небо окрашивается в сине-голубой цвет. И происходит это благодаря рассеянию «дневного света» на молекулах воздуха. Такой тип рассеяния называется рассеянием Рэлея (в честь сэра Рэлея). В 1871 году Дж. Рэлей (1842–1919) установил закон рассеяния света средой на объектах, размеры которых меньше его длины волны. Он получил, что интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна 4-й степени длины волны (закон Рэлея). Рассеяние света связано с вынужденными колебаниями атомных электронов в поле падающей световой волны и хорошо объясняется в квантовой механике.

При рассеянии Рэлея синий и голубой свет рассеивается даже сильнее, чем при эффекте Тиндала: например, синий свет с длиной волны 400 нм рассеивается в чистом воздухе в девять раз сильнее красного цвета с длиной волны 700 нм. Вот почему небо кажется нам синим — солнечный свет рассеивается во всем спектральном диапазоне, но в синей части спектра почти на порядок сильнее, чем в красной.

Так как синий свет виден повсюду над головой, то и небо выглядит голубым. Кстати, еще сильнее рассеиваются ультрафиолетовые лучи, обуславливающие солнечный загар. Именно поэтому загар распределяется по телу достаточно равномерно, охватывая даже те участки кожи, на которые не попадают прямые солнечные лучи.

И еще. Если посмотреть в сторону горизонта, то небо будет иметь более бледный оттенок. Это является результатом того, что свет проходит там большее расстояние в атмосфере до наблюдателя. Рассеянный свет снова рассеивается атмосферой, и меньше голубого цвета достигает глаз наблюдателя. Поэтому цвет неба у горизонта кажется бледнее или даже кажется совсем белым.

Небо вокруг заходящего солнца может быть окрашено в разные цвета. Наиболее красивым небо бывает тогда, когда воздух содержит множество маленьких частиц пыли или воды. Эти частицы отражают свет во всех направлениях. В этом случае происходит рассеяние более коротких световых волн. Наблюдатель видит световые лучи более длинных волн, и поэтому небо кажется красным, розовым или оранжевым.

На этом мы заканчиваем путешествие в область света. Впереди длительный поход в электричество — один из самых важных с точки зрения практики разделов физики. «Кто действительно хочет понять все величие нашего времени, тот должен познакомиться с историей науки об электричестве. И тогда он узнает сказку, которой нет и среди сказок «Тысячи и одной ночи» (Н. Тесла. «Сказка об электричестве»).

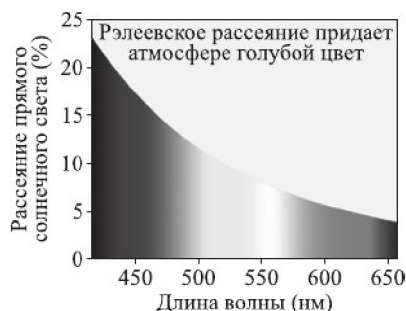


Рис. 18.26. Отношение интенсивности рассеяния солнечного света атмосферой для различных длин волн (Википедия)

В необъятном мире электричества

Сказка, которой не сыщется и среди сказок «Тысячи и одной ночи». Долгая история электричества. Гениальные прозрения и воплощение результатов теории в практику.

19. Долгая история электричества. Электроскоп. Закон Кулона. Электрическое поле. Проводники в электрическом поле. Движение заряженной частицы в электрическом поле. Потенциал. Эквипотенциальные поверхности. Электрическое поле Земли.

История науки об электричестве началась давно. Начало исследованиям в области электрических явлений положил лейб-медик королевы Елизаветы — Тюдор Уильям Гилберт (1544–1603). В 1600 году Гилберт издал большой трактат по магнетизму, в котором объясняется действие магнитного компаса и описываются некоторые опыты с наэлектризованными телами. Гилберт впервые применил термин *электрические явления*: он заметил, что многие тела, так же как и янтарь, после натирания могут притягивать маленькие предметы (а такое свойство янтаря обнаружил еще Фалес Милетский за 600 лет до н. э.), и в честь этого вещества назвал подобные явления электрическими (от лат. *Electricus* — «янтарный»). Гилберт также нашел, что многие тела «не притягивают и не возбуждаются



Рис. 19.1. Уильям Гилберт демонстрирует опыты королеве Елизавете I (картина XIX в.)

никакими натираниями». К числу их относятся ряд драгоценных камней и металлы: «серебро, золото, медь, железо, также любой магнит». Тела, обнаруживающие способность притяжения, Гилберт назвал электрическими; тела, не обладающие такой способностью, — неэлектрическими. Гилберт считается изобретателем первого научного электроскопа. Это произошло примерно в 1600 году. Его прибор, которому он дал название «версориум», представлял собой металлическую легкую стрелку, которая могла вращаться на оси.

Не оставил своим вниманием электрические явления и автор «Начал». И. Ньютон в 1675 году наблюдал электрическую пляску кусочков бумаги: при натирании стекла бумажки притягивались к нему, затем отскакивали, вновь притягивались и т. д. В 1716 году он наблюдал искровой разряд между острием иглы и наэлектризованным телом. «Искра напомнила мне о молнии в малых, очень малых размерах», — писал Ньютон.

Эксперименты по электричеству проводили и другие члены Лондонского королевского общества. Это были очень увлекательные и эффектные опыты. Так,

Стивен Грей (1670–1736), из семьи красильщиков и сам зарабатывавший на жизнь как красильщик, заинтересовался тайнами электричества. Его работы по электричеству произвели такое большое впечатление на профессоров Кембриджа, что в возрасте сорока одного года он был принят в новую обсерваторию Тринити-колледжа. Там он открыл явление электропроводимости тел и показал, что для сохранения электричества тело должно быть изолировано. В апреле 1730 года Грей построил толстую деревянную раму, в которой с помощью крепких шелковых веревок подвесил мальчика весом в сорок семь фунтов. Все части тела ребенка были покрыты непроводящей одеждой, свободными оставались только голова и руки. Когда Грей дотронулся до спины мальчика голыми пальцами, наэлектризованным стеклом, электричество дошло до головы мальчика (его волосы встали дыбом) и пошло по его вытянутым рукам. Висящий мальчик, прикасаясь к другому человеку, стоявшему на проводящем материале, передавал ему электрический заряд. Так Грей демонстрировал наличие «электрической силы». На этот эксперимент Грея последовала такая реакция немецкого физика Георга Маттиаса Бозе:

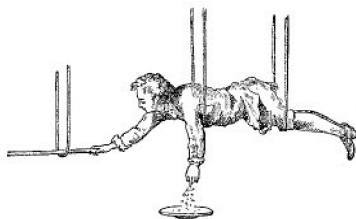


Рис. 19.2. Опыт Грея: электризация человека, подвешенного на волосяных петлях

Безумный Грей, что знал ты, в самом деле,
О силе той, неведомой доселе?
Разрешено ль тебе, безумец, рисковать
И человека с электричеством связать?

Электричество. Электрический заряд и электрическое поле. На опыты Грея, опубликованные в 1731 и 1732 гг., обратил внимание французский естествоиспытатель Шарль Франсуа де Систерне Дюфэ (1698–1739). Ему принадлежит честь создания первой теории электрических явлений. Он открыл два рода электрического заряда: «стеклянный» и «смоляной» (сейчас их называют положительным и отрицательным); первым исследовал электрические взаимодействия и доказал, что одноименно наэлектризованные тела отталкиваются друг от друга, а разноименно — притягиваются.

После исследований Грея и Дюфэ все тела стали делить на проводники и непроводники, по терминологии, введенной (1742) английским ученым французского происхождения Жаном Теофилом Деагюлье (1683–1744 гг.). Большую роль в исследовании электрических явлений сыграл электроскоп. Электроскоп (от греч. слов «электрон» и «скопео» — наблюдать, обнаруживать) состоит из металлического стержня, пропущенного через диэлектрическую пробку, и подвешенных к нему двух лепестков из металлической фольги. Впервые такой электроскоп с золотыми листочками создал в 1787 году английский священник и физик Абрахам Беннет (1749–1799). А. Вольта указывал на работу Беннета как на имевшую ключевое влияние на его собственные исследования.

При прикосновении к стержню заряженным телом листочки оказываются одноименно заряженными и отклоняются друг от друга. По величине угла расхождения лепестков электроскопа или по углу отклонения стрелки электрометра (см. ниже) можно судить об относительной величине электрического заряда.

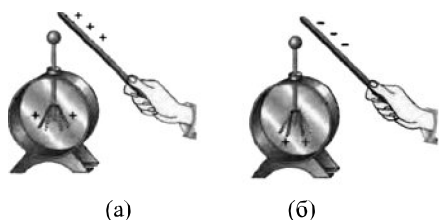


Рис. 19.3

Электроскоп, как физический прибор, сыграл важную роль на ранних этапах изучения электричества, в настоящее время применяется в демонстрационных и учебных целях.

Простейший школьный электроскоп изображен на рис. 19.3. В нем металлический стержень с листочками пропущен через пластмассовую пробку, вставленную в металлический корпус. Корпус с обеих сторон закрыт стеклами. Если к незаряженному электроскопу поднести, например, заряженную эбонитовую палочку, то его лепестки разойдутся. По отклонению листочков электроскопа можно определить также, увеличился или уменьшился его заряд. Чем больше угол, на который разойдутся листочки электроскопа при его электризации, тем сильнее он наэлектризован. Значит, тем больший электрический заряд на нем находится. Если к положительно заряженному электроскопу поднести тело, заряженное таким же знаком, как электроскоп, то его листочки разойдутся сильнее. Приближая к электроскопу тело, заряженное противоположным по знаку зарядом, заметим, что угол между листочками электроскопа уменьшится. Таким образом, заряженный электроскоп позволяет обнаружить, каким зарядом наэлектризовано то или иное тело.

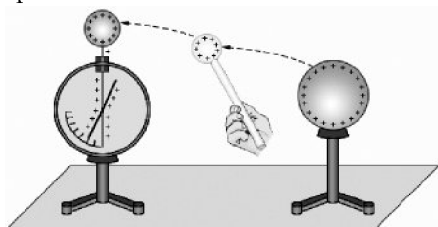


Рис. 19.4. Перенос заряда с заряженного тела на электрометр



Рис. 19.5. Опыт в Лейдене

Существует еще один вид электроскопа — электрометр. В нем вместо лепестков на металлическом стержне укреплен стрелочка. Она, заряжаясь от стержня, отталкивается от него на некоторый угол. Угол отклонения можно отметить на шкале и сравнивать относительные величины зарядов уже по фиксированным значениям.

Интерес к новым явлениям до середины семнадцатого века был ограничен лишь научными кругами, а далее распространился среди широкой публики, которая приходила в изумление от увиденного. Правда, все эти поразительные эффекты вызывались весьма простыми средствами: стеклянной палочкой, натертой сухим мехом, вращающимися стеклянными шарами и цилиндрами, трущимися о ладони человека, изолированного от пола.

Результатом такой популяризации электрических опытов было открытие явления, реализуемого в «лейденской банке», как ее назвал французский физик Жан Нолле (1700–1770). А изобретен этот прибор голландским ученым Питером ван Мюшенбруком в 1745 году в Лейдене (отсюда название). Она представляла собой банку, в которую наливали воду. Сквозь крышку в банку был воткнут металлический стержень. При заряджении ее обхватывали ладонями и натирали. Лейденская

банка позволяла накапливать и хранить сравнительно большие заряды. Вот с такой банкой впервые испытал удар от разряда банки лейденский ученик Мушенбрука Кюнеус. Описывая свой опыт, Мушенбрук писал: «...В правой руке я держал сосуд, левой же пробовал извлечь искры из наэлектризованного прута. Вдруг моя правая рука была поражена с такой силой, что все тело содрогнулось, как от удара молнии...» Далее он писал: «Я не согласился бы подвергнуться еще раз такому испытанию даже за королевский трон Франции».

С лейденской банкой стали производить разнообразные опыты не только в лабораториях, но и на публике. А дальше изготовление таких банок приняло большой размах. Так, Джон Касбертсон, английский инструментальщик, живший в Амстердаме, изготовил в 1770 году электрическую батарею из 135 лейденских банок. С лейденской банкой стали производить разнообразные опыты не только в лабораториях, но и на публике.

В Версале в присутствии короля и придворных аббат Нолле выстраивает кольцом 180 мушкетеров. Велит им взяться за руки, а крайним предлагает прикоснуться к электродам лейденской банки, заряженной от электрической машины. «Было очень курьезно видеть, — пишет очевидец, — разнообразие жестов и слышать вскрик, исторгаемый неожиданно у большей части получающих удар». Еще больший интерес появился в его глазах, когда почтенный аббат поставил рядом с невинной банкой клетку с беззаботно порхающим воробьем. Вот подсоединены контакты. Банка заряжена. Наступил момент, когда птичка слишком близко приблизилась к предательским контактам. Проскочила голубая искра, раздался треск, и несчастная пичуга упала на пол клетки бездыханной. Но не только убивали бедных птиц. В газетах писали о чудесных исцелениях паралича благодаря электрическим ударам.

Опыты с лейденской банкой повторяли в аристократических салонах и в ярмарочных балаганах. Их проводили в Англии и Италии, в России (Рихман, Ломоносов), Америке (Франклин).

В середине восемнадцатого века изучением электрических явлений занялся Бенджамин Франклин — единственный из отцов-основателей, скрепивший своей подписью все три важнейших исторических документа, что лежат в основе образования Соединенных Штатов Америки как независимого государства. Б. Франклину было 40 лет, когда он занялся вопросами электричества. Толчком к этому послужила увиденная им в 1744 году демонстрация в Бостоне шотландским торговцем опыта с «электрическим мальчиком». Следующей осенью его приятель из Лондона Коллинсон отправил ему некоторые электрические приборы и труды ученых по электричеству. Так началось увлечение Франклина электричеством. И, что немаловажно, ко всему прочему в этот момент времени он был состоятельным



Рис. 19.6. Салонные опыты с электричеством (А. Томиллин. «Мир Электричества»)

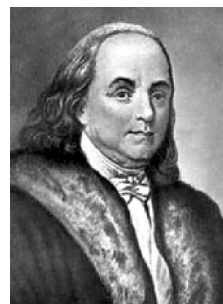


Рис. 19.7. Бенджамин Франклин (1706–1790)

человеком и располагал достаточным временем для занятий научной работой. Франклин провел множество опытов, чтобы установить, где сосредоточена «сила банки» — в стекле или в обкладках? И он доказал, что «сила банки» и ее способность «давать потрясения... заключаются в самом стекле», а с помощью обкладок электричество «сообщается и уходится». Убедившись в том, что «сила банки» — в стекле, Франклин решил создать новый вид банки, состоящей из «больших оконных стекол». Он назвал ее электрической батареей, впервые введя, таким образом, термин, широко используемый в современной электротехнике. Можно сказать, что с его легкой руки в практику вошли термины «заряд» и «разряд». Созданная им батарея состояла из одиннадцати больших оконных стекол с приклеенными с каждой стороны стекла тонкими свинцовыми пластинками. Такая батарея, получившая название «франклиновые доски», позволила накапливать значительные заряды. При проведении исследований с банкой Б. Вильсоном в 1746 году было установлено, что количество электричества, собираемое в банке, пропорционально размеру обкладок и обратно пропорционально толщине изоляционного стоя. В 70-х гг. XVIII века металлические пластины стали разделять не стеклом, а воздушным промежутком — так, появился простейший конденсатор.

Франклин развил теорию электричества введя понятие «одной жидкости» (не напоминает ли это теорию теплорода?). На основе этой теории положительный заряд рассматривался как избыток «электрической жидкости» против ее нормального содержания в данном объекте, а отрицательный — как ее недостаток. Важно его утверждение, что когда в результате какого-либо процесса в одном теле возникает некоторый заряд какого-либо знака, то одновременно такое же количество заряда противоположного вида возникает в другом теле.

При контакте тел (например, при натирании стеклянной палочки шерстью) происходит разделение зарядов, но их сумма (алгебраическая) равна нулю. Иными словами, суммарный электрический заряд, образующийся в результате любого процесса, равен нулю. Отклонение от этого закона никогда не наблюдалось.

Опыты Франклина вызывали живейший интерес. Любопытные соседи и незнакомцы приходили поглазеть, как он производит электричество в разнообразных опытах. Однажды Франклин написал своему другу в Лондоне: «Даже если нет никакого другого применения электричества, все равно это открытие значительно хотя бы тем, что оно может научить самоуверенных людей смирению».

Работы Бенджамина Франклина стимулировали исследования А. Вольты, которому принадлежит «создание прибора, который по своим действиям сходен с лейденской банкой..., но который, однако, действует непрерывно, то есть его заряд после каждого разряда восстанавливается сам собой». До создания своего знаменитого прибора Вольта проверял разные металлы, измеряя их электрический заряд чувствительным электроскопом собственного изобретения. При этом он обнаружил, что электрический заряд, положительный или отрицательный, был заметнее, когда его пальцы касались металла, из чего он заключил, что это происходит из-за воздействия соленой влаги. Необходимо отметить, что на создание своего аппарата помимо работ Гальвани (о которых речь ниже), воз-



Рис. 19.8.
А. Вольта

можно, Вольтта подвигла неожиданно подвернувшаяся ему книжка швейцарского врача Жан-Жака Зюльцера, который писал: «Если два куска металла, один оловянный, другой серебряный, соединить таким образом, чтобы оба края их были на одной плоскости, и если приложить их к языку, то в последнем будет ощущаться некоторый вкус, довольно похожий на вкус железного купороса, в то же время каждый кусок металла в отдельности не дает и следа этого вкуса...» Вольтта своим языком и ощущает, как он пишет «вкус электричества». На середину языка он кладет золотую монету или серебряную ложку, а к кончику языка прикладывает чистую оловянную пластинку и приводит ее в контакт с монетой или ложкой. При этом он ощущает «такой же кисловатый вкус, что и при приближении языка к кончику искусственно наэлектризованного проводника...» Так, в 1799 году А. Вольтта описывал путь, проделанный им при создании своей электрической батареи — великого изобретения, резко изменившего весь ход электрических исследований.

Итак, А. Вольтта опустил в банку с кислотой две пластинки цинковую и медную) и соединил их проволокой. После этого цинковая пластина начала растворяться, а на медной стали выделяться пузырьки газа. Вольтта предположил и показал, что по проволоке протекает электрический ток. Так был изобретен «элемент Вольтта» — первый гальванический элемент. Для удобства Вольтта придал ему форму вертикального цилиндра (столба), состоящего из соединенных между собой колец цинка, меди и сукна, пропитанных кислотой. «Вольтов столб» высотой в полметра развивал напряжение, чувствительное для человека.

Опытам Вольтта предшествовали многолетние исследования Луиджи Гальвани (1737–1798). Гальвани занимался анатомией и физиологией. В 1791 году в «Трактате о силах электричества при мышечном движении» было описано сделанное Гальвани знаменитое открытие. В своих опытах Гальвани использовал препараты — задние лапы лягушки, соединенные с позвоночником. Он подвешивал препарат задних лап лягушки к цинковой стойке на медном крючке. Когда лапа лягушки касалась цинковой стойки, мышцы лягушки сокращались. Ученый предположил, что эти сокращения вызваны наличием в лапах лягушки электрического тока. Увы, его предположение было неверным. Этот факт правильно объяснил А. Вольтта, доказав, что сокращение мышц конечности лягушки вызывается электрическим током, который возникает при соприкосновении двух металлов — цинка и меди. Сами явления, открытые Гальвани, долгое время в учебниках и научных статьях назывались «гальванизмом». Этот термин доньше сохраняется в названии некоторых аппаратов и процессов.

А. Вольтта подготовил создание электрической машины в 1775 году, основанной на новом принципе, назвав ее электрофором.

В результате трения щеток о диски на кондукторах машины накапливаются заряды противоположного знака. Электрофор Вольты послужил основой для сооружения целого класса индукционных, так называемых «электрофорных», машин. Этот прибор и поныне присутствует в школьных физических кабинетах.

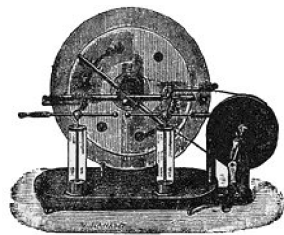


Рис. 19.9.
Электрофор Вольты

Однако до начала подлинной эры электричества было еще далеко. Несомненно, что решающий шаг на этом пути совершил Кулон.

Закон Кулона. Основной закон электростатики — закон Кулона — имеет большую предысторию, и еще неизвестно, кому следует отдать приоритет в его открытии (см. «На кого упало яблоко»). Для исследования взаимодействия точечных электрических зарядов Кулон (1736–1806) применил сконструированные им крутильные весы. Сам Кулон занимался исследованием кручения нитей, поэтому для исследования силы взаимодействия заряженных шариков обратился к конструированию крутильных весов. Ранее Кавендиш применил крутильные весы для гравитационных измерений и определения гравитационной постоянной (см. с. 66).

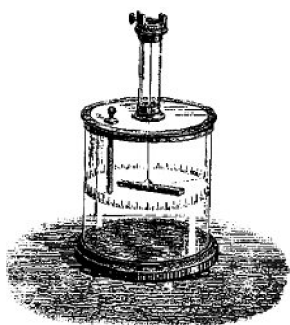


Рис. 19.10. Крутильные весы Кулона (А. Томилин. «Мир электричества»)

Основной принцип крутильных весов — подвеска подвижной системы прибора на тонкой упругой нити или ленте. Кулон с помощью крутильных весов, имевших огромную точность (эти весы имели столь тонкую нить, что углу в 1° соответствовала сила в 10^{-11} Н), непосредственно измерял силу взаимодействия между электрическими зарядами.

При этом он установил, во-первых, что *сила взаимодействия между точечными зарядами (точечность зарядов — расстояние между заряженными телами много больше их размеров) обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними*. Эта сила будет силой отталкивания, если заряды одноименные, и силой притяжения, если заряды разноименные.

Во-вторых, Кулон ввел понятие *количества электричества* и определил, что *сила взаимодействия между зарядами пропорциональна их величине*.

Его опыты и выводы из них опубликованы им в 1782–1785 гг. в семи мемуарах.

Закон Кулона звучит так: *сила взаимодействия F между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, пропорциональна зарядам q_1 и q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:*

$$F = kq_1q_2/r^2,$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц. Сила F направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды, т. е. является центральной, и соответствует притяжению ($F < 0$) в случае разноименных зарядов и отталкиванию ($F > 0$) в случае одноименных зарядов (как показано на рис. 19.11).

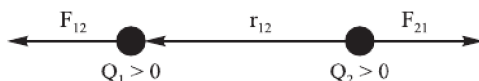


Рис. 19.11. Закон Кулона: сила взаимодействия F между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, пропорциональна зарядам Q_1 и Q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними

Кулоновские силы, как и гравитационные силы, подчиняются третьему закону Ньютона: $F_{1,2} = -F_{2,1}$. Вектор силы $F_{2,1}$, действующей со стороны второго заряда на первый, направлен в сторону второго заряда, если заряды разных знаков, и в противоположную, если заряды одного знака. В векторной форме закон Кулона записывается так: $\mathbf{F}_1 = (kq_1q_2/r_{12}^2)\mathbf{r}_{12}/r_{12} = -\mathbf{F}_2$, где \mathbf{r}_{12}/r_{12} — единичный вектор, направленный от положительного заряда к отрицательному.

Если заряженное тело взаимодействует одновременно с несколькими заряженными телами, то результирующая сила, действующая на данное тело, равна векторной сумме сил, действующих на это тело со стороны всех других заряженных тел.

Кулон проводил опыты с заряженными металлическими шариками. Он тогда не знал, что заряды связаны с элементарными частицами вещества и не зависят, какое это тело. Тем не менее на основании всех своих экспериментов он приходит к выводу, что вся совокупность фактов, найденных в области электричества, может быть связана воедино только при условии принятия гипотезы о существовании двух видов электричества, а поэтому двух сортов частиц неведомой электрической жидкости. Он эти частицы называет «молекулами электричества». Далее он исследовал перераспределение зарядов при соприкосновении заряженных тел. Кулон находит, что заряды распределены поровну, если сферы имеют одинаковые радиусы. Таким образом, Кулон, измеряя силу взаимодействия заряженных шариков, пришел к закону взаимодействия электрических зарядов — «количеств электричества».

Закон Кулона является фундаментальным законом природы, и хотя он прост по форме, но глубок по содержанию. Закон Кулона является первым открытым количественным, сформулированным на математическом языке законом для электромагнитных явлений. С открытия закона Кулона началась современная наука об электромагнетизме. Открытие закона Кулона впервые позволило рассматривать заряд как определенное количество — измерять его. Для этого надо располагать единицей измерения. Эту единицу и дает возможность установить закон Кулона.

В честь выдающегося французского ученого была названа единица электрического заряда — кулон (Кл), введенная в практику в 1881 году. В системе СГС, где в качестве базовых единиц взяты см, г, с (отсюда название), единица заряда выводится именно из закона Кулона: 1 ед. СГС — *такой заряд, который действует на равный ему по величине другой заряд на расстоянии 1 см с силой в 1 дин (дину)*. 1 дина = г · см/с². Здесь $k = 1$. Современное определение этой единицы в системе СИ приведем в дальнейшем.

Электрическое поле. Основные характеристики. Закон Кулона — это математическое выражение закона взаимодействия зарядов. Однако оно не раскрывает физической картины самого процесса взаимодействия, не отвечает на вопрос о том, каким путем осуществляется действие заряда q_1 на заряд q_2 . Такая же ситуация имела место и с законом всемирного тяготения. Ответ на этот вопрос давала теория дальнего действия, которая утверждала, что электрические заряды обладают способностью мгновенно действовать друг на друга на расстоянии. Однако теория дальнего действия со временем была отвергнута и ее место заняла теория ближнего действия, созданная на основе работ английского физика Майкла Фарадея (1791–1867). Эта теория объясняет взаимодействие электрических заря-

дов тем, что вокруг каждого электрического заряда существует электрическое поле. Электрическое поле заряда — материальный объект, оно непрерывно в пространстве и способно действовать на другие электрические заряды.

Фарадей считал, что дальнего действия не существует, электрические и магнитные силы распространяются по кривым линиям, их конфигурация зависит от свойств среды, через которые они распространяются (близкодействие). В 1851 году Фарадей четко формулирует идею магнитного поля, разрабатывает методику его измерения и изображения с помощью силовых линий. Фарадей увидел в картине силовых линий эффективное средство для отображения свойств этого поля. Он писал: «Под магнитными кривыми я понимаю линии магнитных сил, хотя и искаженные соседством полюсов; эти линии вырисовываются железными опилками; к ним касательно располагались бы весьма небольшие магнитные стрелочки».

И в дальнейших своих работах Фарадей на языке силовых линий поля формулирует закон электромагнитной индукции (см. далее).

По мнению Альберта Эйнштейна, идея поля была самой оригинальной идеей Фарадея и самым важным открытием со времен Ньютона. «Надо иметь могучий дар научного предвидения, — писал Эйнштейн, — чтобы распознать, в описании электрических явлений не заряды и частицы..., а скорее пространство между зарядами и частицами». Для Фарадея поле — это то, что излучается, распространяется, взаимодействует с веществом. Именно благодаря его работам в науку входит понятие о еще одной, кроме вещества, форме материи — поле. Согласно представлению теории близкодействия взаимодействие электрических зарядов q_1 и q_2 есть результат действия поля заряда q_1 на заряд q_2 и поля заряда q_2 на заряд q_1 . Таким образом, электрическое поле представляет собой особый вид материи, связанный с электрическими зарядами и передающий действия зарядов друг на друга.



Рис. 19.12. К определению напряженности электрического поля

Электрическое поле обладает запасом электрической энергии, которая проявляется в виде электрических сил, действующих на находящиеся в поле заряженные тела. Оно определяется через силу, действующую на пробный заряд, помещенный в это поле. Пробный заряд должен быть ничтожно малым, чтобы не повлиять на характеристику электростатического поля. Рассмотрим электрическое поле, создаваемое одним точечным зарядом. Чтобы подчеркнуть, что этот заряд мы рассматриваем как источник поля, обозначим его величину прописной буквой Q (рис. 19.12).

Возьмем произвольную пространственную точку A . Введем силовую характеристику поля — напряженность электрического поля. Для определения напряженности электрического поля поместим в эту точку пробный заряд q . Согласно закону Кулона сила, действующая на пробный заряд, равна $F = kQqr/r^3$, где r — вектор, проведенный от заряда источника Q к точке A , в которой рассчитывается поле (точка наблюдения). По определению, напряженность поля $E = F/q$ и равна kQr/r^3 . Мы видим, что напряженность поля E не зависит от величины пробного заряда, а определяется лишь зарядом, который создает это поле.

Постоянную k в формуле закона Кулона обычно выражают через константу ϵ_0 , которая называется электрической постоянной. Она связана с k соотноше-

нием $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$. С учетом этого выражение для модуля напряженности электрического поля примет вид

$$E = 1/(4\pi\epsilon_0)|Q|/r^2.$$

Округленно величина $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/Нм². Часто используют формулу, где вместо $1/\epsilon_0$ берут величину $1/4\pi\epsilon_0$, которая приближенно равна $1/4\pi\epsilon_0 \approx 9,0 \cdot 10^9$ Н · м²/Кл².

Из определения вектора \mathbf{E} следует, что направление напряженности электрического поля в любой точке пространства совпадает с направлением силы, действующей в этой точке на положительный пробный заряд. Напряженность электрического поля представляет собой силу, действующую на единичный заряд. Она измеряется в ньютонах на кулон (Н/Кл). Поскольку \mathbf{E} — векторная величина, постольку электрическое поле является векторным полем. Само по себе электростатическое поле «не заряжено» в том смысле, что оно не создает какого-либо дополнительного поля вокруг себя. Значит, поля различных зарядов «не мешают» друг другу, и поэтому суммарное поле системы зарядов можно подсчитать как векторную сумму полей от каждого из них в отдельности. Таким образом, для этого поля справедлив принцип суперпозиции (см. рис. 19.13).

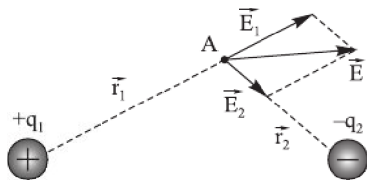


Рис. 19.13. Принцип суперпозиции электрических полей

Силовые линии. Электрическое поле можно задать, указав для каждой точки величину и направление вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} . Для наглядного изображения электрического поля используют силовые линии (или векторные линии напряженности). Векторы напряженности электрического поля направлены по касательной к силовой линии (рис. 19.14).

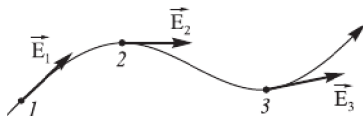


Рис. 19.14. Векторы напряженности электрического поля направлены по касательной к силовым линиям

Там, где напряженность поля больше, больше и плотность (густота) силовых линий. При изображении электрического поля с помощью силовых линий их густота должна быть пропорциональна модулю вектора напряженности поля. Густота и направление силовых линий по всему объему однородного электрического поля сохраняются неизменными. Такое поле графически изображается равноотстоящими друг от друга параллельными прямыми линиями. Исходя из принятого направления поля, устанавливаем, что силовые линии начинаются на положительных зарядах (положительно заряженных телах) и заканчиваются на отрицательных (рис. 19.15).

Эксперимент, иллюстрирующий электрическое поле. Налейте в небольшую стеклянную кювету (рис. 19.16) какой-либо жидкий диэлектрик (например, масло), к которому подмешан порошок с крупинками удлиненной формы. В кювету поместим две металлические пластинки и соединим их с электрической машиной, позволяющей непрерывно разделять положительные и отрицательные заряды. Чтобы удобно было следить за поведением взвешенных в масле крупинок, спроецируем изображение всей картины на экран или просто отбросим тень кюветы на потолок. При зарядке пластинок можно

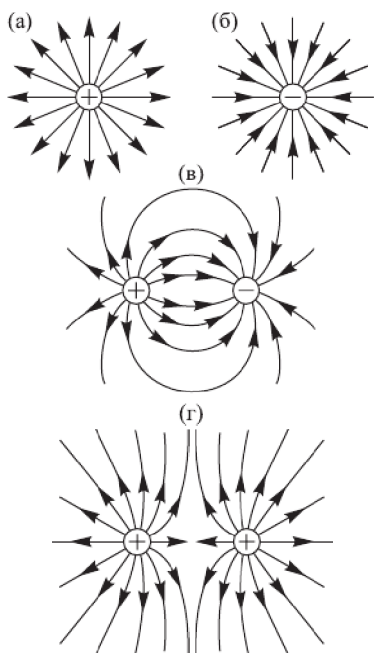


Рис. 19.15. Примеры изображения электрического поля при помощи силовых линий: а) электрическое поле одиночного положительного заряда; б) электрическое поле одиночного отрицательного заряда; в) электрическое поле двух разноименных зарядов; г) электрическое поле двух одноименных зарядов

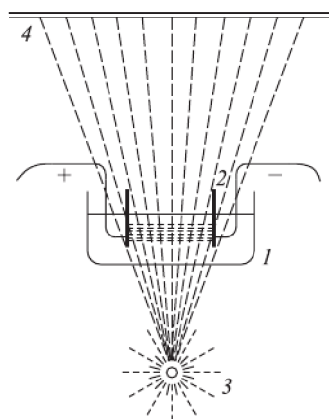


Рис. 19.16. Схема экспериментальной установки для получения картин электрического поля: 1 — кювета, содержащая касторовое масло с кристалликами хинина; 2 — проводники, соединенные с электрической машиной и создающие электрическое поле; 3 — источник света; 4 — экран, на который проецируется тень от кристалликов



Рис. 19.17. Расположение крупинки между двумя параллельными пластинками (а), заряженными разноименно, и двумя разноименными точечными зарядами (б)

видеть, что отдельные крупинки, расположенные вначале совершенно беспорядочно, начинают перемещаться и поворачиваться и в конце концов устанавливаются в виде цепочек, тянущихся от одного электрода к другому. На рис. 19.17, а приведено изображение расположения крупинки между двумя параллельными металлическими пластинками, а на рис. 19.17, б — между двумя металлическими шариками.

В этом опыте каждая крупинка подобна маленькой стрелке. Небольшие размеры крупинки позволяют разместить их одновременно во многих точках среды и благодаря этому обнаружить, что действие заряженного тела проявляется во всех точках пространства, окружающего заряд. Таким образом, можно судить о существовании электрического

заряда каком-нибудь месте по действиям, производимым им в различных точках окружающего пространства. В зависимости от заряда и формы заряженного тела действие его в различных точках пространства будет различным. Поэтому для полной характеристики заряда надо знать, какое действие он производит во всевозможных точках окружающего пространства, или, как говорят, надо знать электрическое поле, которое возникает вокруг заряда. Таким образом, понятием «электрическое поле» мы обозначаем пространство, в котором проявляются действия электрического заряда (§ 13. Понятие об электрическом поле. searnam.ru/book_phis_t2.php?id).

Напряженность электрического поля для симметричных полей.

1. Точечный заряд.

Напряженность поля E точечного заряда q рассмотрена выше:

$$E = 1/(4\pi\epsilon_0)q/r^2.$$

Напряженность поля точечного заряда прямо пропорциональна величине заряда q , создающего поле, и обратно пропорциональна квадрату расстояния от заряда до той точки поля, в которой измеряется напряженность. В любой точке такого поля вектор напряженности направлен по радиусу от положительного заряда ($+q$) либо к заряду, если он отрицателен ($-q$). Силовые линии поля для положительного и отрицательного зарядов показаны на рис. 19.16.

2. Электрическое поле заряженной проводящей сферы.

Если шар достаточно удален от других предметов (например, укреплен на высокой изолирующей ножке или подвешен на длинной нити), то электромметр дает одни и те же показания, когда зонд находится в точках, одинаково удаленных от центра шара. Линии поля имеют тот же вид, что и для точечного заряда, помещенного в центре шара (рис. 19.16). Заряженный шар, удаленный от других предметов, создает вокруг себя такое же поле, как если бы его заряд был сосредоточен в центре.

Электрическое поле, порождаемое сферически-симметричным распределением заряда сферы, в любой точке пространства направлено вдоль луча от центра сферы и в равноудаленных точках имеет одинаковую величину, т. е. $E = E(r)$.

При $r > R$ (R — радиус сферы) заряд внутри поверхности равен заряду сферы q , а при $r < R$ равен нулю. Поэтому

$$E(r) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq r < R, \\ q/4\pi\epsilon_0 r^2, & \text{если } r > R. \end{cases}$$

Напряженность E направлена вдоль радиуса r .

Знак заряда q определяет знак проекции E , а следовательно, и направление самого вектора E . Он направлен от центра заряженной сферы ($q > 0$) или к центру ($q < 0$). Внутри однородно заряженной сферической поверхности электрическое поле отсутствует. График зависимости проекции вектора напряженности E_r на ось r , проведенную из центра сферы, показан на рис. 19.18 в предположении $q > 0$.

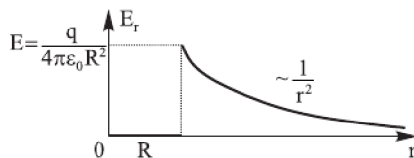


Рис. 19.18. Зависимость напряженности электрического поля заряженной проводящей сферы от расстояния до ее центра r

3. Электрическое поле между двумя заряженными пластинами.

Согласно принципу суперпозиции поля, создаваемые каждой заряженной пластиной в отдельности, накладываются друг на друга, причем каждая заряженная пластина создает электрическое поле независимо от присутствия другой заряженной пластины. Если пластинам сообщить равные по модулю заряды противоположного знака, то напряженность электрического поля между пластинами будет в два раза больше, чем напряженность поля у одной пластины. Вне пластин напряженность электрического поля равна нулю, так как равные заряды разного знака на двух пластинах создают вне пластин электрические поля, напряженности которых равны по модулю, но противоположны по направлению.

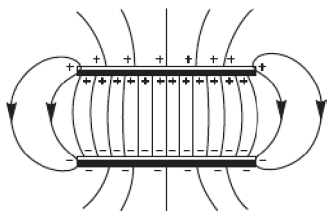


Рис. 19.19. Линии поля между двумя параллельными пластинами, заряженными противоположно

Как видно из рис. 19.19, на краю пластин линии поля изгибаются и не параллельны. Если размер пластин много больше расстояния между ними, то такими краевыми эффектами можно пренебречь.

Если плотность заряда (заряд, приходящийся на единицу площади) пластин $\pm\sigma$, то каждая пластина создаст электрическое поле напряженностью $E = \pm\sigma/2\epsilon_0$ (см. Джанколи. «Физика». Т. 2). Таким образом, в зазоре между пластинами создаваемые ими электрические поля складываются:

$$E = E_+ + E_- = \sigma/\epsilon_0.$$

В области вне пластин $E = E_+ + E_- = \sigma/2\epsilon_0 - \sigma/2\epsilon_0 = 0$.

Электрическое поле и проводники. Выше при рассмотрении электрического поля внутри сферического проводника мы отмечали, что поле там отсутствует, равно нулю. Если бы поле там существовало, то на свободные заряды действовала бы сила, которая привела бы их в движение. И это движение продолжалось бы до тех пор, пока заряды не заняли такое положение, что напряженность электрического поля, а следовательно, и действующая на них сила обратились бы в нуль. Из этого следует вывод, что если проводник обладает результирующим зарядом, то последний должен распределиться по внешней поверхности проводника. Так что хоть внутри проводника электрическое поле и отсутствует, снаружи сферы электрическое поле существует.

И еще один вывод. Силовые линии электрического поля всегда перпендикулярны поверхности проводника. Действительно, если бы вектор E имел компоненту, параллельную поверхности проводника, то заряды под действием силы двигались бы до тех пор, пока не заняли положение, при котором на них не действует сила, т. е. пока вектор напряженности электрического поля не станет перпендикулярен поверхности.

Подробнее о проводниках и непроводниках (изоляторах) мы еще поговорим в дальнейшем.

Заряженные частицы в электрическом поле. Напряженность электрического поля — силовая характеристика поля, и потому она может быть использована для описания сил, действующих на заряженное тело со стороны одного или нескольких заряженных тел.

При этом сила, действующая на заряд q в некоторой точке пространства, определяется выражением $F = qE$. На рис. 19.20 показана положительно заряженная частица, влетающая в однородное электростатическое поле *перпендикулярно силовым линиям*. Спроецируем, как это делалось в случае движения тела в поле силы тяжести, скорость частицы на две координатные оси.

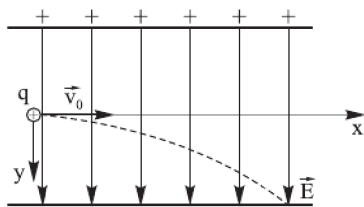


Рис. 19.20

Проекции скорости частицы на координатные оси задаются следующим образом: на горизонтальную ось —

$$v_x = v_0 = \text{const},$$

где v_0 — модуль начальной скорости частицы; на вертикальную ось —

$$v_y = at,$$

где t — время движения частицы, a — модуль ускорения, вызванного кулоновской силой $F_{\text{кул}}$:

$$a = F_{\text{кул}}/m = qE/m,$$

где m — масса заряженной частицы, q — величина заряда частицы, E — модуль напряженности поля конденсатора, q/m — удельный заряд частицы.

Величина скорости заряженной частицы в произвольный момент времени определяется по формуле $v = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)} = \sqrt{(v_0^2 + (qE/m)^2 t^2)}$.

Изменения координат заряженной частицы на выходе из конденсатора (показанных на рис. 19.20 двух параллельных заряженных пластин) определяются следующим образом: по горизонтальной оси —

$$\Delta x = v_0 t,$$

где Δx — смещение частицы по горизонтали, t — время движения частицы между пластинами; по вертикальной оси —

$$\Delta y = h = at^2/2 = (qE/m)t^2/2,$$

где h — отклонение траектории частицы от первоначального направления.

Угол α , который составляет вектор скорости с его первоначальным направлением в произвольный момент времени, определяется формулой

$$\text{tg } \alpha = v_y/v_x = qEt/mv_0.$$

Траекторией движения заряженной частицы под действием кулоновской силы (сила тяжести в этой ситуации пренебрежимо мала) является участок параболы. Действительно, перемещение частицы вдоль оси x дается выражением: $x = v_0 t$ (так как $a_x = 0$). В вертикальном направлении, когда ось OY направлена вверх, $y = 1/2 at^2/2 = -(qE/2m)t^2$. Исключая t из этих уравнений, получаем уравнение параболы $y = -[qE/(2mv_0^2)]x^2$.

На рис. 19.21 показана положительно заряженная частица, влетающая в однородное электростатическое поле *под углом α к силовым линиям*.

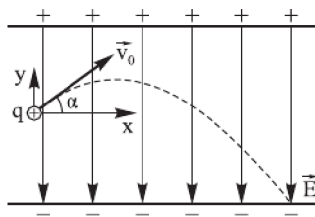


Рис. 19.21

Проекции скорости частицы на координатные оси задаются следующим образом: на горизонталь-

ную ось —

$$v_x = v_0 \cos \alpha = \text{const},$$

α — угол, который составляет вектор начальной скорости частицы с горизонтом; на вертикальную ось —

$$v_y = v_0 \sin \alpha - at.$$

Модуль ускорения, вызванного кулоновской силой, $a = qE/m$.

После действий, аналогичных выполненным в предыдущей задаче, получим

$$\Delta x = v_0 t \cos \alpha, \quad \Delta y = v_0 t \sin \alpha - (qE/m)t^2/2.$$

Угол β , который составляет вектор скорости с горизонтом в произвольный момент времени, определяется формулой

$$\text{tg } \beta = v_0 \sin \alpha - at/v_0 \cos \alpha.$$

И в этом случае траекторией движения частицы под действием кулоновской силы (сила тяжести в этой ситуации пренебрежимо мала) является участок параболы. Не правда ли, все рассмотренное очень похоже на расчет движения тела, брошенного под углом к горизонту?

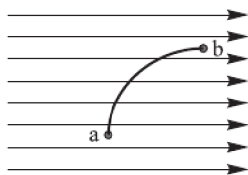


Рис. 19.22. Перемещение заряда в электрическом поле между двумя точками

Электрический потенциал. Электрическое поле обладает определенным запасом энергии, т. е. способностью совершать работу. Эта энергия может быть реализована, если внести в него какой-либо заряд.

Пусть мы имеем бесконечное равномерное электрическое поле. В некоторой точке M помещен заряд $+q$. Предоставленный самому себе заряд $+q$ под действием электрических сил поля будет перемещаться в направлении поля на бесконечно большое расстояние. На это перемещение заряда будет затрачена энергия электрического поля. Для характеристики энергии, запасенной в каждой точке электрического поля, введено специальное понятие — электрический потенциал. Потенциалом данной точки поля называется работа, которую затрачивает электрическое поле, когда оно перемещает положительную единицу заряда из данной точки поля в бесконечно удаленную точку. Чтобы переместить заряд $+q$ из бесконечно удаленной точки снова в точку M , внешние силы должны произвести работу A , идущую на преодоление электрических сил поля. Тогда для потенциала ϕ точки M получим $\phi = A/q$. Размерность потенциала $[\phi] = 1 \text{ джоуль}/1 \text{ кулон} = 1 \text{ вольт}$. Если заряд, равный 1 кулону, из бесконечно удаленной точки перемещается в точку поля, потенциал которой равен 1 вольту, то при этом совершается работа в 1 джоуль. Величина работы зависит как от потенциала, так и от величины заряда. Например, если в точку поля с потенциалом 5 В из бесконечно удаленной точки перемещается 10 кулонов электричества, то совершается работа $A = 5 \cdot 10 = 50 \text{ джоулей}$. Термин «потенциал» применяется в науке почти в тридцати случаях. Он происходит от латинского слова *potentia*, что означает «возможность» в переводе на русский язык. Мы используем здесь понятие «потенциал» в смысле *потенциал поля*.

Понятие электрического потенциала аналогично понятию уровня для различных точек земной поверхности. Очевидно, что для подъема локомотива в точку Б (рис. 19.23) нужно затратить большую работу, чем для подъема его

в точку А. Поэтому локомотив, поднятый на уровень H_2 , при спуске сможет совершить большую работу, чем локомотив, поднятый на уровень H_1 . За нулевой уровень, от которого производится отсчет высоты, принимают обычно уровень моря. Эти рассуждения мы уже применяли при рассмотрении вопроса потенциальной энергии тела в поле силы тяжести.

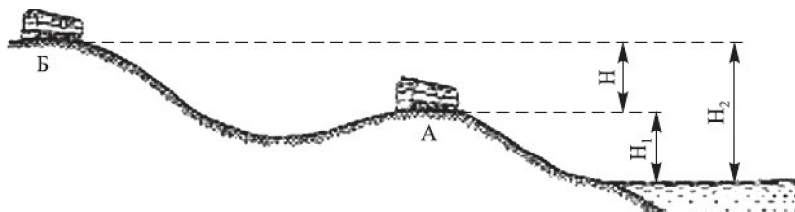


Рис. 19.23. Разность уровней в поле земного тяготения

В определении электрического потенциала есть элемент произвола. Ведь мы не знаем потенциал в бесконечно удаленной точке. Его просто положили равным нулю. Получается, что потенциал определен неоднозначно, он определен с точностью до выбора потенциала в точке начала отсчета (в нашем примере — в бесконечно удаленной точке), а эту величину мы можем выбрать какой хотим (например, 0) — от ее значения работа, определяемая разностью потенциалов, не зависит. Все точно так же, как в случае расчета потенциальной энергии в поле силы тяжести, где за нулевой потенциал условно принимают потенциал, который имеет поверхность земли.

Различные точки электрического поля обладают разными потенциалами. Разность потенциалов ϕ_1 и ϕ_2 двух точек поля характеризует собой работу, затрачиваемую силами поля на перемещение единичного заряда из одной точки поля с большим потенциалом в другую точку с меньшим потенциалом (рис. 19.24).

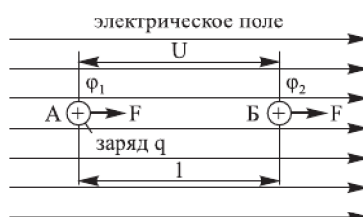


Рис. 19.24. Разность потенциалов U между точками А и В электрического поля

Точно так же, как и в потенциальном поле силы тяжести, работа пропорциональна разности потенциалов поля. Эта разность определяет работу, которая затрачивается на перемещение заряда q между этими точками высот (H_1 и H_2 на рис. 19.23). И так же, как в механике тела, стремятся занять положение с наименьшей потенциальной энергией, так и в электричестве под действием сил поля положительно заряженное тело стремится переместиться из точки с более высоким потенциалом в точку с более низким потенциалом, а отрицательно заряженное тело — наоборот. Таким образом, работа, затрачиваемая на перемещение заряда из точки с потенциалом ϕ_1 в точку с потенциалом ϕ_2 , записывается так: $A = q(\phi_1 - \phi_2)$. Разность потенциалов двух точек поля $\phi_1 - \phi_2$ называется напряжением, измеряется в вольтах и обозначается буквой U . Работу сил электрического поля можно записать и так: $A = qU$. Напряжение U , действующее между различными точками электрического поля, характеризует запасенную в этом поле энергию, которая может быть отдана путем перемещения между этими точками электрических зарядов.

Разность потенциалов двух точек поля будет равна одному вольту, если для того чтобы переместить заряд в один кулон между ними необходимо совершить работу в один джоуль.

Если заряды имеют одинаковые знаки, то потенциальная энергия взаимодействия между ними будет положительна. В этом случае заряды отталкиваются друг от друга.

Для разноименных зарядов энергия взаимодействия будет отрицательной. Заряды в этом случае будут притягиваться друг к другу. Как мы знаем, работа выражается через силу и перемещение формулой $A = Fl$. Выражая силу через напряженность электрического поля, написанную выше формулу для работы можно записать в виде

$$A = qEl.$$

Отсюда можно получить связь между напряженностью электрического поля и электрическим напряжением, если приравнять два выражения для работ: $E = U/l$. Напряженность электрического поля равна изменению потенциала при перемещении вдоль силовой линии на единицу длины.

Таким образом, напряженность электрического поля можно измерять как в вольтах на метр (В/м), так и в ньютонах на кулон (Н/Кл).

Так как E и U пропорциональны, для потенциала поля, созданного несколькими зарядами, справедлив принцип суперпозиции: потенциал поля, созданного несколькими зарядами, равен алгебраической (с учетом знака потенциала) сумме потенциалов полей каждого поля в отдельности: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_i$.

Эквипотенциальные поверхности. Подобно тому, как напряженность электрического поля можно представить графически, электрический потенциал можно представить графически в виде так называемых эквипотенциальных линий, которые в трех измерениях представляют собой эквипотенциальные поверхности. Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется эквипотенциальной поверхностью. Между двумя любыми точками на эквипотенциальной поверхности разность потенциалов равна нулю, поэтому работа сил электрического поля при любом перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю. При перемещении пробного заряда в поле точечного заряда вдоль дуги окружности с центром в точке нахождения точечного заряда направление перемещения пробного заряда перпендикулярно направлению напряженности поля (рис. 19.25, б).

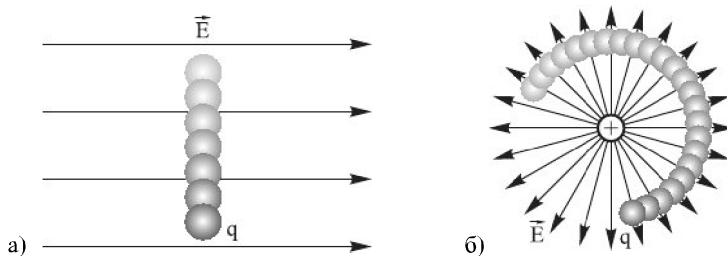


Рис. 19.25. При показанном перемещении пробного заряда в однородном электрическом поле работа поля равна нулю (fizikaklass.ru)

Работа силы равна нулю, если направление перемещения перпендикулярно направлению силы (косинус угла между силой и перемещением составляет 90°). Это означает, что вектор силы F в любой точке траектории движения заряда по эквипотенциальной поверхности перпендикулярен вектору скорости. Следовательно, линии напряженности электрического поля перпендикулярны эквипотенциальной поверхности. Тот факт, что силовые линии электрического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям, помогает построению эквипотенциальных поверхностей, если известно расположение силовых линий.

Электрический потенциал уединенного точечного заряда можно получить из формулы

$$U_{ab} = \varphi_b - \varphi_a = -E\Delta_{ab}$$

(здесь a, b — точки поля, в которых определяется потенциал). Таким образом, имеем

$$U_{ab} = 1/4\pi\epsilon_0(q/r_b - q/r_a).$$

Как отмечалось выше, физический смысл имеет лишь разность потенциалов. Поэтому можно принять потенциал какой-либо точки произвольно. Принято считать потенциал равным нулю на бесконечности (например, $\varphi_b = 0$ при r_b , стремящемся к бесконечности). Тогда электрический потенциал на расстоянии r от уединенного точечного заряда будет равен $\varphi = (1/4\pi\epsilon_0)q/r$. Заметим, что потенциал убывает как первая степень расстояния, в то время как напряженность пропорциональна r^{-2} . Потенциал велик вблизи положительного заряда и убывает до нуля при больших r . Вблизи отрицательного заряда потенциал меньше нуля (отрицателен) и возрастает с ростом r до нуля.

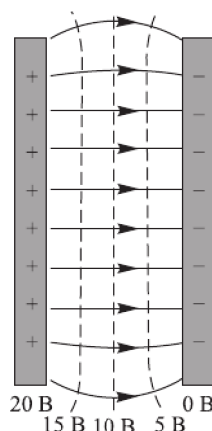


Рис. 19.26. Эквипотенциальные линии (штриховые) между двумя заряженными пластинами, перпендикулярные силовым

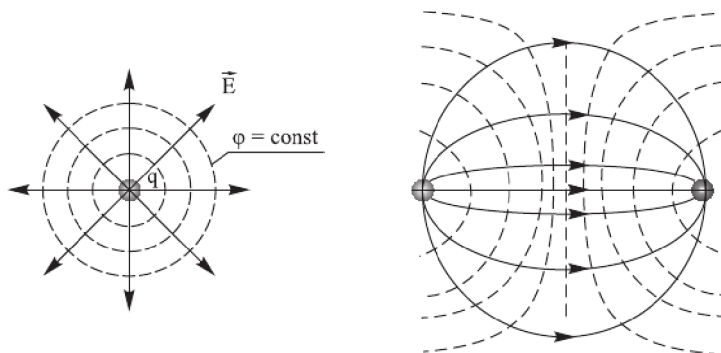


Рис. 19.27. Графическое изображение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей для точечного заряда и двух разноименных зарядов. Сплошные линии — силовые линии электрического поля; штриховые — эквипотенциальные линии

Тот, кто когда-нибудь наблюдал процесс записи ЭКГ у пациента, мог заметить, что при регистрации электрических потенциалов сердца электроды накладывают на конечности — на руки и на ноги. Это связано с тем, что сердце (кон-

кретно — синусовый узел) вырабатывает электрический импульс, который создает вокруг себя электрическое поле. Это электрическое поле распространяется по нашему телу концентрическими окружностями. Если измерить потенциал в любой точке одной окружности, то измерительный прибор покажет одинаковое значение потенциала, т. е. они являются эквипотенциальными. Кисти рук и стопы ног как раз находятся на одной эквипотенциальной окружности, что дает возможность, накладывая на них электроды, регистрировать импульсы сердца, т. е. получать электрокардиограмму.

Электрическое поле Земли. В обычных условиях земная поверхность — отрицательно заряженная поверхность. Поэтому планета Земля — отрицательно заряженное тело сферической формы. Вокруг любого заряженного тела существует электрическое поле. Поэтому вокруг нашей планеты тоже существует электрическое поле. В достаточно хорошем приближении при описании электрического поля Земли можно пользоваться моделью отрицательно заряженного шара.

Обобщенные результаты измерений дают приближенное значение напряженности электрического поля Земли вблизи земной поверхности 100–130 В/м.

Зная величину напряженности электрического поля Земли, можно легко рассчитать суммарный электрический заряд Земли, распределенный по ее поверхности, поверхностную и объемную плотности электрического поля Земли.

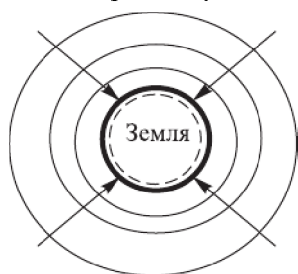


Рис. 19.28. Линии напряженности и эквипотенциальные линии электрического поля Земли

Найдем электрический заряд Земли Q . Напряженность электрического поля Земли на ее поверхности вычисляется по формуле $E = kq/R^2$, где k — коэффициент пропорциональности, равный $9 \cdot 10^9$.

Радиус Земли $R = 3,8 \cdot 10^6$ м; E — напряженность электрического поля — примем равной 100 В/м. Подставляя в формулу данные, получим

$$Q \approx 4,5 \cdot 10^5 \text{ Кл.}$$

По мере удаления от земной поверхности напряженность электрического поля Земли убывает достаточно быстро, а на высотах порядка 10–20 км уже практически равна нулю (см. таблицу 18).

Таблица 18. Уменьшение электрического поля Земли с высотой

Н, км	Е, в/м
0	100
1,5	25
4	10
6	8
10–20	≈ 0

20. *Открытие, преобразовавшее цивилизацию. Гальванический элемент. Сила тока. Закон Ома. Удельное электрическое сопротивление. Сверхпроводимость. Микроскопическая картина электропроводности. Сторонние силы. ЭДС. Опыт Толмена. Тепловое действие тока. Закон Джоуля–Ленца. Термоэлектронная эмиссия.*

Как уже упоминалось, в 1800 году Алессандро Вольта опустил в банку с кислотой две пластинки — цинковую и медную, соединил их проволокой и продемонстрировал, что по проволоке протекает электрический ток.

Известие об открытии было опубликовано в письме Вольты президенту Лондонского королевского общества Бэнксу и опубликовано в «Philos. Trans» того же года под заглавием «Oh the electricity excited by the mere contact of conducting Substances of different kinds». Изобретение произвело сенсацию не только в научном мире. Наполеон пригласил Вольту в Париж, лично присутствовал на демонстрации опыта, щедро наградил автора: в честь ученого была выбита медаль и учреждена премия в 80 000 экю. А однажды Наполеон, увидев в библиотеке академии лавровый венок с надписью «Великому Вольтеру», стер последние буквы; таким образом, получилось: «Великому Вольте». Открытие Вольты ознаменовало начало новой эпохи, преобразившей нашу цивилизацию. Лишь после многих опытов ему удалось создать свой знаменитый «вольтов столб» и продемонстрировать наличие в проводнике электрического тока. Вольта сконструировал и построил первую электрическую батарею. Она представляла собой набор серебряных или цинковых дисков, между которыми были проложены кусочки бумаги или ткани, пропитанные раствором соли или разбавленной кислоты. Полагая, что большое количество металлических пластинок своим весом будут выжимать влагу из картонных и суконных прокладок, Вольта сконструировал еще один вид своего аппарата — чашечную батарею, которую современники Вольта стали пышно именовать короной сосудов или венком из чашек. Впоследствии ее стали называть просто гальванической батареей. Она состояла из последовательно соединенных цинковых (1) и серебряных (2) пластин, опущенных попарно в чашки с разбавленной серной кислотой.

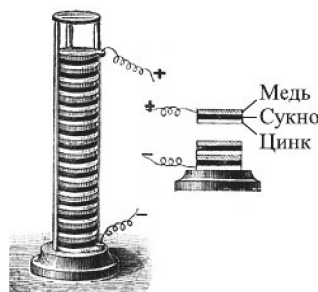


Рис. 20.1. Вольтов столб



Рис. 20.2. Чашечная батарея Вольты (из оригинальной публикации Вольты)

Современник той поры физик Араго писал: «В начале 1800 года вследствие теоретических соображений знаменитый профессор придумал составить длинный столб из кружков: медного, цинкового и мокрого суконного. Чего ожидать заранее от такого столба? Это собрание, странное и, по-видимому, бездействующее, этот столб из разнородных металлов, разделенных небольшим количеством

жидкости, составляет снаряд, чуднее которого никогда не изобретал человек, не исключая даже телескопа и паровой машины». Но изобретенная к тому времени лейденская банка (см. с. 262) «...действует только один раз, — продолжает Араго, — после каждого удара ее надобно снова заряжать: столб же, напротив, действует непрерывно. Итак, столб есть лейденская банка, сама собою заряжающаяся. Я осмелился бы сказать, что вольтов столб есть чудеснейший снаряд из всех человеческих изобретений». Так заканчивает Араго свое описание.

Были разные предположения о природе «вольтова электричества», в конце концов стало ясно, что электричество возникает благодаря превращению химической энергии в электрическую.

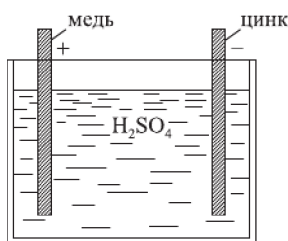


Рис. 20.3. Простейший гальванический элемент

Батарея (гальванический элемент) состоит из двух так называемых электродов — стержней или пластин разнородных металлов, которые погружены в электролит. В простейшем гальваническом элементе в качестве электролита используют серную кислоту (рис. 20.3).

Часть электрода, не погруженная в электролит, служит клеммой: к ней подсоединяются проводники. Напряжение между клеммами зависит от вещества, из которого изготовлены электроды. Разность потенциалов на клеммах батареи при разомкнутой внешней цепи носит название «электродвижущая сила» (ЭДС). Ее также обозначают буквой E (не путать с напряженностью электрического поля). При последовательном соединении двух и более элементов (когда плюсовую клемму одного элемента соединяют с минусовой клеммой следующего и т. д.) их ЭДС складываются.



Рис. 20.4. Перетекание зарядов с заряженного электрометра на незаряженный приводит к появлению электрического тока

Электрический ток. Мы установили, что в проводниках при определенных условиях может возникнуть непрерывное упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда. Такое движение называется *электрическим током*. Работы Вольты показали, что для протекания электрического тока необходимо как минимум два элемента: источник тока и проводники. Подсоединяя к клеммам батареи провод, мы получаем электрическую цепь. По цепи течет ток, пока разность потенциалов на клеммах источника не станет равной нулю, что показывает простой опыт с электрометрами (рис. 20.4)

Количественной мерой электрического тока служит сила тока I — скалярная физическая величина, равная отношению заряда Δq , переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени Δt , к этому интервалу времени:

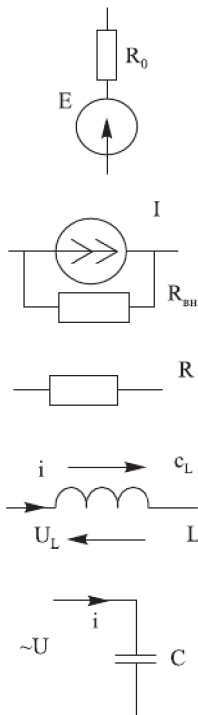
$$I = \Delta Q / \Delta t,$$

где ΔQ — количество заряда, протекающего через поперечное сечение проводника за время Δt . Если заряд измеряется в кулонах, то тогда $[I] = \text{Кл/с}$. Кулон в секунду называется ампером в честь физика Андре

Ампера (1775–1836). Если сила тока и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется *постоянным*.

Для анализа электрических цепей приняты условные обозначения, с которыми мы будем знакомиться по мере изучения темы. Некоторые из них показаны ниже на рисунке.

Условное обозначение



Элемент

Идеальный источник ЭДС
 E — электродвижущая сила, $E = \text{const}$
 $R_0 = 0$ — внутреннее сопротивление

Идеальный источник тока
 $I = \text{const}$, $R_{\text{вн}}$ — внутреннее сопротивление
 источника тока,
 $R_{\text{вн}} \gg R_{\text{наг}}$

Активное сопротивление
 $R = \text{const}$

Индуктивность
 $L = \text{const}$

Емкость
 $C = \text{const}$

Начало применения различных символов в электрической цепи принадлежит немецкому профессору Г. К. Лихтенбергу из Геттенгена. Да, тому самому Лихтенбергу, который более известен своими знаменитыми афоризмами. Лихтенберг, как человек науки, снискал себе славу благодаря лекциям по экспериментальной физике. Они сопровождались практическими опытами, проводимыми на аппаратах, которые совершенствовал сам ученый.

Ему принадлежит заслуга наименования разных видов электричества с помощью знаков, символизирующих отрицательное и положительное напряжение («-» и «+»). До введения им этих терминов ученый мир пользовался иными обозначениями, приводившими к путанице.

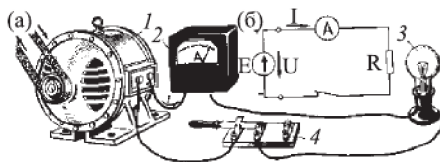


Рис. 20.5. Простейшая электрическая цепь постоянного тока (а) и ее принципиальная схема (б)

Закон Ома. Физики далеко не сразу освоились с понятием силы тока и вместо этого использовали термин «интенсивность электричества». Но и эту интенсивность электричества не умели измерять. В это время физики лишь нащупывали какие-то частные закономерности. Одним из первых ученых, занявшихся вопросом проводимости, был Стефано Марианини (1790–1866). К своему открытию он пришел случайно, изучая напряжение батарей. Стефано заметил, что с увеличением числа элементов вольтова столба воздействие на стрелку электро-скопа не увеличивается заметным образом. Это заставило Марианини сразу же подумать, что каждый вольтов элемент представляет собой препятствие для прохождения тока. Он провел опыты с парами «активными» и «неактивными» (т. е. состоящими из двух медных пластинок, разделенных влажной прокладкой) и опытным путем нашел отношение, в котором современный читатель узнает частный случай закона Ома, когда сопротивление внешней цепи не принимается во внимание, как это и было в опыте Марианини.

Также и Георг Ом (1789–1854), проводя эксперименты с проводником, установил, что сила тока I в проводнике пропорциональна напряжению U , приложенному к его концам: $I \sim U$. Ученый проводит целую серию экспериментов, многократно повторяя опыты с различными проводниками.

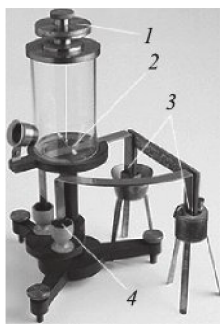


Рис. 20.6. Прибор Ома (www.fizika.ru/fakultat/index.php?theme=9&id)

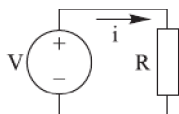


Рис. 20.7. Схема, иллюстрирующая три составляющие закона Ома: источник напряжения V , сопротивление R и ток в цепи i . За направление тока принято направление движения положительных зарядов

В своих опытах Ом использовал крутильные весы, как это делал Кулон. Ом подвешивал на упругой расплюсченной золотой проволочке магнитную стрелку над проводником, по которому шел ток, и по углу отклонения этой стрелки определял величину тока. Чтобы дуновения воздуха не мешали наблюдению за магнитной стрелкой, она была накрыта стеклянным колпаком. Когда ток, параллельный стрелке, отклонял ее, Ом закручивал нить, на которой она была подвешена, пока стрелка не оказывалась в своем обычном положении.

Сила тока считалась пропорциональной углу, на который закручивалась нить (над стеклянным колпаком (рис. 20.6) была расположена рукоятка для кручения нити (1) и транспортир (2)). Ом многократно повторял эксперименты с различными проводниками, концы которых он помещал в фарфоровые чашечки с ртутью (4), тем самым замыкая цепь. Ом составил подробные таблицы и установил ранее неизвестный закон о пропорциональности силы тока и «возбуждающей силы» (напряжения). Изменяя длину проводника, он доказал, что, выражаясь современной терминологией, сила тока обратно пропорциональна сопротивлению участка цепи. Так звучит уже знакомая нам формулировка закона Ома.

Результаты своих работ Ом оформил в виде статьи под названием «Предварительное сообщение о законе, по которому металлы проводят контактное электричество». Статья была опубликована в 1825 году в «Журнале физики и химии», издаваемом Швейггером. Иоганн Швейггер (1779–1857) был известным ученым, как и Ом, он был уроженцем Эрландера. Он много занимался изобретением приборов для измерения тока, так что ему были понятны работы Ома. Это была первая публикация Ома, посвященная исследованию

электрических цепей. Однако выражение, найденное и опубликованное Омом, оказалось неверным, что впоследствии стало одной из причин его длительного непризнания. Впрочем, и сам исследователь не претендовал на окончательное решение поставленной им задачи и даже подчеркивал это в названии выпшедшей статьи. Поиски нужно было продолжать.

В последующей работе Ом формулирует свой знаменитый закон и затем все свои работы по этому вопросу объединяет в книге, переведенной в сороковые годы девятнадцатого века на английский, итальянский и позже на французский языки. В этой книге Ом дает и теоретический вывод своего закона, исходя из теории, аналогичной теории теплопроводности Фурье. В своей работе Ом предложил описывать электрические свойства проводника его сопротивлением и ввел этот термин в обиход. Суть закона проста: порождаемый напряжением ток обратно пропорционален сопротивлению, которое ему приходится преодолевать, и прямо пропорционален порождающему напряжению: $I = GU$. Впоследствии коэффициент пропорциональности G назвали электропроводностью, а величину, ей обратную, $R = 1/G$, принято именовать электрическим сопротивлением проводника.



Рис. 20.8. Георг Симон Ом

Вначале работы Ома не произвели заметного впечатления, хотя, узнав о работах Ома, сам Майкл Фарадей заинтересовался ими и выразил сожаление, что из-за незнания немецкого языка не может изучить их обстоятельнее. В 1829 году Ом предложил единицу сопротивления, в качестве которой он выбрал сопротивление медной проволоки длиной 1 фут и поперечным сечением в 1 квадратную линию (так он тогда сформулировал предлагаемую единицу измерения). Открытие Ома, давшее впервые возможность количественно рассмотреть явления электрического тока, имело и имеет огромное значение для науки; все теоретические и опытные проверки показали полную его точность; закон Ома есть истинный закон природы.

Ому пришлось пройти тяжелый путь, прежде чем получил свой простой знаменитый закон, он отдал много сил и здоровья в борьбе за признание своих работ. Однако, как это часто бывает, первооткрыватель не получил причитающиеся по этому случаю почести. Только в 1833 году Ому предложили место профессора физики во вновь организованной школе в Нюрнберге, а до этого он жил в бедности, работая частным учителем. О значении исследований Ома хорошо сказал профессор физики Мюнхенского университета Е. Ломмель при открытии памятника ученому в 1895 году: «Открытие Ома было ярким факелом, осветившим ту область электричества, которая до него была окутана мраком. Ом указал единственно правильный путь через непроходимый лес непонятных фактов. Замечательные успехи в развитии электротехники, за которыми мы с удивлением наблюдали в последние десятилетия, могли быть достигнуты только на основе открытия Ома...» Замечательные слова, но сказанные через сорок лет после смерти ученого.

В 1881 году на электротехническом съезде в Париже ученые единогласно утвердили название единицы сопротивления — 1 Ом. Согласно формуле закона Ома 1 Ом соответствует 1 В/А.

Удельное сопротивление. Все электрические приборы оказывают сопротивление протекающему через них току. При этом провода, как правило, обладают очень низким сопротивлением.

Еще в начале XIX века было известно, что металлы имеют различную проводимость. Позже Дэви установил, что металлы можно расположить в ряд по возрастающей проводимости (железо, платина, олово, цинк, золото, серебро). Он же доказал, что проводимость пропорциональна площади поперечного сечения проволоки и обратно пропорциональна его длине. При этом он опроверг утверждение, что проводимость зависит от площади поверхности проводника. Вообще, любой проводник оказывает сопротивление току. Больше сечение проводника — меньше его сопротивление, и наоборот. Для сравнения способности проводников проводить электрический ток ввели так называемое удельное сопротивление. Оно обозначается греческой буквой ρ . Удельное сопротивление показывает сопротивление проводника единичного сечения и единичной длины.

Чтобы вычислить сопротивление конкретного проводника, надо удельное сопротивление его умножить на длину (L) в метрах и разделить на сечение проводника S :

$$R = \rho L / S.$$

Самым низким удельным сопротивлением обладает серебро, которое оказывается, таким образом, наилучшим проводником; однако оно дорого. Немногом уступает серебру медь (см. таблицу 19). Понятно, почему провода чаще всего изготавливают из меди.

Таблица 19. Удельные сопротивления проводников

Материал проводника	Удельное сопротивление ρ в (Ом · мм ²)/м
Серебро	0,015
Медь	0,018
Золото	0,023
Латунь	0,025
Алюминий	0,028
Натрий	0,047
Иридий	0,049
Вольфрам	0,050
Цинк	0,054
Молибден	0,059

Удельное сопротивление алюминия выше, чем у меди, однако он имеет гораздо меньшую плотность, и в некоторых случаях ему отдают предпочтение (например, в линиях электропередач), поскольку сопротивление проводов из алюминия той же массы оказывается меньше, чем у медных. Часто пользуются величиной, обратной удельному сопротивлению: $\sigma = 1/\rho$, называемой удельной проводимостью.

Удельное сопротивление вещества зависит от температуры. Как правило, сопротивление металлов возрастает с температурой. Если, наоборот, приближать температуру к абсолютному нулю, сопротивление образца будет «стремиться»

к остаточному сопротивлению (ρ_0 на рис. 20.9). Остаточное сопротивление зависит от совершенства и состава образца. В любом веществе встречаются постоянные атомы — примеси, а также всевозможные другие дефекты. Чем меньше в образце дефектов, тем меньше остаточное сопротивление.

В таблицах значение удельного сопротивления обычно приводятся для температуры 20 °С. Сопротивление, или удельное сопротивление, при других значениях температуры можно найти пересчетом. В узких диапазонах изменения температуры сопротивление металла увеличивается с температурой почти линейно:

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0)).$$

Здесь ρ_0 — удельное сопротивление при температуре T_0 , ρ_T — удельное сопротивление при температуре T , α — температурный коэффициент сопротивления.

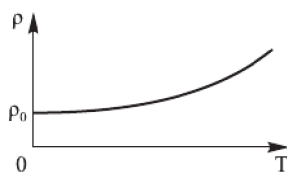


Рис. 20.9. Зависимость сопротивления металла (меди) от температуры

Таблица 20. Значения температурного коэффициента сопротивления для некоторых металлов

$\alpha, 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (или K^{-1})	Проводник
4,2	Алюминий
6	Железо
4	Золото
0,1–0,4	Латунь
4,3	Медь
6,5	Никель
4,4	Олово
3,9	Платина
1,0	Ртуть
4,1	Серебро

Сверхпроводимость. В 1911 году голландский физик Х. Камерлинг-Оннес проводил измерения электрического сопротивления ртути при низких температурах. Оннес хотел выяснить, сколь малым может стать сопротивление вещества электрическому току, если максимально очистить вещество от примесей и максимально уменьшить температуру. Жидкую ртуть при комнатной температуре заливали в тонкие капилляры и охлаждали их в гелиевом криостате, после чего измеряли ее сопротивление. В знаменательный день 8 апреля 1911 года Камерлинг-Оннес убедился, что при охлаждении от 4,3 до 3 К сопротивление ртути падает практически до нуля. Он понял, что скачкообразное исчезновение электрического сопротивления ртути (или как минимум его падение

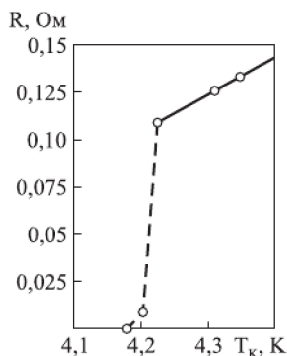


Рис. 20.10. Рисунок скопирован из одной из первых работ Оннеса, посвященной сверхпроводимости

до не поддающихся измерению значений) не имеет теоретического объяснения. Оннес пришел к выводу, что ртуть перешла в новое состояние, которое он назвал сверхпроводящим.

Температуру такого перехода сейчас называют критической (T_c). Чем образец чище, тем резче скачок сопротивления, его ширина в самых чистых образцах меньше сотой доли градуса. Исследование сверхпроводимости шло очень медленно. Для наблюдения явления нужно было охлаждать металлы до низких температур, а это не так просто. Образец должен охлаждаться постоянно, для чего его помещают в охлаждающую жидкость. До 1986 года максимальная известная критическая температура сверхпроводимости едва превышала 20 К, поэтому при исследовании сверхпроводимости нельзя было обойтись без жидкого гелия. В качестве охладителя также широко применяется азот. Азот и гелий используются на последовательных ступенях охлаждения. Оба эти вещества нейтральны и безопасны. Открытие в 1986–1993 гг. ряда высокотемпературных сверхпроводников далеко отодвинуло температурную границу сверхпроводимости и позволило практически использовать сверхпроводящие материалы не только при температуре жидкого гелия (4,2 К), но и при температуре кипения жидкого азота (77 К), гораздо более дешевой криогенной жидкости. Отсутствие потерь на нагревание при прохождении постоянного тока через сверхпроводник делает привлекательным применение сверхпроводящих кабелей для доставки электричества, так как один тонкий подземный кабель способен передавать мощность, которая традиционным методом требует создания цепи линии электропередач с несколькими кабелями много большей толщины.

Из-за трудности реализации практического использования явления сверхпроводимости ее применение ограничивается в основном созданием сверхсильных магнитных полей в установках магнитно-резонансной томографии и в больших научных установках, таких как широко известный Большой адронный коллайдер (см. с. 462), поскольку при прохождении по сверхпроводнику сильных токов, создающих сильные магнитные поля, отсутствуют тепловые потери. Знание проводимости металлов важно для техники. Интенсивное изучение проводимости началось с развитием мировой системы телеграфной связи. При этом возник вопрос об увеличении проводимости металлов. А для этого необходимо было разобраться в механизме проводимости.

Микроскопическая картина электропроводности. Определим еще одну макроскопическую характеристику тока — плотность тока. Плотность тока j — это векторная физическая величина, модуль которой определяется отношением силы тока I в проводнике к площади S поперечного сечения проводника, т. е. $j = I/S$. В СИ единицей плотности тока является ампер на квадратный метр (A/m^2). Такая формула справедлива для случая, когда плотность тока не меняется по сечению. Направление вектора j соответствует потоку положительных зарядов (что согласуется с принятым направлением тока). В проводнике подвижные носители заряда — это отрицательно заряженные электроны (о них будет подробный рассказ), а они движутся в направлении, противоположном E (напряженности поля).

Рассмотрим, как зависит сила тока от скорости упорядоченного движения свободных зарядов.

Выделим участок проводника площадью сечения S и длиной Δl (рис. 20.11). Положим заряд каждой частицы равным q_0 . В объеме проводника, ограниченном сечениями 1 и 2, содержится $nS\Delta l$ частиц, где n — концентрация частиц. Их общий заряд

$$\Delta q = q_0 n S \Delta l.$$

Если средняя скорость упорядоченного движения свободных зарядов $\langle v \rangle$, то за промежуток времени $\Delta t = \Delta l / \langle v \rangle$ частицы, заключенные в рассматриваемом объеме, пройдут через сечение 2. Поэтому сила тока

$$I = \Delta q / \Delta t = q_0 n \langle v \rangle S \Delta l / \Delta t = q_0 n \langle v \rangle S.$$

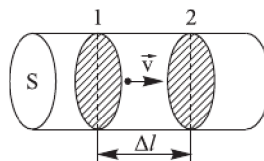


Рис. 20.11. К выводу формулы зависимости силы тока от скорости носителей заряда

Таким образом, сила тока в проводнике зависит от заряда, переносимого одной частицей, их концентрации, средней скорости направленного движения частиц и площади поперечного сечения проводника: $j = q_0 n \langle v \rangle$. В металлах носителями заряда являются электроны. В этом случае $q_0 = -e$, где e — заряд электрона.

На любой единичный заряд q в электрическом поле напряженностью E действует сила $F = qE$, которая перемещает заряд в направлении вектора этой силы. Сила, действующая на электрон в проводнике со стороны электрического поля напряженности E , равна $F = -eE$, и вектор силы $\mathbf{F} = -q\mathbf{E}$, действующей на отрицательный заряд $-q$, направлен в сторону, противоположную вектору напряженности поля. Следовательно, отрицательно заряженные электроны, которые являются носителями зарядов в металлических проводниках, в реальности имеют направление движения, противоположное вектору напряженности поля и общепринятому направлению электрического тока. При этом необходимо отметить, что в металлах модуль вектора средней скорости упорядоченного движения электронов $\langle v \rangle$ при максимально допустимых значениях силы тока $\sim 10^{-4}$ м/с, что много меньше средней скорости их теплового движения. Это связано со столкновениями с атомами решетки твердого тела, которые тормозят электроны, и эта «тормозящая» сила уравнивает электрическую силу. Электроны быстро достигают некоторой установившейся скорости упорядоченного движения, которая получила название средней скорости дрейфа v_d носителей заряда. Эту скорость надо использовать в написанном выше уравнении для плотности тока ($\langle v \rangle = v_d$).

Интересный факт. Проблемой определения «скорости распространения электричества» занимался Уитстон. Тот Уитстон (1802–1875), которому приписывают изобретение известного «мостика Уитстона». По иронии судьбы имя Уитстона оказалось присвоенным не его изобретению — мост сопротивлений был создан английским ученым С. Кристи; в то же время такое важное изобретение Уитстона, как реостат, осталось безымянным. Работами Уитстона по определению скорости распространения электричества интересовался Араго, считавший их очень важными, и даже выдвинул Уитстона, английского физика, в Парижскую академию. Эта работа Уитстона интересна тем, что в ней, пусть косвенно, впервые соприкоснулись скорость света и скорость распространения электрических возмущений. Результат, полученный Уитстоном, подтвердил гипотезу о конечности скорости распространения электрических возмущений. Однако надежных количественных результатов получить не удалось: был сделан ошибочный вывод о том, что найденная скорость превышает скорость света. Эксперимент Уитстона можно рассматривать как предвосхищение опытов Герца, в которых было доказано существование электромагнитных волн. Об этих опытах речь впереди.

Воспользуемся далее законом Ома: $I = U/R$. Так как $R = \rho L/S$, а $I = jS$ и $U = EL$ (так как электрическое поле внутри проводника однородно), L — длина проводника или его участка, тогда можно записать следующее равенство: $EL = (jS)(\rho L/S) = j\rho L$. После сокращения на L получим $j = (1/\rho)E = \sigma E$. Таким образом, плотность тока j пропорциональна напряженности электрического поля внутри проводника E . Это соотношение можно рассматривать как закон Ома в дифференциальной форме.

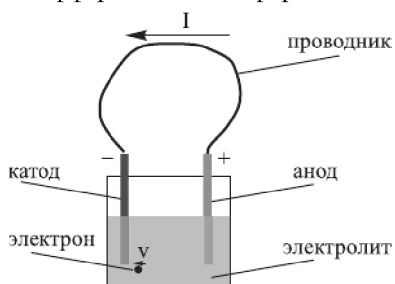


Рис. 20.12. Демонстрация сторонних сил при возникновении электрического тока

Для существования постоянного электрического тока необходимо наличие свободных заряженных частиц и наличие источника тока, в котором осуществляется преобразование какого-либо вида энергии в энергию электрического поля. Источник тока — устройство, в котором осуществляется преобразование какого-либо вида энергии в энергию электрического поля. На рис. 20.12 показано направление протекания тока I в проводнике, подключенном к аккумулятору — от положительного анода к отрицательному катоду, однако внутри аккумулятора

сторонние силы химической реакции производят перенос электронов, прошедших из внешней цепи с анода на катод и положительных ионов с катода на анод, то есть действуют против направления движения тока и направления поля.

Из сделанных выше соображений можно сделать следующий вывод: силы, действующие на заряд внутри источника тока, отличны от сил, действующих внутри проводника. Причины возникновения сторонних сил в различных источниках тока различны.

Например, в батарее Вольты, в гальванических элементах сторонние силы возникают благодаря протеканию химических реакций.

Соответственно, необходимо эти силы отличать друг от друга. Для характеристики сторонних сил была введена величина электродвижущей силы (ЭДС) — работы, совершаемой сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда от отрицательного полюса источника тока к положительному: $\epsilon = A_{ст}/q$.

Видов источников тока в физике разработано множество. Ток возникает вследствие воздействия света, тепла, давления, механической работы и так далее. Пожалуй, одним из самых распространенных источников тока можно назвать гальванические элементы, или батарейки, как их называют в быту.

При рассмотрении прохождения тока через проводники мы принимали, что носителями заряда являются электроны. Электрический ток в металлах — это упорядоченное движение электронов под действием электрического поля. А можно ли это утверждение доказать?

Опыт Толмена. В 1913 году Мандельштам и Папалекси выполнили опыт, цель которого состояла в проверке того, есть ли масса у носителя электрического тока, электрона. Если масса у электрона есть, то он должен подчиняться законам механики, в частности закону инерции. К примеру, если движущийся проводник

резко затормозить, то электроны еще некоторое время будут двигаться в том же направлении по инерции. Для этой проверки исследователи вращали катушку с проходящим током, а затем резко останавливали ее. Возникающий бросок тока регистрировали с помощью телефона. По щелчку тока в телефонах Мандельштам и Папалекси установили, что электрон обладает массой. Но измерить эту массу они не смогли. Это был качественный опыт. Позже такую же попытку продемонстрировать на опыте ток, вызываемый электронами, сделали физики Томас Стюарт (1890–1958) и Ричард Толмен (1881–1948). Схема опыта Толмена и Стюарта показана на рис. 20.13. Катушка с большим числом витков тонкой проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси. Концы катушки с помощью гибких проводов были присоединены к чувствительному баллистическому гальванометру.

Раскрученная катушка резко тормозилась, и в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда. То есть роль сторонних сил играли силы инерции. На основании результатов опытов Толмена и Стюарта было установлено, что носители свободного заряда в металлах имеют отрицательный знак, а отношение заряда носителя к его массе близко к удельному заряду электрона, полученному из других опытов. Так было подтверждено, что носителями свободных зарядов в металлах являются электроны.

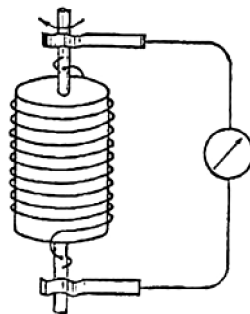


Рис. 20.13. Схема опыта Толмена–Стюарта

Пример. Определить среднюю скорость направленного движения электронов в проводнике сечением 10 мм^2 , в котором протекает ток 1 мА , при числе заряженных частиц в единице объема $2 \cdot 10^{22}$.

Решение. Плотность тока пропорциональна заряду q , количеству свободных электронов n и скорости v их направленного движения: $I = qnv$. Из этого уравнения можно найти искомое значение скорости движения электронов: $v = I/(qnS) = 31,25 \text{ мм/с}$.

Таким образом, представление многих о том, что электроны под действием электрического поля одновременно выстраиваются в ряды и начинают свое движение вдоль проводника, является ошибочным! Подсчитали, что «вышедший» от источника питания электрон по линии электропередачи длиной в оба конца 5 км , при напряжении генератора 100 вольт , двигаясь со средней скоростью $0,002 \text{ см в секунду}$, вернется на станцию к источнику питания примерно через 8 лет ! В реальности электроны продолжают свое хаотичное движение, но электрическое поле смещает все электроны в направлении действия поля. Само поле распространяется с огромной скоростью — скоростью света. Об этом речь впереди.

Тепловое действие тока. В 1800 году французский химик и политический деятель Антуан Франсуа де Фуркруа (1755–1809) первым наблюдал тепловое действие электрического тока, включив в гальваническую цепь плохо проводящую проволоку. И вскоре этот эффект стал находить практическое применение. Так, в 1802 году в Париже была представлена первая угольная дуга, предназначенная для обогрева и освещения. К полюсам вольтова столба, насчитывавшего

120 элементов, подсоединялись электроды из древесного угля, и когда оба угольных электрода приводились в соприкосновение, а затем разводились, возникал «сверкающий разряд исключительной яркости».



Джеймс Джоуль
1818–1889



Эмилий Ленц
1804–1865

В 1808 году был предложен электрозапал для пороха. Прошло еще время, и двумя физиками, Джеймсом Джоулем в 1841 году и Эмилием Христофоровичем Ленцем в следующем году, независимо друг от друга был открыт эффект, характеризующий тепловое действие электрического тока. Джоуль сделал свои эксперименты по выделению тепла электрическим током исходным пунктом дальнейших исследований по выяснению связи между теплотой и работой. Свой вывод из опытов он сформули-

ровал так: «...Во всех случаях, когда электрический ток получался с помощью магнитоэлектрической машины, количество теплоты, развиваемой током, находилось в постоянном отношении к силе, необходимой для вращения этой машины...» Ленц тщательно изучил поведение сопротивлений при прохождении через них электрического тока.

Результаты эксперимента он сформулировал в следующих двух положениях.

1. Нагревание проволоки гальваническим током пропорционально сопротивлению проволоки.

2. Нагревание проволоки гальваническим током пропорционально квадрату служащего для нагревания тока.

Точность и обстоятельность опытов Ленца обеспечили признание закона, вошедшего в науку под названием закона Джоуля–Ленца. Его формулируют следующим образом. Количество выделенного тепла Q равно произведению квадрата силы тока I^2 , сопротивления проводника R и времени t прохождения тока через проводник:

$$Q = I^2 R t.$$

Поделив это выражение на время, найдем мощность (т. е. скорость преобразования энергии). С учетом закона Ома эту формулу можно записать и таким образом:

$$Q = I^2 R = U^2 / R.$$

Эти формулы служат для расчета мощности (P), выделяемой на сопротивлении (резисторе) при протекании через него тока.

Если же записать эту формулу в виде $P = IU$, то она будет применима для расчета мощности не только для резистора, но и в общем случае.

Превращение электрической энергии в тепловую широко используется в различных нагревательных приборах. Повышенный нагрев проводника, как следует из закона Ленца–Джоуля, может происходить не только вследствие прохождения по нему тока большой силы, но и вследствие повышения сопротивления проводника. Поэтому для надежной работы электрических установок большое значение имеет величина сопротивления в месте соединения отдельных проводников. Именно в этом месте при неплотном электрическом контакте и плохом соединении проводников электрическое сопротивление сильно возрастает, и здесь происходит усиленное выделение тепла.

Чтобы электротехническое устройство работало, должна быть создана *электрическая цепь*, задача которой — передать электрическую энергию этому устройству и обеспечить ему требуемый режим работы. Простейшая электрическая цепь — это соединительные провода, подключение к источнику тока и место для потребителя тока, например лампочки. Тут следует добрым словом помянуть Эдисона. Это он в 1879 году вкупе с лампой накаливания с винтовым цоколем и патроном для нее, выключателем, счетчиком электроэнергии и предохранителем изобрел розетку, электрическую вилку (получилась система «розетка–вилка») и еще многое в области электричества.

Термоэлектронная эмиссия. Еще до конца восемнадцатого века было известно, что вблизи нагретых твердых тел воздух теряет свое обычное свойство плохого проводника электричества. Однако причина этого явления оставалась неясной до 1880-х годов. Тогда было обнаружено, что при пониженном давлении окружающего воздуха раскаленная добела металлическая поверхность приобретает положительный заряд. Такой эффект наблюдал Эдисон в 1883 году при создании своей знаменитой вакуумной лампы накаливания. Эта лампа имела два электрода (отсюда название «вакуумный диод»): анод, имеющий положительный потенциал, и катод с отрицательным потенциалом. Свет в электрических лампах излучался в те времена накаленной угольной нитью. Однако от нити летело во все стороны нечто, оседавшее на баллоне и вызывавшее его потемнение. Эдисон предположил, что летят отрицательно заряженные угольные пылинки, и если ввести в лампу дополнительный электрод (управляющий электрод (с) на рис. 20.14) и подать на него положительный относительно нити потенциал, то пылинки будут притягиваться к этому электроду и не будут попадать на баллон. Но баллоны все равно темнели. Эдисон обнаружил, что между накаленной нитью и изолированным от нити электродом, введенным в баллон лампы, протекает ток даже в том случае, когда воздух из лампы выкачан. Никакого свечения внутри баллона не наблюдалось. Это явление позднее получило название «эффект Эдисона». В журнале «Инжиниринг» от 12 декабря 1884 года была помещена об этом лишь небольшая заметка под названием «Явление в лампочке Эдисона». В дальнейшем Эдисон потерял интерес к продолжению исследования открытого им эффекта. Через четыре года Дж. Дж. Томсон установил, что ток в лампе Эдисона переносят электроны. Электроны появлялись при нагревании нити. Явление испускания электронов нагретыми телами в вакуум или другую среду называется термоэлектронной эмиссией. Теорию термоэлектронной эмиссии разработал в 1902 году О. Ричардсон (1879–1959).

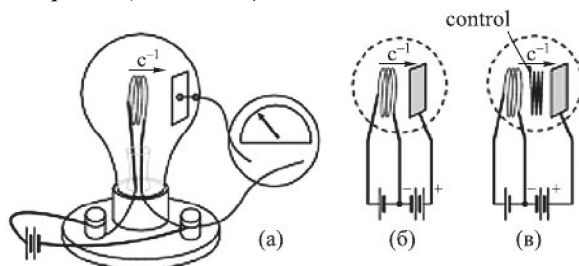


Рис. 20.14. (из <http://www.allaboutcircuits.com>)

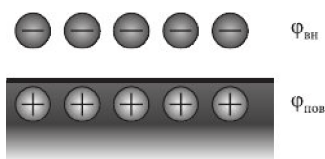


Рис. 20.15

В узлах кристаллической решетки металлов находятся положительные ионы, а между ними свободно движутся электроны. Действие сил притяжения со стороны положительных ионов на электроны мешает последним выйти за пределы поверхности металла. Лишь наиболее быстрые электроны могут преодолеть это притяжение и вылететь из металла. Однако совсем покинуть металл электрон не может, так как притягивается положительным поверхностным ионом и тем зарядом, который возник в металле в связи с потерей электрона. Как только электрон пытается перейти границу «металл–вакуум», возникает кулоновская сила притяжения между электроном и образовавшимся на поверхности избыточным положительным зарядом (рис. 20.15).

Вблизи от поверхности образуется электронное облако, и на границе раздела формируется двойной электрический слой с разностью потенциалов ($\Phi_{\text{вн}} - \Phi_{\text{пов}}$). За пределами металла электрон приобретает энергию W_0 . Это энергия притяжения определяется напряженностью электрического поля порядка $10^6 - 10^8$ В/м. Для того чтобы покинуть металл, электрон должен преодолеть потенциальный барьер и совершить работу $W_0 < 0$. Эту работу называют работой выхода электрона из металла. Для ее совершения электрону необходимо сообщить достаточную энергию $A_{\text{вых}} = e(\Phi_{\text{вн}} - \Phi_{\text{пов}})$.

Нагрев необходим для того, чтобы энергии теплового движения электрона было достаточно для преодоления сил кулоновского притяжения между отрицательно заряженным электроном и индуцируемым им на поверхности металла положительным зарядом при удалении его с поверхности. Кроме того, при достаточно высокой температуре над поверхностью металла создается отрицательно заряженное электронное облако, препятствующее выходу электрона с поверхности металла в вакуум. Этими двумя и, возможно, другими причинами определяется величина работы выхода электрона из металла. Упомянутый выше Ричардсон получил формулу для расчета величины тока (I) с нагретой поверхности: ток с единицы поверхности нагретого металла, находящейся при однородной абсолютной температуре T , определяется формулой

$$I = AT^2 e^{-W/kT},$$

где A — постоянный множитель, k — постоянная Больцмана, а W — работа выхода, характерная для данного металла, зависящая от состояния его поверхности; она равна минимальной энергии, необходимой для удаления электрона с поверхности металла. В 1927 году С. Дэшман вывел формулу Ричардсона на основе квантовой механики.

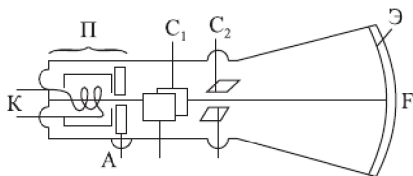


Рис. 20.16. Схема устройства электронно-лучевой трубки

На явлении термоэлектронной эмиссии основана работа многих вакуумных электронных приборов и, в частности, электронно-лучевой трубки, устройство которой показано на рис. 20.16. В основу работы электронно-лучевой трубки положено отклоняющее действие электрического и магнитного поля на электронный пучок.

В ее узкий конец вмонтирована электронная пушка П, состоящая из катода К, анода А и нескольких металлических колец (ускоряющих анодов). Форму, положение анодов и напряжение на них выбирают так, чтобы одновременно с ускорением электронов происходила и фокусировка электронного пучка, т. е. уменьшение площади поперечного сечения. Электроны вылетают из катода, нагреваемого электрическим током, а электрическое поле между катодом и металлическими кольцами (фокусирующего устройства) сводит их в узкий пучок — электронный луч. Широкое дно Э электронно-лучевой трубки покрыто слоем флуоресцирующего вещества и служит экраном. Под действием ударов попадающих на него электронов экран светится, и в том месте, куда попадает электронный луч, появляется обычно зеленое светлое пятнышко Г. Между электронной пушкой и экраном помещены управляющие электроды, представляющие собой систему горизонтально и вертикально расположенных пар пластин, т. е. конденсаторов C_1 и C_2 . Электрические поля заряженных конденсаторов взаимно перпендикулярны. Поле конденсатора C_1 отклоняет луч в горизонтальном направлении, поле конденсатора C_2 — в вертикальном. Изменяя напряжение на пластинках каждого из конденсаторов, можно отклонить электронный луч в любом направлении так, что пятнышко возникает на экране на различных расстояниях от его центра. В центр экрана электроны попадают, когда конденсаторы не заряжены.

Электронно-лучевые трубки используются, в частности, в таком известном приборе, как осциллограф, для усиления, измерения и визуального наблюдения электрических сигналов быстро протекающих процессов. Изобретен этот прибор был (в далеком 1893 году) французским физиком и инженером Андре Блонделем (1863–1938). Его электромеханические осциллографы (магнитоэлектрический осцилоскоп) использовались для исследований электрических явлений на протяжении 40 лет, пока им на смену не пришел катодный осциллограф на основе электронно-лучевой трубки.

21. *Электрическая цепь и ее элементы. Источник напряжения в цепи постоянного тока. Эквивалентное сопротивление цепи при различных соединениях резисторов. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов. RC-цепочка. Измерительные приборы в цепях постоянного тока.*

Электричество нашло огромное число применений в повседневной жизни в виде различных приборов и устройств. Понятно, что для создания их необходимо было проводить разнообразные расчеты. В основу этих расчетов легли электрические цепи. Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока. Для анализа и расчета электрическая цепь графически представляется в виде электрической схемы, содержащей условные обозначения ее элементов и способы их соединения (некоторые из них приведены на с. 281). В такой схеме реальные элементы цепи изображаются условными обозначениями, причем вспомогательные элементы цепи (провода) обычно не изображаются. Это имеет место, если сопротивление соединительных проводов много меньше сопротивления других элементов цепи (тогда его не учитывают).

Отдельные устройства, составляющие электрическую цепь, могут быть разделены на три группы.

1. Источники электрической энергии (источники питания). Общим свойством всех источников питания является преобразование какого-либо вида энергии в электрическую.

2. Потребители электрической энергии. Общим свойством всех потребителей является преобразование электроэнергии в другие виды энергии (например, нагревательный прибор). Иногда потребителей называют нагрузкой.

3. Вспомогательные элементы цепи: соединительные провода, коммутационная аппаратура, аппаратура защиты, измерительные приборы и т. д., без которых реальная цепь не работает.

Заметим, что первым предложил конструкцию электрических проводов английский ученый по фамилии Кавалло, живший на рубеже XVIII–XIX веков. Он предлагал натянутую отожженную медную или латунную проволоку нагревать в пламени свечи или просто куском раскаленного железа, покрывать смолой и обматывать полотняной лентой, также равномерно покрытой смолой. Изолированную таким способом проволоку следовало защищать чехлом из шерсти.

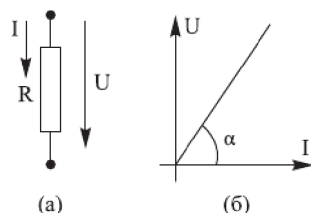


Рис. 21.1. Изображение резистора и его вольт-амперная характеристика (ВАХ)

Элементами схем электрических цепей постоянного тока являются резистивные элементы (резисторы), источники ЭДС и источники тока. Резистор — элемент электрической цепи, предназначенный для использования его электрического сопротивления. Его изображение на схеме показано на рис. 21.1, а; вольт-амперная характеристика (зависимость напряжения на резисторе от протекающего через него тока) линейного резистора для указанных положительных направлений тока I и напряжения U представлены на рис. 21.1, б.

Аналитическое выражение вольт-амперной характеристики идеального резистора соответствует закону Ома: $U = R \cdot I$, где R — электрическое сопротивление резистора. Значение сопротивления R , пропорциональное тангенсу угла наклона ВАХ к оси тока ($\tan \alpha$) и определяемое отношением напряжения U к току I , неизменно в любой точке ВАХ. Поэтому для описания резистора можно вместо ВАХ указать значение его электрического сопротивления. Реальные резисторы кроме собственно омического сопротивления могут обладать емкостью и индуктивностью (о них см. далее).

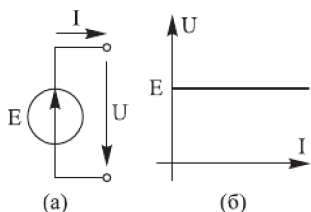


Рис. 21.2. Источник ЭДС и его вольт-амперная характеристика

Источник ЭДС — *идеальный источник энергии*, напряжение на выводах которого при любом токе I через источник остается неизменным и равным его ЭДС E . Источник ЭДС и вольт-амперная характеристика для указанных положительных направлений тока I и напряжения U представлены на рис. 21.2, а и 21.2, б соответственно. Предполагается, что источник соединен с приемником, через который замыкается ток I . Аналитическое выражение внешней характеристики идеального источника ЭДС —

$U = E = \text{const.}$ Для описания такого источника достаточно указать значение его ЭДС E .

Источник тока — идеальный источник энергии, ток которого при любом напряжении на его выводах остается неизменным. Аналитическое выражение внешней характеристики источника — $I = \text{const.}$ Для описания источника тока вместо внешней характеристики можно указать значение его тока I .

Идеальный источник напряжения (источник ЭДС) является физической абстракцией, то есть подобное устройство не может существовать.

В реальности любой источник напряжения обладает внутренним сопротивлением r . Оно обусловлено тем, что, например, в батарее заряды перемещаются в электролите от одного электрода к другому и их поток встречает на своем пути сопротивление. То есть источник обладает некоторым сопротивлением, которое называют внутренним сопротивлением и обычно обозначают через r . Это сопротивление можно представить себе включенным последовательно с источником ЭДС (см. далее).

На рис. 21.4 приведены нагрузочные характеристики идеального источника напряжения (источника ЭДС) (сплошная линия) и реального источника напряжения (пунктирная линия).

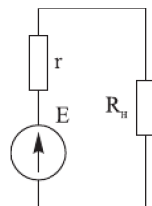


Рис. 21.3.
Реальный источник ЭДС в цепи

Способы соединения сопротивлений и расчет эквивалентного сопротивления электрической цепи. Расчет сложной схемы упрощается, если сопротивления в этой схеме заменяются одним эквивалентным сопротивлением. Сопротивления в электрических цепях могут быть соединены последовательно, параллельно и комбинацией этих двух соединений.

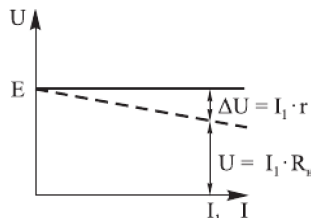


Рис. 21.4

А. Электрическая цепь с последовательным соединением резисторов. Последовательным называют такое соединение элементов цепи, при котором во всех включенных в цепь элементах возникает один и тот же ток I (рис. 21.5).

Если использовать гидроаналогию — уподобить электрический ток течению жидкости, — то при последовательном соединении жидкость обтекает все элементы, никуда не отвлекаясь.

Обозначим через U_1, U_2, U_3 разности потенциалов (или, как говорят, падение напряжения) на каждом из резисторов. Согласно закону Ома

$$U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2, \quad U_3 = IR_3.$$

Если пренебречь внутренним сопротивлением источника ЭДС и соединительных элементов, то согласно закону сохранения энергии полное напряжение U равно сумме падений напряжений на каждом резисторе, т. е.

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR.$$

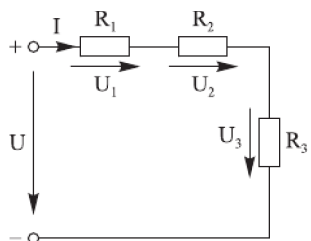


Рис. 21.5. Последовательное соединение резисторов

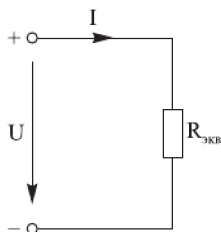


Рис. 21.6. Эквивалентная цепь

$R = R_1 + R_2 + R_3$ будет эквивалентным (общим) сопротивлением для цепи, изображенной на рис. 21.6. Таким образом, при последовательном соединении элементов цепи общее эквивалентное сопротивление цепи равно арифметической сумме сопротивлений отдельных участков. Следовательно, цепь с любым числом последовательно включенных сопротивлений можно заменить простой цепью с одним эквивалентным сопротивлением $R_{\text{экв}}$, при этом ток в цепи остается тем же самым: $I = U / R_{\text{экв}}$.

Очевидным недостатком последовательного включения элементов заключается в том, что при выходе из строя хотя бы одного элемента прекращается работа всех остальных элементов цепи.

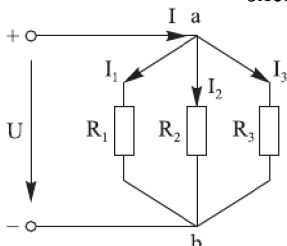


Рис. 21.7. Параллельное соединение резисторов

Б. Электрическая цепь с параллельным соединением резисторов. Параллельным называют такое соединение, при котором все включенные в цепь потребители электрической энергии находятся под одним и тем же напряжением (рис. 21.7).

В этом случае они присоединены к двум узлам цепи а и б. Если применить гидроанalogию (приняв поток заряда за поток жидкости), то можно видеть, что поток жидкости в точке а разветвляется по трем путям. При этом поток там больше, где для него меньше сопротивление. Сумма трех потоков в точке б должна равняться потоку, пришедшему в точку а. Тогда должен выполняться закон сохранения заряда. В силу этого сила тока, втекающего в узел а, должна быть равна силе тока, вытекающего из узла б, т. е. $I = I_1 + I_2 + I_3$. Так как к каждому резистору приложено одно и то же полное напряжение U , то отсюда имеем

$$I_1 = U/R_1, \quad I_2 = U/R_2, \quad I_3 = U/R_3.$$

Подставляя в выражение для полного тока эти соотношения, получим $U/R = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3$. Отсюда

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3.$$

Таким образом, эквивалентное (общее) сопротивление при параллельном соединении равно сумме обратных величин сопротивлений цепи. В том случае, когда параллельно включены два сопротивления R_1 и R_2 , они заменяются одним эквивалентным сопротивлением

$$R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2).$$

Из приведенных соотношений следует, что эквивалентная проводимость цепи равна арифметической сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$g_{\text{экв}} = g_1 + g_2 + g_3.$$

По мере роста числа параллельно включенных потребителей проводимость цепи $g_{\text{экв}}$ возрастает, и наоборот, общее сопротивление $R_{\text{экв}}$ уменьшается.

Напряжения в электрической цепи с параллельно соединенными сопротивлениями — $U = I \cdot R_{\text{экв}}$. Отсюда следует, что $I_1/I_2 = R_2/R_1$, т. е. ток в цепи распределяется между параллельными ветвями обратно пропорционально сопротивлениям в ветвях.

В. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов. Конденсаторы могут соединяться между собой, образуя батареи конденсаторов. При параллельном соединении конденсаторов (рис. 21.8) напряжения на конденсаторах одинаковы: $U_1 = U_2 = U$, а заряды равны $q_1 = C_1 U$ и $q_2 = C_2 U$ (коэффициентом пропорциональности между зарядом на пластинах конденсатора и напряжением является емкость (электроемкость) конденсатора C).

Немного об электроемкости. Если уединенному шару, закрепленному на стержне электрометра, сообщить заряд, шар приобретает некоторый потенциал. О величине потенциала можно судить по отклонению стрелки электрометра. Если увеличивать заряд шара в два, три и более раз, то во столько же раз будет изменяться и его потенциал. Отношение же заряда шара к его потенциалу во всех случаях будет оставаться одинаковым. Аналогичная закономерность будет наблюдаться и для шара другого радиуса, с той лишь разницей, что численно отношение заряда этого шара к его потенциалу будет иным, нежели для первого шара. Все рассуждения, приведенные для шаров, справедливы для тел любой конфигурации. Электроемкость характеризует способность проводников или системы из нескольких проводников накапливать электрические заряды.

Электроемкость показывает, какой заряд надо сообщить телу, чтобы его потенциал изменился на 1 В. Чтобы получить единицу электроемкости, надо в ее определяющее уравнение подставить единицы заряда 1 кулон и потенциала 1 вольт. Получаем $[C] = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В} = 1 \text{ Ф}$. Эта единица имеет собственное наименование — 1 Ф (1 фарад). Фарад — величина весьма большая. На практике обычно применяются более мелкие единицы: микрофарад, нанофарад, пикофарад. Емкость C служит характеристикой данного конденсатора. Ее величина зависит от размеров, формы и взаимного расположения обкладок, а также от вещества, заполняющего промежуток между обкладками. Так, для плоского конденсатора с параллельными пластинами площадью A и воздухом в промежутке между ними емкость $C = \epsilon_0 A / d$, где d — расстояние между пластинами.

Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор электроемкости C , заряженный зарядом $q = q_1 + q_2$ при напряжении между обкладками, равном U . Отсюда следует $C = (q_1 + q_2) / U$ или $C = C_1 + C_2$.

Таким образом, при *параллельном соединении* электроемкости складываются.

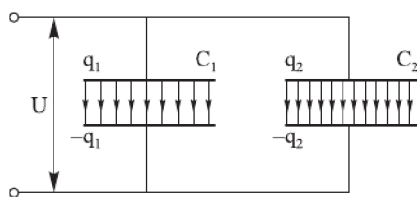


Рис. 21.8. Параллельное соединение конденсаторов. $C = C_1 + C_2$

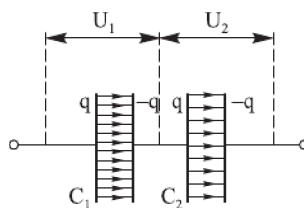


Рис. 21.9. Последовательное соединение конденсаторов

При последовательном соединении (рис. 21.9) одинаковыми оказываются заряды обоих конденсаторов: $q_1 = q_2 = q$, а напряжения на них равны $U_1 = q / C_1$ и $U_2 = q / C_2$. Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряженный зарядом q при напряжении между обкладками $U = U_1 + U_2$.

Следовательно, $C = q/(U_1 + U_2)$ или $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$. При *последовательном соединении* конденсаторов складываются обратные величины емкостей. Обратно тому, что имеет место при соединении резисторов.

Формулы для параллельного и последовательного соединения остаются справедливыми при любом числе конденсаторов, соединенных в батарею.

Правила Кирхгофа. К середине XIX века теоретические результаты в исследовании электрических явлений стали быстро находить практическое применение. Уже всюду применялся для расчета простых электрических цепей закон Ома. Уже можно было из проводов и различных элементов создавать сложные разветвленные электрические цепи. Проблема состояла в том, что такие сложные разветвленные цепи никто не умел математически рассчитывать, чтобы определить их свойства. Эту проблему удалось разрешить Густаву Роберту Кирхгофу (1824–1887). Сформулированные им в 1847 году достаточно простые правила анализа сложных электрических цепей, так называемые правила Кирхгофа (или законы Кирхгофа), до сих пор остаются важным рабочим инструментом специалистов в области электронной инженерии.

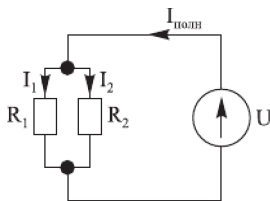


Рис. 21.10. Первое правило Кирхгофа: в каждом узле цепи сумма втекающих токов равна сумме вытекающих токов: $I_{\text{полн}} = I_1 + I_2$

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма сил токов в узле равна нулю. Узел — это точка цепи, в которой сходятся не менее трех проводников. Это правило следует из того, что в узлах цепи постоянного тока не может происходить накопление зарядов.

Второе правило Кирхгофа (правило контуров) гласит: в неразветвленной цепи или в каждом контуре разветвленной цепи алгебраическая сумма ЭДС всех источников равна сумме всех падений напряжения во внутренней и внешней цепи. Контур — это замкнутый участок схемы, по которому можно пройти и вернуться в исходную точку.

Если цепь содержит несколько источников, то их ЭДС алгебраически складываются. Если источники включены навстречу друг другу (т. е. их полярности противоположны), то их ЭДС вычитаются. Для замкнутого контура справедлива следующая формула (направление обхода контура выбирается произвольно): в замкнутом контуре любой электрической цепи сумма всех ЭДС источников питания равна сумме падения напряжения на всех сопротивлениях этого контура. Второе правило Кирхгофа является следствием обобщенного закона Ома.

Пример. Применение правила Кирхгофа к электрической цепи, показанной на рис. 21.11. Порядок расчета следующий:

1) определяем количество токов в цепи и обозначаем их стрелками; направление стрелок произвольное (если отгадаем, получим в ответе плюс; если нет — минус, т. е. противоположное направление);

2) пишем уравнение неразрывности для токов узла (всего таких уравнений на одно меньше количества узлов): $I_1 - I_2 - I_3 = 0$;

3) применяем второе правило Кирхгофа (т. е. пишем законы Ома для разных замкнутых контуров цепи); круговыми стрелками показано направление обхода контуров, оно произвольное (ЭДС берется со знаком плюс, если направление тока в нем (от «-» к «+») совпадает с направлением обхода; если не совпадает — с минусом):

$$I_1(R_1 + r_1) + I_2R_2 = E_1, \\ -I_2R_2 + I_3R_3 = -E_2.$$

Таким образом, мы получили три независимых уравнения для трех неизвестных токов, то есть задача в принципе решена. Так же можно решить любую задачу по расчету сколь угодно сложной разветвленной цепи — число независимых уравнений у вас всегда будет соответствовать числу неизвестных токов.

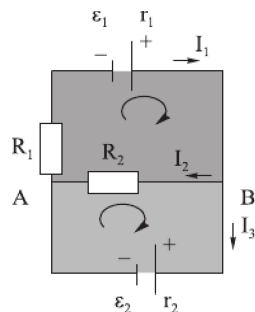


Рис. 21.11

Цепи, содержащие резистор и конденсатор (RC-цепочки). Рассмотрим соединение резистора и конденсатора, именуемое RC-цепочкой. Принцип работы RC-цепочки состоит в том, что заряженный конденсатор разряжается через резистор не мгновенно, а на протяжении некоторого интервала времени. Если на конденсатор подать постоянное напряжение, то он зарядится. В момент включения тока конденсатор не заряжен — количество зарядов на его обкладках одинаково. Но вот ток включен. Он погнал заряды на одну обкладку и начал откачивать их с другой. Раз в цепи началось движение зарядов, значит, в ней начал протекать ток. Ток будет течь до тех пор, пока конденсатор не зарядится полностью. По достижении этого предела ток прекратится.

Следовательно, если в цепи постоянного тока есть конденсатор, то после ее замыкания ток в ней будет течь столько времени, сколько нужно для полного заряда конденсатора. Если сопротивление цепи, через которую заряжается конденсатор, сравнительно невелико, то время заряда оказывается очень коротким: оно длится ничтожные доли секунды, после чего течение тока прекращается.

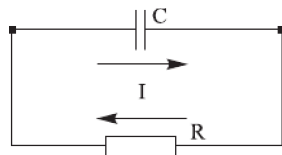


Рис. 21.12

В идеальных условиях, когда у нас бесконечно мощный источник напряжения с нулевым внутренним сопротивлением, идеальные сверхпроводящие провода и абсолютно безупречный конденсатор, этот процесс будет происходить мгновенно, со временем, равным 0, равно как и разряд. Но в реальности всегда существуют сопротивления, вроде резистора или внутреннего сопротивления источника напряжения. В этом случае скорость заряда конденсатора будет зависеть от сопротивлений в цепи и емкости конденсатора.

Рассмотрим для примера ток в электрической цепи, состоящей из конденсатора емкостью C и резистора сопротивлением R , соединенных последовательно.

Значение тока заряда или разряда конденсатора определится выражением $I = C(dU/dt)$, а значение тока в резисторе, согласно закону Ома, составит U/R , где U — напряжение заряда конденсатора. Из рис. 21.12 видно, что электрический ток I в элементах C и R цепи будет иметь одинаковое значение и противоположное направление согласно закону Кирхгофа. Следовательно, его можно выразить следующим образом: $I = C(dU/dt) = -U/R$.

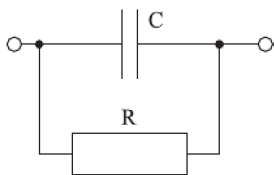


Рис. 21.13. Параллельная RC-цепочка

Решение уравнения имеет вид

$$U = \text{const} \cdot e^{-t/RC}.$$

Здесь const — константа, величина, определяемая начальными условиями. Если конденсатор емкостью C , соединенный последовательно с резистором сопротивлением R , подключить к источнику постоянного напряжения U , в цепи пойдет ток, который за любое время t зарядит конденсатор до значения U_C .

Тогда напряжение U_C на выводах конденсатора будет увеличиваться от нуля до значения U по экспоненте: $U_C = U(1 - e^{-t/RC})$.

Время, численно равное произведению RC , называется постоянной времени цепи RC и обозначается греческой буквой τ . При $t = \tau$ напряжение на конденсаторе составит $U_C = U(1 - e^{-1}) = U(1 - 1/e)$.

Постоянная времени $\tau = RC$.

За время τ конденсатор зарядится до $(1 - 1/e) \cdot 100\% \approx 63,2\%$ значения U .

За время 3τ напряжение составит $(1 - 1/e^3) \cdot 100\% \approx 95\%$ значения U .

За время 5τ напряжение возрастет до $(1 - 1/e^5) \cdot 100\% \approx 99\%$ значения U .

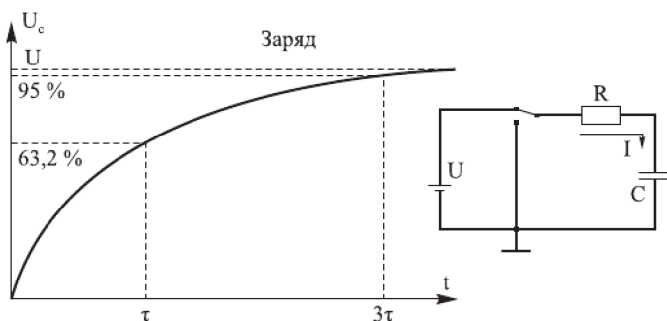


Рис. 21.14

Если к конденсатору емкостью C , заряженному до напряжения U , параллельно подключить резистор сопротивлением R , тогда в цепи пойдет ток *разряда* конденсатора. Напряжение на конденсаторе при разряде будет составлять $U_C = Ue^{-t/\tau} = U/e^{t/\tau}$.

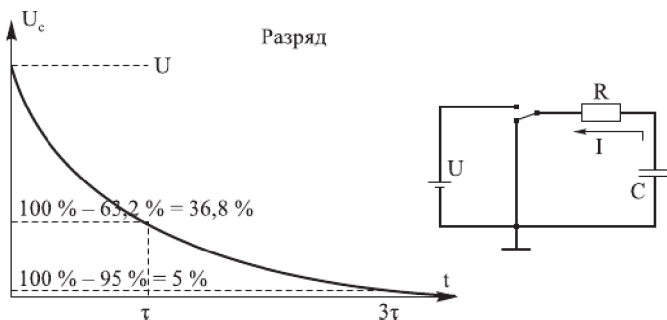


Рис. 21.15

За время τ напряжение на конденсаторе уменьшится до значения U/e , что составит $1/e \cdot 100 \% \approx 36,8 \%$ значения U .

За время 3τ конденсатор разрядится до $(1/e^3) \cdot 100 \% \approx 5 \%$ от значения U .

Где могут применяться RC цепи? Самое простое применение — организация задержки поступления сигнала.

Измерительные приборы в цепях постоянного тока. Вторая половина XIX века была периодом роста новой отрасли знаний — электротехники. Создание эффективных источников электрической энергии и применение их для различных практических целей побудили крупнейших электротехников второй половины XIX века заняться изобретением и разработкой различных электроизмерительных приборов, без которых стало немыслимо дальнейшее развитие электротехники. В это же время отдельные ученые в разных странах создают меры электрических величин, принимаемые ими в качестве эталонов, производят измерения в единицах, воспроизводимых этими мерами, и даже проводят сличение мер в разных лабораториях.

На практике применяют различные методы измерения электрических величин. Как правило, числовое значение измеряемой величины определяют непосредственно по показанию прибора, шкала которого отрегулирована в единицах измеряемой величины. К подобным измерениям относят определение силы тока по показанию амперметра, напряжения по показанию вольтметра и т. д.

Амперметр. При измерениях амперметр включают в цепь последовательно тому участку, на котором измеряется величина тока. Поэтому амперметры должны иметь очень малое собственное сопротивление, чтобы их включение не изменяло заметно величины тока в цепи. Для расширения пределов измерения амперметров к ним присоединяют шунт. Шунт — это малое сопротивление $r_{ш}$, включенное в цепь параллельно сопротивлению амперметра (при этом уменьшается общее сопротивление цепи), вследствие чего на амперметр ответвляется только малая часть из полного тока, текущего по магистральному проводу (рис. 21.16).

Введем коэффициент увеличения предела измерения амперметра n_A : $n_A = I/I_A$, где I — величина тока в магистральной цепи, I_A — величина тока, текущего через амперметр.

Если r_A — сопротивление амперметра, тогда между сопротивлением шунта $r_{ш}$ и амперметра связь выражается соотношением $r_{ш} = r_A/(n - 1)$.

Такой способ включения амперметра в цепь был впервые предложен американским изобретателем Эдвардом Вестоном в 1893 году.

Вольтметр. Вольтметрами называют приборы, служащие для измерения напряжения. Вольтметр включается параллельно тому участку, на котором хотят измерить падение напряжения (разность потенциалов, рис. 21.17). Для того чтобы включение вольтметра не сказывалось на режиме работы цепи, сопротивление вольтметра должно быть значительно больше, чем сопротивление участка, на котором производится измерение напряжения.

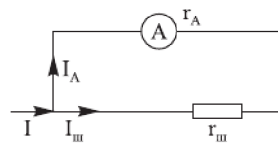


Рис. 21.16. Амперметр в цепи постоянного тока

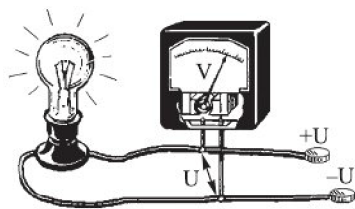


Рис. 21.17

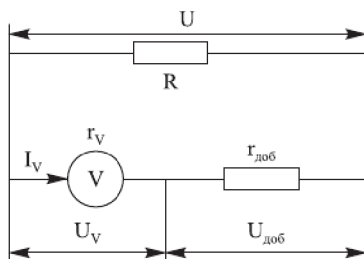


Рис. 21.18. Включение вольтметра в цепи постоянного тока

бора увековечено имя Луиджи Гальвани. Гальванометр был изобретен в начале 20-х годов XIX века. Первые приборы имели довольно простое устройство и простой принцип работы.

Для цепи, показанной на рис. 21.18, U — полное подводимое напряжение, U_v — падение напряжения, приходящееся на вольтметр. Можно изменить пределы шкалы вольтметра (т. е. увеличить пределы измерения напряжения). Введем коэффициент увеличения предела измерения вольтметра n_v : $n_v = U/U_v$, где U — полное подводимое напряжение, U_v — падение напряжения, приходящееся на вольтметр. Для того чтобы увеличить предел измерения вольтметра в n раз, необходимо последовательно вольтметру подключить добавочное сопротивление, величина которого в $(n - 1)$ раз больше сопротивления вольтметра: $r_{доб} = r_v(n - 1)$, где $r_{доб}$ — добавочное сопротивление, r_v — сопротивление вольтметра.

Гальванометр. Для измерения малых токов применяются весьма чувствительные приборы — гальванометры. В названии этого прибора увековечено имя Луиджи Гальвани. Гальванометр был изобретен в начале

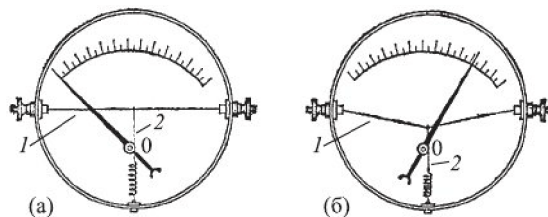


Рис. 21.19. Устройство теплового гальванометра (амперметра): а) тока через прибор нет; б) ток через прибор есть (sernam.ru/book_phis_t2.php?id=45)

Наиболее простой тип гальванометра, основанного на тепловом действии тока, показан на рис. 21.19. Он содержит тонкую проволоку (1), закрепленную на концах, через которую пропускают измеряемый ток. К ее середине прикреплен конец прочной тонкой нити (2), обернутой вокруг оси стрелки О и скрепленной другим концом, которая нагревается и удлиняется. При этом нить, пружиной, поворачивает стрелку на некоторый угол, зависящий от удлинения проволоки, т. е. от силы тока. На шкале гальванометра проставляют цифры, непосредственно указывающие силу тока в амперах (или долях ампера). Подсоединив к гальванометру шунт или добавочное сопротивление, его превращают в амперметр или вольтметр с соответствующими пределами измерений.

Впоследствии было создано довольно много разновидностей гальванометра данной конструкции, которые очень широко применялись для разного рода физических исследований. Наиболее чувствительные современные зеркальные

гальванометры имеют постоянную до 10^{-11} А/дел. У переносных гальванометров постоянная составляет примерно 10^{-8} – 10^{-9} А/дел.

Потенциометр. Потенциометр — это устройство для измерения разности потенциалов. Синоним потенциометра — реостат. Потенциометр, в принципе, является и делителем напряжения, где сопротивления образуются между крайними и средним контактами.

Схема включения потенциометра представлена на рис. 21.20. $U_{\Pi} = U_{\text{ист}} R_{\text{БВ}}/R_{\text{АВ}}$. Как правило, потенциометры функционируют в сочетании с ручкой; пользователь поворачивает ручку, и это вращательное движение преобразуется в изменение сопротивления электрической цепи. Такое изменение сопротивления используется для регулировки каких-либо параметров электрического сигнала, например громкости звука.

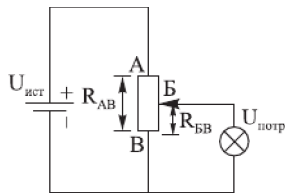


Рис. 21.20. Потенциометр как делитель напряжения

В путешествии по электричеству мы встречаемся с огромным разнообразием явлений. Обо всех не расскажешь сразу. Сейчас перейдем к рассказу о магнитах и магнитном поле. Оставив позади постоянный ток, цепи и приборы в цепи постоянного тока, мы подошли к изучению магнитного поля.

22. История в три тысячи лет. Свойства постоянных магнитов. Вектор магнитной индукции. Магнитное поле тока. Проводник с током в магнитном поле. Закон Ампера. Ферромагнетизм. Магнитное поле Земли. Движение электрического заряда в магнитном поле. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Масс-спектрометр. Циклотрон.

Человечество знает о магнитах еще с незапамятных времен. За много веков до нашей эры было известно, что некоторые каменные породы обладают свойством притягивать куски железа. Об этом упоминал в VI веке до нашей эры греческий философ Фалес. Говорят, Фалес был поражен, когда впервые увидел, как куски какой-то черной руды на расстоянии притягивали железо. «В этой руде, должно быть, есть жизнь!» — воскликнул он. А это был всего лишь обычный магнитный железняк. О свойстве притягивать железо кусками магнетита было в это же время известно и китайцам.

О свойствах магнита так писал Лукреций Кар (99–55 до н. э.):

Мне остается сказать, по какому закону природы
 Может железо к себе притягивать камень, который
 Греки магнитом зовут по названию месторождения,
 Ибо находится он в пределах отчизны магнетов,
 Этому камню народ удивляется, ибо нередко
 Цепью звено к звену, от него исходя, повисает.
 Можно ведь видеть порой, что, качаясь от легкого ветра,
 Пять или больше таких свободно спускается звеньев,

Все они вместе висят и, одно к одному прилепляясь,
Камня силу и связь друг от друга тогда испытуют:
Так его сила всегда беспрерывным вливается током...

(Лукреций Кар. «О природе вещей»)

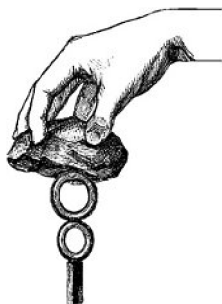


Рис. 22.1. Притягивание куском магнетита железных предметов



Рис. 22.2. Первый компас

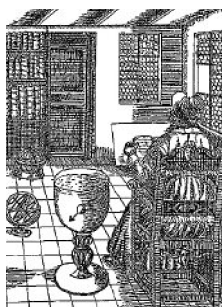


Рис. 22.3. Магнитная стрелка, свободно плавающая в жидкости (компас Гильберта)

Свойства магнетита поражали людей, поэтому на протяжении многих веков магнетит использовали для магических фокусов, знахарства (лечения магнитом), он служил предметом самых фантастических предположений и рассказов о чудодейственном камне. В китайских литературных памятниках I–III веков нашей эры магнитный указатель на юг (прародитель компаса) упоминается как общезвестный прибор. Первые компасы появились на суше. Ими пользовались военачальники, завоевывавшие далекие земли, и купцы, которые водили торговые караваны. Старинные компасы ничуть не походили на современные. Это были деревянные фигурки, зачастую художественно выполненные. Они устанавливались на игрушечных повозках и вращались на вертикальном стержне. В основании фигурки вделывали кусочек магнитной руды или намагниченного железа, поэтому ее вытянутая рука всегда указывала на юг. Потом такие же компасы перекочевали на корабли. В Европе компас появился лишь в XIII веке. В это время было предпринято первое научное изучение свойств магнита ученым Петром Перегрином. Петр Перегрин (Пьер из Марикура) был простым человеком из деревни Марикур в Пикардии. В своих экспериментах с магнетитом Петр Перегрин первым установил, что два полюса куска магнетита расположены в двух вполне определенных точках, и доказал, что одинаковые полюса отталкиваются, а противоположные притягиваются. Он экспериментально установил, что любой кусок магнетита — полноценный магнит. Перегрин первым положил намагниченную иглу на тонкий стержень и окружил ее градуированной окружностью. Он определял положение объектов по магнитным азимутам (как и сегодня делают при топографической съемке с помощью компаса).

Уже упоминавшийся ранее лейб-медик королевы Елизаветы Тюдор Уильям Гильберт в изданном 1600 году в большом трактате по магнетизму и электричеству «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле» объясняет действие магнитного компаса. Гильберт создал первую теорию магнитных явлений. Проводя опыт с железным шаром, который взаимодействовал с магнитной стрелкой, впервые выдвинул предположение о том, что Земля является гигантским магнитом.

Также он выдвинул идею о том, что магнитные полюсы Земли могут совпадать с географическими полюсами планеты.

Несмотря на то что простейшие проявления магнетизма были известны очень давно и знакомы большинству людей, объяснить эти, казалось бы, простые явления на основе фундаментальных принципов физики удалось лишь сравнительно недавно.

Постоянные магниты и магнитные поля. Существуют магниты двух разных видов. Одни — так называемые постоянные магниты. Их магнитные свойства не связаны с использованием внешних источников. Магнитные свойства стержневого магнита наиболее заметны вблизи его концов. Если такой магнит подвесить за среднюю часть так, чтобы он мог свободно поворачиваться в горизонтальной плоскости, то он займет положение, примерно соответствующее направлению с севера на юг. Конец стержня, указывающий на север, называют северным полюсом, а противоположный конец — южным полюсом. Разноименные полюса двух магнитов притягиваются друг к другу, а одноименные взаимно отталкиваются. Если к одному из полюсов магнита приблизить брусок немагнитного железа, то последний временно намагнитится. При этом ближний к полюсу магнита полюс намагнитенного бруска будет противоположным по наименованию, а дальний — одноименным. Если прямолинейный магнит распилить по нейтральной линии, то получатся два самостоятельных магнита, причем полярность концов магнита сохранится, а на концах, полученных в результате распила, возникнут противоположные полюсы. Каждый из полученных магнитов можно также разделить на два магнита, и сколько бы мы ни продолжали такое деление, мы всегда будем получать самостоятельные магниты с двумя полюсами.

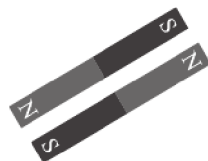


Рис. 22.4. Постоянный магнит: N — северный полюс, S — южный полюс магнита

В правильности обоих выводов нетрудно убедиться практически. Возьмите компас и поднесите к нему один из полюсов прямолинейного магнита, например северный. Вы увидите, что стрелка моментально повернется своим южным концом к северному полюсу магнита. Если быстро повернуть магнит на 180° , то сразу же повернется на 180° и магнитная стрелка, т. е. ее северный полюс будет обращен к южному полюсу магнита. Получить же брусок с одним магнитным полюсом невозможно.

Магнит притягивает предметы из магнитных материалов, не находясь в соприкосновении с ними. Такое действие на расстоянии объясняется существованием в пространстве вокруг магнита магнитного поля. Некоторое представление об интенсивности и направлении этого магнитного поля можно получить, насыпав на лист картона или стекла, положенный на магнит, железные опилки. Опилки выстроятся цепочками в направлении поля, а густота линий из опилок будет соответствовать интенсивности этого поля (рис. 22.5).

Магнитные силы магнитного поля действуют в определенных направлениях. Направления действия магнитных сил условились называть магнитными силовыми линиями. Этим термином мы пользовались для изображения электрического поля. Надо помнить, что магнитные силовые линии нематериальны: это — условное понятие, введенное только для облегчения понимания свойств магнитного поля. Форма магнитного поля, т. е. расположение в пространстве магнитных силовых линий, зависит от формы самого магнита. Магнитные силовые линии

обладают рядом свойств: они всегда замкнуты (в отличие от силовых линий электрических зарядов), никогда не пересекаются, имеют стремление пойти по кратчайшему пути и оттолкнуться друг от друга, если направлены в одну сторону. Принято считать, что силовые линии выходят из северного полюса магнита и входят в его южный полюс; внутри магнита они имеют направление от южного полюса к северному. Таким образом, направление магнитного поля можно определить как направление, которое указывает северный полюс стрелки компаса, помещенного в эту точку.

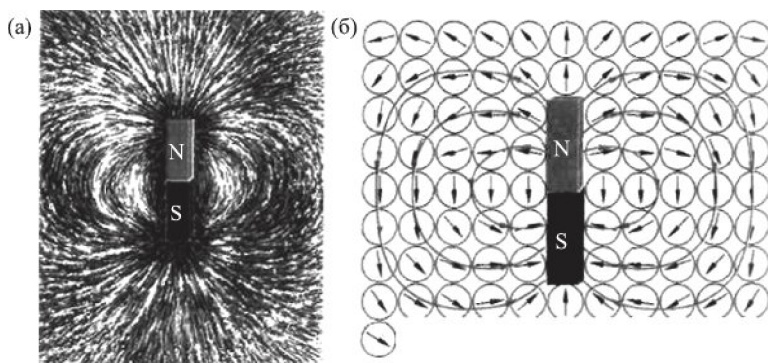


Рис. 22.5. Магнитное поле постоянного магнита: а) железные опилки в поле постоянного магнита; б) магнитные стрелки в поле постоянного магнита

Магнитное поле в любой точке можно характеризовать вектором \mathbf{B} , который называется вектором магнитной индукции или магнитной индукцией в точке. Величину \mathbf{B} можно определить через вращающий момент (равен векторному произведению радиуса-вектора, проведенного от оси вращения к точке приложения силы, и вектора этой силы), действующий на магнитную стрелку. Чем больше момент, тем сильнее магнитное поле. Направление \mathbf{B} устанавливается описанным выше способом.

Магнитная индукция имеет направление. Графически ее можно зарисовывать в виде линий. Линии индукции магнитного поля — магнитные силовые линии — это линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора магнитной индукции. В однородном магнитном поле линии магнитной индукции параллельны, и вектор магнитной индукции будет направлен также во всех точках. Вдоль этих линий располагаются магнитные стрелки.

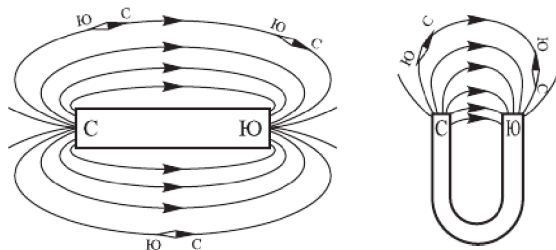


Рис. 22.6. Магнитные силовые линии вокруг прямого и подковообразного магнитов

Магнитное поле, создаваемое электрическим током.

В июне 1820 года малоизвестный датский физик Эрстед (1777–1851) печатает на латинском языке небольшую работу под заголовком «Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку». В работе нашло отражение явление, наблюдавшееся Эрстедом в опытах.

Эрстед занимался тем, что изучал возникновение тепла под действием электрических разрядов. В своих опытах он соединял полюсы вольтовой батареи проволокой и раздумывал, что при этом происходит с электричеством, и продолжал читать лекции. На одной из таких лекций произошло открытие, которое сделало Эрстеда знаменитым во всей научной Европе. 15 февраля 1820 года Эрстед, уже заслуженный профессор химии Копенгагенского университета, читал своим студентам лекцию, которая сопровождалась демонстрациями. На лабораторном столе находились источник тока, провод, замыкающие его зажимы и компас. В то время, когда Эрстед замыкал цепь, стрелка компаса вздрагивала и поворачивалась. При размыкании цепи стрелка возвращалась обратно. Это было первое экспериментальное подтверждение связи электричества и магнетизма. Мемуар Эрстеда об этом открытии вышел в свет 21 июля 1820 года. Эрстед ставил опыты, настойчиво исследуя наблюдаемое явление. А уже через несколько дней мемуар появился в Женеве, где в то время был с визитом вездесущий Араго. На первом же заседании Академии, на котором Араго присутствовал сразу по возвращении, 4 сентября 1820 года он делает устное сообщение об опытах Эрстеда. Записи, сделанные в академическом журнале, свидетельствуют, что академики просили Араго уже на следующем заседании, 22 сентября, показать всем присутствующим опыт Эрстеда, что называется, «вживую». Сегодня любой школьник без труда воспроизведет опыт Эрстеда. Но тогда... В своем мемуаре ученый пишет резюме: «Основной вывод из этих опытов состоит в том, что магнитная стрелка отклоняется от своего положения равновесия под действием вольтаического аппарата и что этот эффект проявляется, когда контур замкнут, и он не проявляется, когда контур разомкнут. Именно потому, что контур оставался разомкнутым, не увенчались успехом попытки такого же рода, сделанные несколько лет тому назад известными физиками». Таким образом, Эрстед обнаружил, что электрический ток создает магнитное поле, т. е. установил связь между электричеством и магнетизмом. Однако большого интереса у академиков сообщение Араго не вызывало. Но Ампера оно захватило полностью. Он выступил здесь не только как теоретик, но занялся в маленькой комнатке своей скромной квартиры проведением опытов, для чего даже собственноручно изготовил специальный столик, который, как реликвия, сохраняется поныне в Коллеж де Франс. Он отложил все остальные дела и 18 и 26 сентября 1820 года сделал свои первые сообщения об электромагнетизме. Ампер закончил свое выступление следующими словами: «Я описал приборы, которые я намереваюсь



Рис. 22.7. Ханс Кристиан Эрстед



Рис. 22.8. Компас, сыгравший роль «великолепной случайности» в опытах Эрстеда (А.Томилин. «Мир Электричества»)

построить, и среди прочих гальванические (то есть обтекаемые током) спирали и завитки. Я высказываю ту мысль, что последние должны производить во всех случаях такой же эффект, как магниты, ...и *сведу тем самым все магнитные явления к чисто электрическим эффектам*». Фактически за эти две недели Ампер пришел к своим самым главным научным результатам. Влияние этих трудов Ампера на многие отрасли науки — от физики атома и элементарных частиц до электротехники и геофизики — невозможно переоценить. Несмотря на нападки своих научных противников, Ампер продолжал свои эксперименты.

1. Магнитное поле прямолинейного проводника. Если к прямолинейному проводнику с электрическим током поднести магнитную стрелку, то она будет стремиться стать перпендикулярно плоскости, проходящей через ось проводника и центр вращения стрелки. Это указывает на то, что на стрелку действуют особые силы, которые называются магнитными силами.

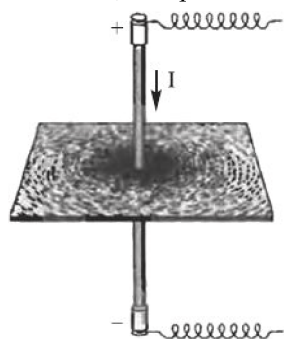


Рис. 22.9. Под действием магнитного поля тока железные опилки располагаются вокруг проводника не беспорядочно, а по концентрическим окружностям

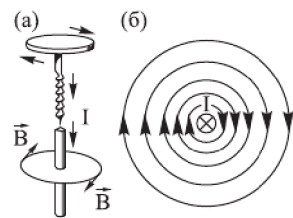


Рис. 22.10. Силовые линии вокруг прямого проводника с током

Если продеть через картон толстый проводник и пропустить по нему электрический ток, то стальные опилки, насыпанные на картон, расположатся вокруг проводника по концентрическим окружностям, представляющим собой в данном случае так называемые магнитные индукционные линии (рис. 22.9). Мы можем передвигать картон вверх или вниз по проводнику, но расположение стальных опилок не изменится. Следовательно, магнитное поле возникает вокруг проводника по всей его длине.

Если менять направление тока в проводнике, можно увидеть, что магнитные стрелки будут поворачиваться. Это показывает, что направление магнитных индукционных линий меняется с изменением направления тока в проводнике.

Магнитные индукционные линии вокруг проводника с током обладают следующими свойствами: 1) магнитные индукционные линии прямолинейного проводника имеют форму концентрических окружностей; 2) чем ближе к проводнику, тем гуще располагаются магнитные индукционные линии; 3) магнитная индукция (интенсивность поля) зависит от величины тока в проводнике; 4) направление магнитных индукционных линий зависит от направления тока в проводнике.

Направление линий индукции определяется правилом правого винта (правило буравчика): если поворачивать головку винта так, чтобы поступательное движение острия винта происходило вдоль тока в проводнике, то направление вращения головки указывает направление линий магнитной индукции поля прямого проводника с током. На рис. 22.10, *а* прямолинейный проводник с током расположен в плоскости рисунка, линии индукции — в плоскости, перпендикулярной рисунку. На рис. 22.10, *б* изображено се-

чение проводника, расположенного перпендикулярно плоскости рисунка, ток в нем направлен от нас (это обозначается крестиком « \times »), линии индукции располагаются в плоскости рисунка.

2. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Для определения силовой характеристики магнитного поля недостаточно только знания направления магнитного поля в каждой его точке, нам надо знать и абсолютную величину этой силы (модуль силы). Для упрощения задачи рассмотрим установку для измерения силы, действующей на проводник с током, находящийся в поле подковообразного магнита. Максимальное поле сосредоточено вблизи полюсов такого магнита, в эту область мы поместим проводник с током. Он способен свободно двигаться в горизонтальной плоскости, так как подвешен на двух вертикальных нитях. Далее можно к середине испытуемого проводника прикрепить маленькое зеркальце, которое будет отбрасывать световой зайчик от луча света, посылаемого от неподвижного источника света (фонарика, например), закрепляемого на стойке вблизи основной установки (на рисунке не показано). По перемещению зайчика можно будет судить об отклонении проводника от положения равновесия при пропускании тока через проводник и косвенно о механической силе, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля подковообразного магнита.

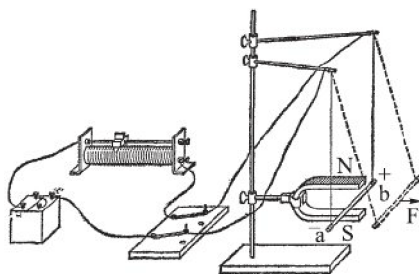


Рис. 22.11. Действие магнитного поля на прямолинейный проводник с током

Было замечено, что чем больше сила тока в цепи проводника, тем больше сила, с которой магнитное поле подковы толкало проводник с током. И чем больше выбиралась длина проводника, помещаемого в поле магнита, тем больше становилась эта же по природе сила. То есть сила прямо пропорциональна силе тока I и длине проводника с током l . Когда направление силы тока в проводнике перпендикулярно магнитным линиям индукции подковообразного магнита, эта сила максимальна и формулу можно записать так: $F \sim I \cdot l$. Направление действия силы F обычно определяют по правилу левой руки: ладонь левой руки нужно расположить так, чтобы магнитные линии входили в нее, и четыре вытянутых пальца совместить с направлением тока; тогда расположенный под прямым углом большой палец укажет направление действия электромагнитной силы.



Рис. 22.12. Определение направления силы, действующей на проводник с током в магнитном поле

Для того чтобы изменить направление электромагнитной силы, как следует из правила левой руки, необходимо изменить направление тока в проводнике или же направление магнитного поля. Сила F возникает только в том случае, если проводник расположен перпендикулярно или под некоторым углом к магнитным силовым линиям поля. Если же проводник расположен вдоль силовых линий по-

ля, то электромагнитная сила будет равна нулю. Иными словами, сила зависит от угла ϕ между проводником и направлением силовых линий так: $F \sim I / \sin \phi$.

Возникновение электромагнитной силы F при взаимодействии проводника с током и магнитного поля можно наглядно представить как результат взаимодействия двух магнитных полей.

Мы выяснили, что вокруг проводника с током возникает свое собственное круговое магнитное поле. Это поле будет складываться с внешним магнитным полем (например, постоянного магнита), в которое помещен проводник с током. При этом справа от проводника, где силовые линии поля проводника совпадают с линиями внешнего поля, происходит сгущение силовых линий; слева от проводника, где силовые линии поля проводника направлены навстречу линиям внешнего поля, происходит разрежение силовых линий.

Выше мы отметили, что величину вектора магнитной индукции \mathbf{B} можно определить через вращающий момент, действующий на магнитную стрелку. Воспользуемся соотношением для силы F , приведенным выше, введя коэффициент пропорциональности равным k (он зависит от выбора системы единиц). Тогда $F = kI / \sin \phi$. Сила будет максимальной, когда угол $\phi = 90^\circ$, а если проводник параллелен магнитному полю и $\phi = 0$, тогда сила $F = 0$. Если $k = 1$, тогда модуль вектора магнитной индукции определяется формулой $B = F_{\text{макс}} / I l$, где $F_{\text{макс}}$ — максимальное значение силы, действующей на прямолинейный отрезок l проводника, по которому течет ток силой I . На рис. 22.13 изображен проводник с током I , лежащий в плоскости рисунка; направление тока I указано стрелкой. Проводник находится в однородном магнитном поле, направление которого параллельно

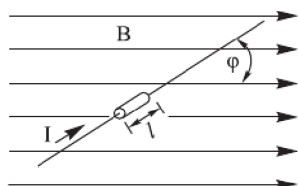


Рис. 22.13. Определение индукции магнитного поля B по силе, с которой оно действует на проводник длиной l с электрическим током I

плоскости рисунка и составляет угол ϕ с направлением проводника с током. Направление силы F перпендикулярно как направлению магнитного поля, так и направлению тока. Величину B в принципе можно определить, поворачивая проводник, пока F не достигнет максимального значения, при котором $B = F_{\text{макс}} / I l$. Направление магнитного поля тоже можно установить, поворачивая проводник, пока сила F не обратится в нуль, т. е. проводник окажется параллельным B . Хотя эти правила трудно применять на практике, экспериментальные методы определения величины и направления магнитных полей основаны на них.

Приведенная формула для F справедлива для случая однородного магнитного поля и прямолинейного проводника. Если же поле неоднородно или проводник не везде составляет одинаковый угол с B , то приведенное уравнение записывают в дифференциальной форме, а затем полную силу определяют интегрированием.

В системе СИ единицей магнитной индукции B является тесла (Тл).

Тесла численно равна индукции такого однородного магнитного поля, в котором на 1 метр длины прямого проводника, по которому протекает ток 1 ампер и который расположен перпендикулярно вектору магнитной индукции, действует сила 1 ньютон. Ранее эта единица называлась «вебер на квадратный метр» ($\text{Вб}/\text{м}^2$).

Для магнитных полей справедлив принцип суперпозиции: в любой точке поля вектор магнитной индукции результирующего поля равен сумме векторов полей, создаваемых каждой точкой в отдельности:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 + \dots + \mathbf{B}_n.$$

3. Виток с током в магнитном поле. Рассмотрим поведение в магнитном поле прямоугольной рамки с током, имеющей неподвижную ось (рис. 22.14).

Когда рамка расположена так, как показано на рис. 22.14 (т. е. магнитные силовые линии параллельны ее плоскости), силы действуют только на ее вертикальные стороны, так как горизонтальные стороны направлены вдоль силовых линий.

Силы, действующие на вертикальные стороны рамки, одинаковы и направлены в противоположные стороны, т. е. образуют пару. Плечо каждой из сил равно $b/2$. Результирующий вращающий момент M (с учетом выражения для силы, действующей на проводник с током в магнитном поле) равен

$$M = IBab/2 \sin \varphi + IBab/2 \sin \varphi = IBab \sin \varphi,$$

где a — высота рамки.

При указанной ориентации рамки момент сил (M) максимален и равен $M = IBab$. Учитывая, что произведение ab равно площади рамки S , выражение для момента можно записать следующим образом:

$$M = IBS \sin \varphi.$$

Полученная формула для прямоугольной рамки, справедлива для любой плоской катушки с числом витков N . В этом случае $M = NIA B \sin \varphi$. Произведение NIA называется магнитным дипольным моментом катушки. Под действием момента M происходит вращение рамки. Вращающее действие магнитного поля используется в электродвигателях — машинах, преобразующих электрическую энергию в механическую работу.

Приложение. Гальванометр. Эффект вращения рамки с током в магнитном поле используется в приборе, который позволяет сравнивать силы электрических токов. Уже в первых приборах для измерения постоянного тока были найдены все основные элементы, которые сохранились до наших дней. Это, во-первых, устройство, создающее движущий момент за счет взаимодействия измеряемого тока и магнитного поля; во-вторых, устройство для создания противодействующего момента; в-третьих, отсчетное устройство.

Одним из таких приборов — это уже знакомый нам прибор — гальванометр. Первый такой прибор был построен И. Швайгером в 1820 году. Он представлял собой катушку провода, внутри которой подвешена магнитная стрелка. Измеряемый ток пропусклся через катушку и создавал вокруг стрелки магнитное поле. На стрелку действовал вращающий момент, пропорциональный силе тока, который уравнивался за счет упругости нити подвеса. В дальнейшем этот прибор был усовершенствован Томсоном (Кельвином). Подобные гальванометры относятся к классу приборов с подвижной стрелкой. Хотя гальванометр с подвижной стрелкой можно сделать чрезвычайно чувствительным, его почти полностью

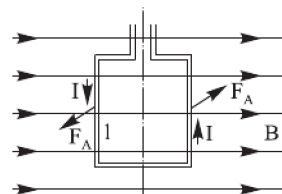


Рис. 22.14. Рамка в поле постоянного магнита

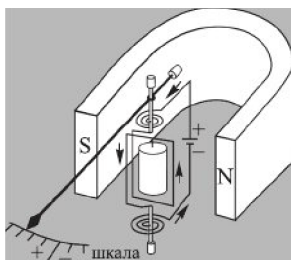


Рис. 22.15. Гальванометр для измерения силы электрического тока

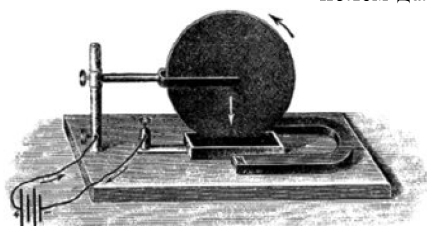


Рис. 22.16. Колесо Барлоу

мещены два медных зубчатых колеса. Когда через колеса проходил ток, они начинали вращаться в одном направлении.

При этом ученый заметил, что смена полярности контактов и полюсов магнитов изменяла и направление вращения колес. По сути, Барлоу изобрел первый униполярный электродвигатель.

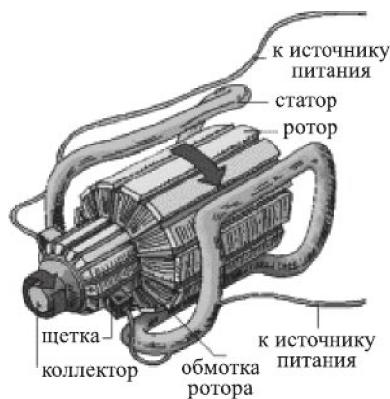


Рис. 22.17. Устройство простейшего коллекторного двигателя постоянного тока

Димо периодическое изменение направления тока. Такое переключение осуществляется с помощью коллектора и щеток.

Щетки — это неподвижные контакты, которые скользят по пластинам коллектора, укрепленным на валу двигателя. Если к обмотке электромагнита под-

вытеснил прибор с подвижной катушкой или рамкой, помещенной между полюсами постоянного магнита. Стрелка соединена с подвижной рамкой, подвешенной между полюсами подковообразного магнита. Магнитное поле большого подковообразного магнита в гальванометре оказывается столь сильным по сравнению с магнитным полем Земли, что влиянием последнего можно пренебречь (рис. 22.15).

Электродвигатель. Теоретические исследования взаимодействия электрического тока с магнитным полем дали толчок к практическому применению по-

лученных результатов. Уже в 1824 году английский физик и математик Питер Барлоу (1776–1862) с помощью прибора наглядно продемонстрировал возможность превращения электрической энергии в механическую. Колесо Барлоу представляло собой два горизонтально расположенных П-образных постоянных магнита, под которыми на одной оси раз-

Один из первых практических электромоторов постоянного тока — электродвигатель с вращающимся рабочим валом — ротором — построил Б. С. Якоби. В 1838 году его изобретение нашло практическое применение для приведения в движение гребных колес небольшого судна на р. Неве. К 70-м гг. XIX века электродвигатель был уже настолько усовершенствован, что в таком виде сохранился до наших дней. Принцип действия электродвигателя постоянного тока такой же, что и гальванометра. Но есть и отличия в конструкции. Катушка электродвигателя имеет значительно большие размеры и наматывается на цилиндрический вращающийся сердечник — ротор. Ротор закреплен на валу. Для непрерывного вращения ротора необхо-

вести электрический ток, то между его полюсами возникает магнитное поле. При этом виток провода, размещенный на роторе, к которому ток подводится через коллектор с помощью угольных щеток, начинает вращаться, увлекая за собой ротор. Через каждые пол-оборота коллектор переключается на другую щетку. В результате этого через пол-оборота изменяется направление тока в катушке, и ротор постоянно вращается в одну сторону.

В электродвигателе происходит преобразование электрической энергии в механическую (энергию вращательного движения). Первые электрические двигатели, пришедшие на смену паровым, производили большое впечатление. В отличие от парового мотора их мощь была непонятна и невидима. Один француз писал «Мы не привыкли видеть машины, которые работают без очевидной причины. Его мистическое движение ставит нас в тупик. Секрет его существования шокирует нас».

Связь между магнитными полями и их источниками.

1. Магнитное поле прямолинейного проводника.

Из рис. 22.9 видно, что силовые линии магнитного поля, создаваемого электрическим током в длинном прямолинейном проводнике, имеют вид окружностей. Из опыта также следует, что магнитная индукция в данной точке будет тем больше, чем больше сила тока в проводнике, и будет ослабевать по мере удаления от проводника. То есть $B \sim I/r$. Так оно и есть, если расстояние r по перпендикуляру до проводника намного меньше расстояния до его концов. Коэффициент пропорциональности записывается в виде $B = \mu_0 I / 2\pi r$. Константа μ_0 называется магнитной постоянной (магнитной проницаемостью вакуума) и равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м/А}$.

2. Магнитное поле соленоида.

Соленоидом называют катушку цилиндрической формы из проволоки, витки которой намотаны вплотную в одном направлении, а длина катушки значительно больше радиуса витка.

Изучение этого поля с помощью опилок показало, что внутри соленоида поле является однородным, магнитные линии представляют собой прямые линии, параллельные оси соленоида, которые расходятся на его концах и замыкаются вне соленоида (рис. 22.18). Нетрудно заметить сходство между магнитным полем соленоида (вне его) и магнитным полем постоянного стержневого магнита (рис. 22.6). Конец соленоида, из которого магнитные линии выходят, аналогичен северному полюсу магнита N, другой же конец соленоида, в который магнитные линии входят, аналогичен южному полюсу магнита S. Модуль магнитной индукции внутри однослойного соленоида вычисляется по формуле

$$B = \mu_0 n I,$$

где n — число витков, приходящееся на единицу длины соленоида, $n = N/l$ (N — число витков в соленоиде, l — длина соленоида), I — ток. Формула для B ,

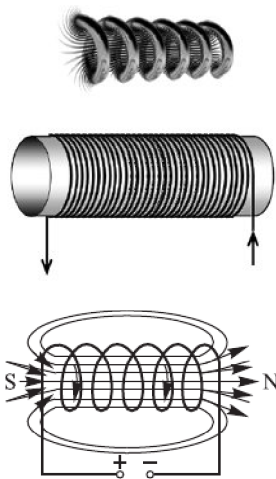


Рис. 22.18. Магнитное поле соленоида

строго говоря, справедлива для бесконечно длинного соленоида. Но для точек, не слишком близких к концу соленоида, приведенное выражение дает хорошие результаты.

Сила, действующая между двумя параллельными проводниками с током. Ампер путем тщательных измерений сумел определить, что сила механического взаимодействия между двумя проводниками, по которым протекают токи, пропорциональна силам токов и падает по мере увеличения расстояния между ними.

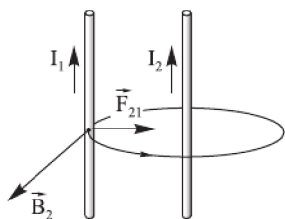


Рис. 22.19. Параллельные проводники с током

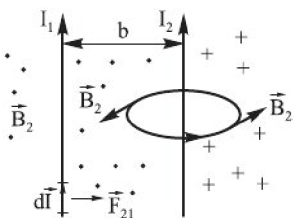


Рис. 22.20. К выводу силы Ампера

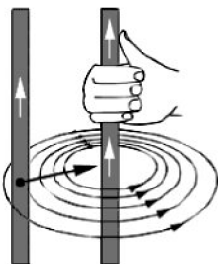


Рис. 22.21. Направление силовых линий определяется по правилу правой руки, а направление воздействия на проводник — по правилу левой руки

Пусть b — расстояние между двумя параллельными, бесконечно длинными проводниками (рис. 22.19). Задачу следует решать так: один из проводников I_2 создает магнитное поле, второй I_1 находится в этом поле. Магнитная индукция, создаваемая током I_2 , на расстоянии b от него равна

$$B_2 = \mu_0 I_2 / (2\pi b).$$

Если I_1 и I_2 лежат в одной плоскости, то угол между B_2 и I_1 прямой. Следовательно,

$$\sin(\mathbf{I}, \mathbf{B}_2) = 1.$$

Тогда сила, действующая на элемент dl тока I_1 ,

$$F_{21} = B_2 I_1 dl = \mu_0 I_1 I_2 dl / (2\pi b).$$

На каждую единицу длины проводника действует сила $F_{21\text{ед}} = F_{21}/dl = \mu_0 I_1 I_2 / (2\pi b)$.

Понятно, что и со стороны первого проводника на второй действует точно такая же сила (в силу третьего закона Ньютона). Результирующая сила равна одной из этих сил.

Если эти два проводника будут воздействовать на третий, тогда их магнитные поля \mathbf{B}_1 и \mathbf{B}_2 нужно сложить векторно. Последняя формула лежит в основе определения единицы силы тока. Если $I_1 = I_2 = I = 1$ А, а расстояние между проводами 1 м, тогда

$$F_{21\text{ед}} = (4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м/А})(1 \text{ А})(1 \text{ А}) / (2\pi)(1 \text{ м}) = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}.$$

Итак, один ампер равен силе постоянного тока, которая, протекая по двум длинным прямолинейным параллельным проводникам, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, создает на участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Амперу принадлежит поразительная по предвидению гипотеза молекулярных токов. Он писал: «...Подлежит рассматривать магнит как собрание электрических токов, проходящих в плоскостях, перпендикулярных к его оси и направленных таким образом, что южный полюс магнита, которым он обращается к северу, находится справа от этих токов».

Ампер считал, что непрерывно циркулирующие токи возбуждают наблюдаемые магнитные действия на Земле. Далее он полагал, «если эта точка зрения (о молекулярных токах *ВК*) верна, то можно надеяться возбудить до некоторой степени магнетизм в тех телах, которые до сих пор, казалось, не могут быть намагничены».

Прошло совсем немного времени, и Фарадей подтвердил это предположение, показав, что в той или иной степени намагничиваются все вещества. Ампер также предпринял деление веществ на ферро-, диа- и парамагнетизм.



Рис. 22.22. Андре Мари Ампер (1775–1836)

Ферромагнетизм. Различные вещества по-разному ведут себя в магнитном поле. Некоторые материалы притягиваются магнитным полем, другие же отталкиваются им. Наличие этих эффектов легко продемонстрировать с помощью сильного электромагнита, один из полюсных наконечников которого заострен, а другой плоский. Магнитное поле у заостренного полюса намного сильнее, нежели у плоского. Если небольшой кусочек материала, подвешенный на длинной струне, поместить между полюсами такого магнита, то можно обнаружить действие на него силы. Действие этой силы можно обнаружить по незначительному смещению подвешенного кусочка материала при повороте магнита. Оказывается, что некоторые материалы сильно притягиваются заостренным полюсом, а все остальные — очень слабо. А есть и такие, которые не притягиваются заостренным полюсом, а слабо отталкиваются. Последний эффект легче всего наблюдать на маленьком цилиндре из висмута, который выталкивается из области сильного поля. Вещества, которые отталкиваются, подобно висмуту, называются диамагнетиками.

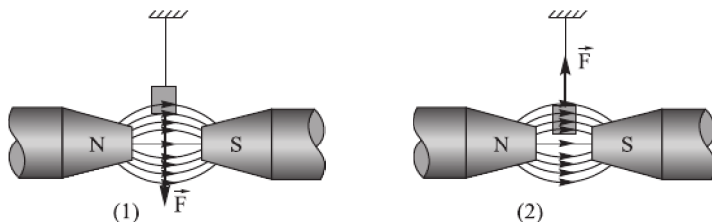


Рис. 22.23. Парамагнетик (1) и диамагнетик (2) в неоднородном магнитном поле

Это металлы Cu, Ag, Au, Be, Zn, полупроводники Ge и Si, сверхпроводники. Они слабо намагничиваются в направлении, противоположном направлению магнитного поля. Те вещества, которые проявили сильный эффект притяжения, называются ферромагнетиками (по названию железа (*ferrum*), известного своими магнитными свойствами издревле). Вещества, намного слабее намагничивающиеся в магнитном поле, чем ферромагнетики, называются парамагнетиками. Это Pt, Al, Mg, Ti, Zr и тугоплавкие металлы. Они намагничиваются также слабо, но в направлении намагничивающего поля.

Ферромагнетики обладают большим собственным магнитным полем и способны создавать при намагничивании большие магнитные поля. Стержень

из ферромагнитного материала, помещенный в магнитное поле, например в поле катушки, обтекаемой током, обнаруживает сильные магнитные свойства. На конце стержня, из которого магнитный поток выходит, возникает северный полюс N, а на противоположном его конце — южный полюс S. Ферромагнетиками являются металлы Fe, Ni, Co, многие редкоземельные металлы, а также химические соединения в сплавах.

Теория ферромагнетизма весьма сложна. Можно лишь упомянуть, что ферромагнитное тело внутри распадается на области самопроизвольной намагниченности — ферромагнитные домены, подобные микроскопическим постоянным магнитам, имеющим северный и южный полюса. Их размеры лежат в диапазоне 0,1–0,01 мм. Эти области относительно велики и содержат целые группы атомов. При определенных условиях домены на поверхности ферромагнетика можно наблюдать под микроскопом. В отдельных доменах магнитные поля имеют различные направления и в большом кристалле взаимно компенсируют друг друга. При внесении ферромагнитного образца во внешнее магнитное поле происходит упорядочение ориентации магнитных полей отдельных доменов.

С увеличением магнитной индукции внешнего поля возрастает степень упорядоченности ориентации отдельных доменов — магнитная индукция B возрастает. При некотором значении индукции внешнего поля наступает полное упорядочение ориентации доменов (рис. 22.24), возрастание магнитной индукции прекращается. Это явление называется магнитным насыщением.

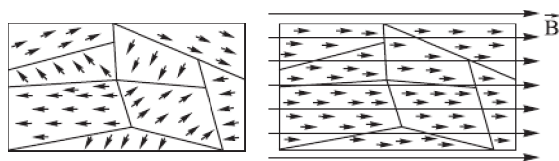


Рис. 22.24. Ориентация доменов ферромагнетика во внешнем магнитном поле

При вынесении ферромагнитного образца из внешнего магнитного поля значительная часть доменов сохраняет упорядоченную ориентацию — образец становится постоянным магнитом. Для изготовления постоянных магнитов используются сталь, сплавы железа с алюминием, никелем и кобальтом, оксиды железа и некоторых других металлов.

Упорядоченность ориентации доменов в ферромагнетике нарушается тепловыми колебаниями атомов в кристалле. Чем выше температура кристалла, тем быстрее разрушается порядок в ориентации доменов, вследствие чего образец размагничивается. Температура, выше которой вещество перестает быть ферромагнетиком, называется температурой Кюри. Температура Кюри у железа — 770 °C, у кобальта — 1130 °C, у никеля — 356 °C. Исчезновение ферромагнитных свойств у железа при высокой температуре можно наблюдать в опыте с лезвием бритвы, которое при нагревании пламенем отпадает от магнита.

Ферромагнитные материалы, способные усиливать магнитные поля в десятки тысяч раз, широко применяются в современной технике. Стальной сердечник является одной из основных деталей электрогенератора и электродвигателя, электромагнита и трансформатора. Тонкий слой ферромагнитного порошка на гибкой пленке используется для магнитной записи и воспроизведения звука.

Магнитное поле Земли. Известно, что магнитная стрелка, подвешенная на нити (или укрепленная на острие), устанавливается в каждой точке вблизи земной поверхности определенным образом. Этот факт свидетельствует о том, что вокруг Земли существует магнитное поле. О его существовании люди знали давно, они с давних времен использовали для ориентации компасы, стрелка которых одним концом показывает на север, другим — на юг. Магнитная стрелка устанавливается вдоль линий магнитной индукции поля Земли, которое называют геомагнитным. Наш земной шар — это очень большой магнит. Исследования показали, что магнитное поле Земли напоминает магнитное поле громадного стержневого магнита. Схематически это поле изображено на рис. 22.25.

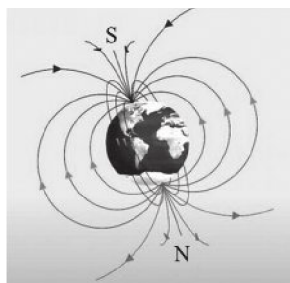


Рис. 22.25. Силовые линии магнитного поля Земли напоминают магнитное поле стержневого магнита

Географический юг этого поля находится недалеко от магнитного севера (южный магнитный полюс расположен на 75-м градусе северной широты и на 99-м градусе западной долготы), т. е. южный магнитный полюс Земли находится вблизи северного географического полюса (на северо-западе Гренландии). Северный магнитный полюс — на 66-м градусе южной широты и 141-м градусе восточной долготы, а географический север приближен к магнитному югу. Если компас разместить в магнитном поле Земли, то его северная стрелка ориентируется вдоль линий магнитной индукции в направлении южного магнитного полюса, то есть укажет нам, где располагается географический север. Угол ϕ (рис. 22.26) между географическим и магнитным меридианами данной местности называют магнитным склонением. Магнитное склонение называют западным или восточным, в зависимости от того, к западу или востоку от плоскости географического меридиана отклоняется северный полюс магнитной стрелки. Значение магнитного склонения указывается на магнитных картах и используется для определения истинного меридиана по показанию магнитного компаса. Характерные элементы земного магнетизма весьма медленно изменяются с течением времени — вековые изменения. Однако время от времени происходят магнитные бури, когда в течение нескольких часов магнитное поле Земли сильно искажается, а затем постепенно возвращается к прежним значениям. Такое резкое изменение влияет на самочувствие людей. Магнитное поле Земли является щитом, прикрывающим нашу планету от частиц, проникающих из космоса (солнечного ветра). Если кинетическая энергия частицы сравнительно небольшая, то частица отклоняется полем и не достигает поверхности Земли. Частицы же с большей энергией могут ее достигнуть. В области магнитных полюсов потоки частиц подходят гораздо ближе к поверхности Земли.

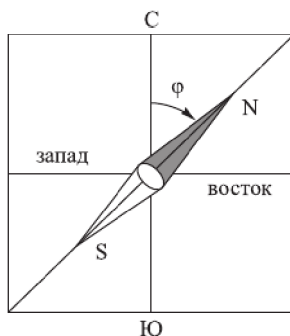


Рис. 22.26. Магнитное склонение

В 1834 году Гаусс и В. Вебер приняли участие в программе Ф. Гумбольдта наблюдений за магнитными явлениями, которую одновременно проводили около 50 обсерваторий, входивших в Геттингенский магнитный союз. Гаусс обобщил

магнитные данные и математически доказал гипотезу Гильберта о том, что источник главного (основного) магнитного поля находится внутри Земли.

Наблюдаемые свойства магнитного поля Земли согласуются с представлением о его возникновении благодаря механизму гидромагнитного динамо. В этом процессе первоначальное магнитное поле усиливается в результате движений (обычно конвективных или турбулентных) электропроводящего вещества в жидком ядре планеты. Подсчитано, что зона, в которой действует механизм магнитного динамо, находится на расстоянии 0,25–0,3 радиуса Земли.

Движение электрического заряда в магнитном поле. Сила Ампера, действующая на отрезок проводника длиной Δl с силой тока I , находящийся в магнитном поле B , $F = I\Delta l \sin \alpha$, может быть выражена через силы, действующие на отдельные носители заряда.

Пусть концентрация носителей свободного заряда в проводнике есть n , а q — заряд носителя. Тогда произведение n, q, v, S , где v — модуль скорости упорядоченного движения носителей по проводнику, а S — площадь поперечного сечения проводника, равно току, текущему по проводнику: $I = qnvS$.

Выражение для силы Ампера можно записать в виде $F = qnvS\Delta l \sin \alpha$.

Так как полное число N носителей свободного заряда в проводнике длиной Δl и сечением S равно $nS\Delta l$, то сила, действующая на одну заряженную частицу, равна $F_d = qvB \sin \alpha$.

Эту силу называют силой Лоренца. Угол α в этом выражении равен углу между скоростью v и вектором магнитной индукции B . Направление силы Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, так же как и направление силы Ампера, может быть найдено по правилу левой руки, или по правилу буравчика. Сила Лоренца максимальна, когда частица движется перпендикулярно направлению B ($\alpha = 90^\circ$): $F = qvB$, и равна нулю, когда частица движется вдоль силовых линий ($\alpha = 0^\circ$).

При движении заряженной частицы в магнитном поле сила Лоренца работы не совершает. Поэтому модуль вектора скорости при движении частицы не изменяется. Если заряженная частица массы m движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца, а ее скорость v лежит в плоскости, перпендикулярной вектору B , то частица будет двигаться по окружности радиуса $R = mv/(qB)$ (рис. 22.27).

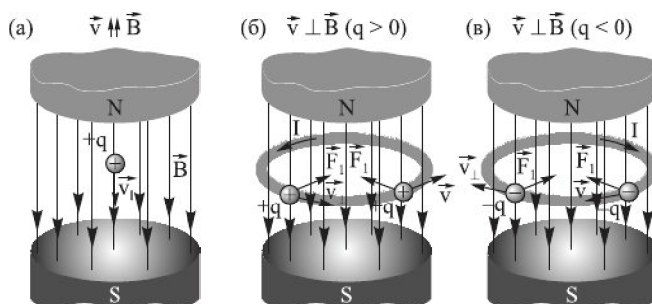


Рис. 22.27. Плоские траектории движения заряженных частиц в однородном магнитном поле

Сила Лоренца в этом случае играет роль центростремительной силы. Период обращения частицы в однородном магнитном поле равен

$$T = 2\pi R/v = 2\pi m/qB.$$

Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции, движется равномерно вдоль этих линий. Вращение отрицательного заряда по окружности происходит в направлении, противоположном вращению положительного заряда (рис. 22.27, в).

Угловая скорость движения заряженной частицы по круговой траектории,

$$\omega = v/R = vqB/mv = qB/m,$$

называется циклотронной частотой. Циклотронная частота не зависит от скорости (следовательно, и от кинетической энергии) частицы. Это обстоятельство используется в циклотронах (см. ниже) — ускорителях тяжелых частиц (протонов, ионов).

Если скорость рассматриваемой частицы v имеет составляющую v_{\parallel} вдоль направления магнитного поля, то такая частица будет двигаться в однородном магнитном поле по спирали. При этом радиус спирали R зависит от модуля перпендикулярной магнитному полю составляющей v_{\perp} вектора v , а шаг спирали p — от модуля продольной составляющей v_{\parallel} (рис. 22.28).

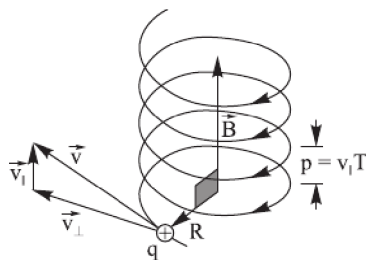


Рис. 22.28. Движение заряженной частицы по спирали в однородном магнитном поле

Таким образом, траектория заряженной частицы как бы навивается на линии магнитной индукции. Это явление используется в технике для магнитной термоизоляции высокотемпературной плазмы (см. далее с. 456).

В магнитном поле Земли быстрые заряженные частицы из космоса (главным образом электроны и протоны) захватываются магнитным полем Земли и образуют так называемые радиационные пояса (рис. 22.29), в которых частицы, как в магнитных ловушках, перемещаются туда и обратно по спиралеобразным траекториям между северным и южным магнитными полюсами за времена порядка долей секунд.

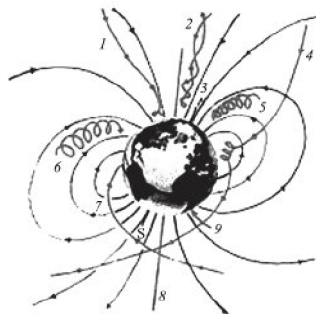


Рис. 22.29. Траектории движения протонов различных энергий в магнитосфере Земли

Радиационные пояса Земли простираются от расстояний порядка 500 км до десятков земных радиусов.

Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.

До сих пор мы говорили о частицах, находящихся только в электрическом или только в магнитном поле. Рассмотрим движение заряда q в случае одновременного наличия однородных и постоянных электрического (E) и магнитного (B) полей, перпендикулярных друг другу (так называемый случай скрещенных полей).

На заряженную частицу, находящуюся одновременно в электрическом и магнитном полях, действует сила со стороны электрического поля $F_e = qE$ и сила Лоренца, зависящая от индукции магнитного поля B , заряда и скорости частицы $F_B = qvB \sin \alpha$, где угол α — угол между направлением движения частицы и вектором индукции магнитного поля. В векторной форме вектор полной силы имеет вид $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ ($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ — векторное произведение векторов, см. дополнение). Первая из этих сил направлена (в случае положительного знака заряда) вдоль силовой линии электрического поля, а направление второй определяется правилом левой руки.

Если частица влетает в магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям, то на нее действует сила Лоренца, действие которой рассмотрено выше. Частица имеет ускорение, которое является центростремительным, при этом частица движется по окружности, плоскость которой перпендикулярна силовой линии магнитного поля.

При заданных полях E и B задача о движении заряда в поле — это обычная задача классической механики о движении частицы под действием известных сил.

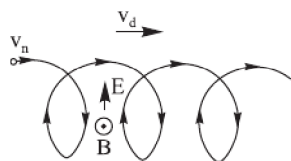


Рис. 22.30. Путь частицы в скрещенных электрическом и магнитном полях

Частицы, влетающие перпендикулярно полю B , будут двигаться по кривой, подобной изображенной на рис. 22.30 (это плоская кривая, а не спираль.) Качественно это движение понять нетрудно. Если частица (которую мы считаем положительной) движется в направлении поля E , то она набирает скорость и магнитное поле загибает ее меньше. А когда частица движется против поля E , то она теряет скорость и постепенно все больше и больше загибается магнитным полем. В результате же получается «дрейф» в направлении $(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$.

Можно показать, что такое движение есть, по существу, суперпозиция равномерного движения со скоростью $v_d = E/B$ и кругового.

Пример. Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U = 400$ В, попал в однородное магнитное поле с индукцией $B = 1,5$ мТл. Определить: 1) радиус R кривизны траектории; 2) частоту n вращения электрона в магнитном поле. Вектор скорости электрона перпендикулярен линиям индукции.

Решение. Радиус кривизны траектории электрона определим исходя из следующих соображений: на движущийся в магнитном поле электрон действует сила Лоренца F (действием силы тяжести в силу малости массы электрона можно пренебречь). Вектор силы Лоренца перпендикулярен вектору скорости и, следовательно, по второму закону Ньютона, сообщает электрону нормальное ускорение a_n : $a_n = mv/eB$.

Входящий в выражение импульс mv выразим через кинетическую энергию T электрона: $mv = \sqrt{(2mT)}$.

Кинетическая энергия электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U , определяется равенством $T = |e|U$. Подставив это выражение T в последнюю формулу, получим $mv = \sqrt{(2m|e|U)}$

Тогда выражение для радиуса кривизны приобретает вид $R = 1/B\sqrt{(2mU/e)}$. Подставляя числовые значения, получим $R = 45$ мм.

Масс-спектрометр. Итак, если частица движется по окружности, плоскость которой перпендикулярна силовой линии магнитного поля, тогда второй закон Ньютона запишется в виде

$$mv^2/R = qvB.$$

Из этой формулы можно получить выражение для удельного заряда частицы, т. е. для отношения заряда частицы к ее массе:

$$q/m = v/RB.$$

Из формулы видно, что для определения этой величины необходимо измерить скорость частицы и радиус окружности, по которой она движется в магнитном поле, и знать величину индукции магнитного поля.

Это обстоятельство используется в приборах, называемых масс-спектрометрами. Масс-спектрометры используются для разделения изотопов, то есть ядер атомов с одинаковым зарядом, но разными массами (например, ^{20}Ne и ^{22}Ne). Простейший масс-спектрометр показан на рис. 22.31.

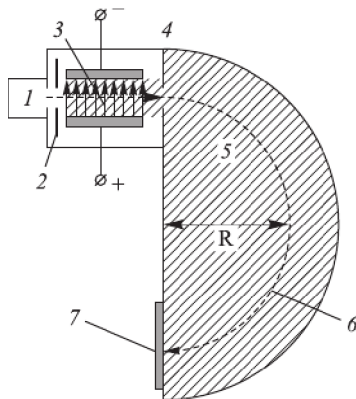


Рис. 22.31. Схема масс-спектрометра: 1 — ионный источник; 2, 4 — щелевые диафрагмы; 3 — область однородных и постоянных электрического и магнитного полей (ионы, вылетающие из источника S, проходят через несколько небольших отверстий, формирующих узкий пучок. Затем они попадают в селектор скоростей, в котором частицы движутся в скрещенных полях (силовые линии электрического поля направлены вдоль плоскости рисунка и показаны стрелками, область магнитного поля показана штриховкой, его силовые линии перпендикулярны плоскости рисунка)); 5 — область однородного и постоянного магнитного поля (силовые линии перпендикулярны плоскости рисунка); 6 — траектория иона; 7 — детектор

Электрическое поле создается между пластинами плоского конденсатора, магнитное поле — в зазоре между полюсами электромагнита. Начальная скорость v заряженных частиц направлена перпендикулярно векторам \mathbf{E} и \mathbf{B} . При условии $E = vB$ эти силы точно уравнивают друг друга. Если это условие выполняется, тогда частица будет двигаться равномерно и прямолинейно и, пролетев через конденсатор, пройдет через отверстие в экране. При заданных значениях электрического и магнитного полей селектор выделит частицы, движущиеся со скоростью $v = E/B$. Далее частицы с одним и тем же значением скорости попадают в камеру масс-спектрометра, в которой создано однородное магнитное поле B_1 . Частицы движутся в камере в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, под действием силы Лоренца. Траектории частиц представляют собой окружности радиусов $R = mv/qB_1$. Измеряя радиусы траекторий при известных значениях v и B_1 , можно определить отношение q/m . В случае изотопов ($q_1 = q_2$) масс-спектрометр позволяет разделить частицы с разными массами.

Если в качестве детектора ионов (7) использовать фотопластинку, то этот радиус с высокой точностью покажет черная точка в том месте проявленной фотопластинки, куда попадал пучок ионов. В современных масс-спектрометрах в качестве детекторов обычно используют электронные умножители или микроканальные пластинки. Масс-спектрометр позволяет определять массы с очень высокой относительной точностью $\Delta M/M = 10^{-8} - 10^{-7}$. Масс-спектрометры нашли широкое применение в физических и химических, а также биологических исследованиях.



Рис. 22.32. Первый циклотрон и его создатель Э. Лоуренс. Построенный Эрнестом Лоуренсом (слева) прибор (в 1931 году), умещался на ладони и разгонял протоны всего до 0,08 МэВ. В 1934 году на устройство циклотрона был получен патент, а в 1939 году Лоуренсу была присуждена Нобелевская премия за его выдающееся открытие

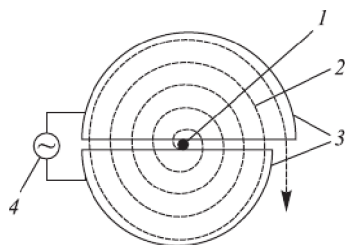


Рис. 22.33. Устройство циклотрона: 1 — место поступления частиц; 2 — траектория их движения; 3 — электроды; 4 — источник переменного напряжения. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка (Википедия)

Циклотрон. В 1929 году молодой профессор Калифорнийского университета Эрнест Орландо Лоуренс (1901–1958) понял, что можно осуществить резонансное ускорение частиц не обязательно на прямолинейной траектории. Он взял металлический полый цилиндр примерно тех же пропорций, что и банка из-под шпрот, разрезал его вдоль оси и раздвинул половинки (их сейчас называют дуантами). Эту разрезанную банку надо вложить между полюсами электромагнита, а в ее центре поместить источник не особенно быстрых заряженных частиц, подчиняющихся законам ньютоновской механики. В постоянном магнитном поле они станут закручиваться и двигаться по инерции по окружностям фиксированного радиуса (разумеется, в камере должен быть вакуум).

Такое устройство можно превратить в ускоритель. Для этого в зазоры между дуантами надо подать переменное электрическое поле, частота которого совпадает с частотой вращения частиц (последняя зависит от заряда, напряженности магнитного поля и массы частиц и не зависит от их скорости). Это была идея ускорителя, получившего впоследствии название «циклотрон». Схема циклотрона показана на рис. 22.33.

Частица ускоряется на каждом обороте электрическим полем в щели между дуантами. Для непрерывного ускорения частицы в циклотроне необходимо выполнять условие синхронизма (условие резонанса), периоды вращения частицы в магнитном поле и колебаний электрического поля должны быть равны. При выполнении этого условия частица будет двигаться по раскручивающейся спирали, получая при каждом прохождении через зазор дополнительную энергию. Иными словами, циклотрон является резонансным ускорителем. На последнем витке, когда энер-

гия частиц и радиус орбиты доведены до максимально допустимых значений, пучок частиц посредством отклоняющего электрического поля выводится из циклотрона.

В циклотронах заряженная частица с зарядом q и массой m ускоряется до скоростей, при которых релятивистский эффект увеличения массы частицы практически не проявляется (см. с. 478). Период обращения частицы и радиус траектории вычисляются соответственно по формулам $T = 2\pi m/qV$ и $R = mv/qV$. Как мы видим частота ускоряющего напряжения $f = 1/T$ не зависит от радиуса орбиты. Отсюда следует, что не надо менять частоту ускоряющего напряжения с увеличением радиуса орбиты. Но это условие нарушается при приближении скорости частицы к скорости света (масса частицы растет). Чтобы компенсировать этот эффект (т. е. для достижения высоких энергий), требуются сложные электронные устройства. Эти устройства учитывают эффект увеличения массы частицы и одновременно уменьшение частоты ускоряющего напряжения.

Циклотроны позволяют ускорять протоны до энергий примерно 20 МэВ. Дальнейшее их ускорение в циклотроне все же ограничивается релятивистским возрастанием массы со скоростью, что приводит к увеличению периода обращения (он пропорционален массе), и синхронизм нарушается. Открытие Лоуренса оказало сильнейшее влияние на все дальнейшее развитие ядерной физики.

23. *А может ли электрическое поле создавать ток? Фарадей открывает явление электромагнитной индукции. ЭДС индукции. Правило Ленца. Электрогенератор и электродвигатель. Вихревое электрическое поле.*

Электрический ток вызывает возникновение магнитного поля. Об этом мы узнали в предыдущей части. А может ли магнитное поле создавать электрический ток? На этот вопрос утвердительно ответил Майкл Фарадей (1791–1867), записавший в 1822 году в лабораторном журнале такую фразу: «Превратить магнетизм в электричество». В течение десяти лет Фарадей занимался исследованием связи между электрическими и магнитными явлениями. Эти исследования проводились в лаборатории, совсем не похожей на современную. Лаборатория Royal Institution, где работали Дэви, Фарадей и Тиндаль (1820–1893), открытая в 1803 году, как вспоминал Тиндаль, «плохо вентилировалась, плохо освещалась и была совершенно неподходящей для ежедневной многочасовой работы. Это, вероятно, наихудшая лаборатория во всем Лондоне». И эта лаборатория оставалась почти 70 лет в первоначальном состоянии. Фарадей в своих исследованиях обходился мотками проволоки, кусками железа, магнитными стрелками. Многолетние исследования завершились в 1831 году открытием явления электромагнитной индукции, лежащего в основе работы всех электрогенераторов постоянного и переменного тока.

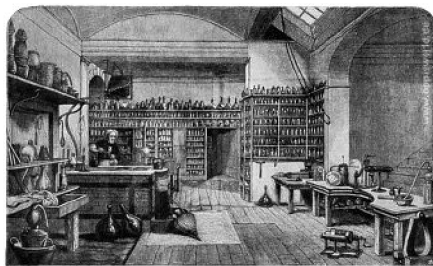


Рис. 23.1. Химическая лаборатория Королевского института во времена Фарадея



Рис. 23.2. Портрет Фарадея, написанный в 1842 году Томасом Филлипсом

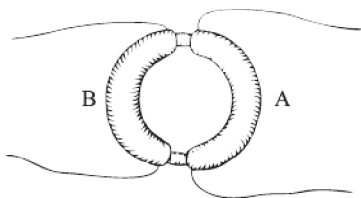


Рис. 23.3. Рисунок Фарадея для исследования индуктивных токов (Philosophical Transactions, 1832)

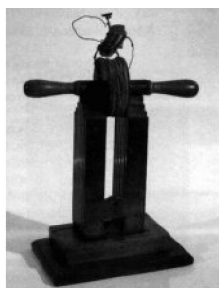


Рис. 23.4. Индуктор, хранящийся в Королевском институте, с помощью которого Фарадей открыл закон индукции в 1831 г. (coollib.com/b/315495/read)

Опыты Фарадея описаны во всех школьных учебниках физики. В первом опыте, с помощью которого и было открыто новое явление, Фарадей использовал деревянный цилиндр, на который были намотаны две изолированные друг от друга обмотки. Одна из них была соединена с гальванической батареей, другая — с гальванометром. Опыты с постоянным током не дали результата: когда был пропущен ток через первую обмотку, Фарадей обратил все свое внимание на гальванометр, ожидая заметить по его колебаниям появление тока и во второй обмотке. Стрелка оставалась неподвижной. Не помогло и увеличение тока — даже 120 гальванических элементов не заставили отклониться стрелку прибора. Фарадей был очень наблюдательным человеком — важнейшее качество истинного исследователя. Он заметил, что гальванометр, оставаясь совершенно спокойным во все время прохождения тока, приходит в колебание при самом замыкании цепи и при размыкании ее. Оказалось, что в тот момент, когда в первую проволоку пропускается ток, а также когда это пропускание прекращается, во второй проволоке также возбуждается ток, имеющий в первом случае противоположное направление с первым током и одинаковое с ним во втором случае и продолжающийся всего одно мгновение.

Эти вторичные мгновенные токи, вызываемые влиянием первичных, названы Фарадеем индуктивными, и это название сохранилось за ними доселе. Эти токи, однако, почти мгновенно исчезали, только появившись, и поэтому никакого практического значения не имели. Но Фарадей удлинил их жизнь; при помощи остроумного приспособления — коммутатора — удалось беспрестанно прерывать и снова проводить первичный ток, идущий от батареи по первой проволоке, благодаря чему во второй проволоке беспрерывно возбуждаются все новые и новые индуктивные токи, становящиеся, таким образом, постоянными. Таким образом, здесь впервые магнетизм был превращен в электричество. Был найден новый источник электрической энергии помимо ранее известных (трения и химических процессов), — индукция, и новый вид этой энергии — индукционное электричество.

Но еще за несколько лет до опытов Фарадея открытие электромагнитной индукции совершил Генри. Об опытах Фарадея он ничего не знал и открытие сделал исключительно благодаря своей интуиции. Но Генри не сообщил об этом опыте никому. «Мне следовало напечатать это раньше», — говорил он впоследствии сокрушенно. Но он не понял, не почувствовал глубины и важно-

сти нового открытия. Потому первооткрывателем этого явления называют Фарадея.

Возможны несколько способов получения индукционного тока:

- 1) перемещение магнита и катушки относительно друг друга;
- 2) перемещение одной катушки относительно другой;
- 3) изменение силы тока в одной из катушек;
- 4) замыкание и размыкание цепи;
- 5) перемещение сердечника.

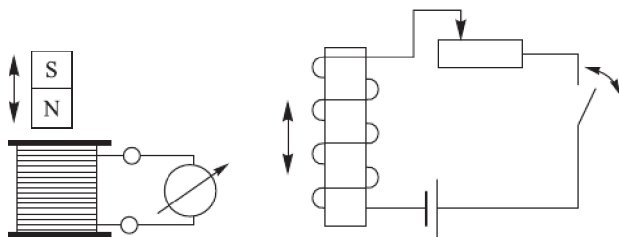


Рис. 23.5. Способы получения индукционных токов

ЭДС индукции. Возьмем проводник, концы которого замкнуты на гальванометр (для обнаружения малых электрических токов можно использовать микроамперметр), и быстро пересечем этим проводником поле магнита (рис. 23.6). При этом мы заметим, что стрелка гальванометра отклонится в тот момент, когда проводник пересечет магнитное поле. Следовательно, по проводнику в этот момент пройдет электрический ток.

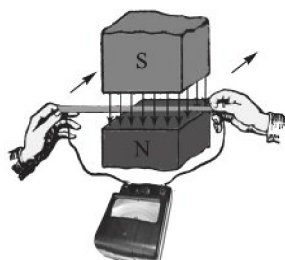


Рис. 23.6. ЭДС индукции при перемещении проводника в магнитном поле

Попробуем производить перемещение проводника в магнитном поле с различной скоростью. При этом мы заметим, что стрелка прибора будет отклоняться тем больше, чем быстрее наш проводник пересекает магнитное поле. При очень медленном перемещении проводника в нем совершенно не возникает тока или, говоря точнее, ток будет настолько мал, что наш гальванометр не в состоянии его обнаружить. Далее обратим внимание на то обстоятельство, что, вдвигая проводник в пространство между полюсами магнита, мы тем самым увеличиваем число магнитных силовых линий, охватываемых замкнутым контуром проводника, а при обратном перемещении проводника уменьшаем число этих линий, или, другими словами, в первом случае магнитный поток, охватываемый нашим замкнутым контуром, увеличивается, а во втором случае уменьшается. С этой точки зрения возникновение индукционного тока в замкнутом проводящем контуре мы можем объяснить как результат изменения величины магнитного потока внутри контура; большие или меньшие отклонения стрелки при разных скоростях движения проводника свидетельствуют о том, что возникающая в проводнике ЭДС называется индуктированной ЭДС, или ЭДС индукции, то есть наведение ЭДС в проводнике есть не что иное, как явление электромагнитной индукции.

Опыты Фарадея показали, что сила индукционного тока I_i в проводящем контуре пропорциональна скорости изменения числа линий магнитной индукции B , пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром. Более точно это утверждение можно сформулировать, используя понятие магнитного потока.

Магнитный поток наглядно истолковывается как число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S .

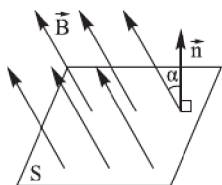


Рис. 23.7

Магнитный поток Φ однородного поля через плоскую поверхность — это скалярная физическая величина, численно равная произведению модуля индукции B магнитного поля, площади поверхности S и косинуса угла α между нормалью \mathbf{n} к поверхности и вектором индукции B , как показано на рис. 23.7:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha.$$

Магнитный поток характеризует распределение магнитного поля по поверхности, ограниченной контуром. Он измеряется в веберах: $[\Phi] = B\delta = \text{Тл} \cdot \text{м}^2$.

Если за малое время Δt магнитный поток меняется на $\Delta\Phi$, то скорость изменения магнитного потока равна $\Delta\Phi/\Delta t$.

Поэтому утверждение, которое вытекает непосредственно из опыта, можно сформулировать так: *сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:* $I_i \sim \Delta\Phi/\Delta t$.

Известно, что в цепи возникает электрический ток в том случае, когда на свободные заряды действуют сторонние силы. Работу этих сил при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура называют электродвижущей силой. Следовательно, при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в нем появляются сторонние силы, действие которых характеризуется ЭДС индукции. Обозначим ее как E_i .

Закон электромагнитной индукции формулируется именно для ЭДС, а не для силы тока. При такой формулировке закон выражает сущность явления, не зависящую от свойств проводников, в которых возникает индукционный ток.

Итак, ЭДС индукции в замкнутом контуре прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную этим контуром. Это утверждение записывают математически так: $E_i = -d\Phi/dt$. Если скорость изменения магнитного потока выражать в веберах в секунду, тогда значение ЭДС получается в вольтах. Приведенное утверждение называется законом электромагнитной индукции и является одним из фундаментальных законов электромагнетизма.

Если в контуре имеется N витков с плотной намоткой, то индуцированные в каждом витке ЭДС складываются и $E_i = -Nd\Phi/dt$.

Знак минус в формуле для ЭДС связан с ее направлением. Оно определяется так называемым правилом Ленца.

На рис. 23.8 изображен замкнутый контур. Будем считать положительным направление обхода контура против часовой стрелки. Нормаль к контуру \mathbf{n} образует правый винт с направлением обхода. Знак ЭДС, т. е. удельной работы, зави-

сит от направления сторонних сил по отношению к направлению обхода контура. Если эти направления совпадают, то $E_i > 0$ и, соответственно, $I_i > 0$. В противном случае ЭДС и сила тока отрицательны.

Пусть магнитная индукция B внешнего магнитного поля направлена вдоль нормали к контуру и возрастает со временем. Тогда $\Phi > 0$ и $\Delta\Phi/\Delta t > 0$. Согласно правилу Ленца индукционный ток создает магнитный поток $\Phi' < 0$. Линии индукции B' магнитного поля индукционного тока изображены на рис. 23.8 штрихом. Следовательно, индукционный ток I_i направлен по часовой стрелке (против положительного направления обхода) и ЭДС индукции отрицательна.

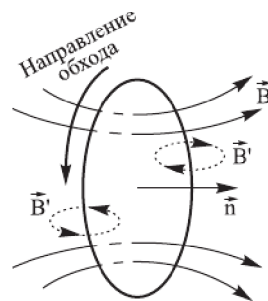


Рис. 23.8

Правило Ленца отражает тот экспериментальный факт, что E_i и $d\Phi/dt$ всегда имеют противоположные знаки (знак минус в формуле Фарадея). Правило Ленца имеет глубокий физический смысл — оно выражает закон сохранения энергии. Действительно, если бы потоки совпадали по направлению, то индукционный ток создавал бы магнитный поток, возрастающий во времени, и этот процесс продолжался бы до бесконечности. При этом выделялась бы мощность ($I^2 R$) даже после прекращения первоначального изменения. Возник бы вечный двигатель, невозможность которого очевидна.

Взаимодействие индукционного тока с магнитом. Если магнит приближать к катушке, то в ней появится индукционный ток такого направления, что магнит обязательно отталкивается. Для сближения магнита и катушки нужно совершить положительную работу. Катушка становится подобной магниту, обращенному одноименным полюсом к приближающемуся к ней магниту. Одноименные же полюсы отталкиваются.

Представим обратное. Вы подвинули магнит к катушке, и он сам собой устремился бы внутрь нее. При этом нарушился бы закон сохранения энергии. Ведь кинетическая энергия магнита увеличивалась бы и одновременно возникал бы ток, для чего необходима затрата энергии. Кинетическая энергия магнита и энергия тока возникали бы из ничего, без затрат энергии.

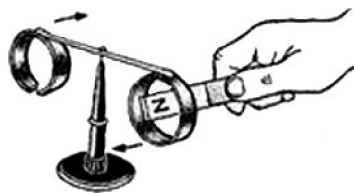


Рис. 23.9

При удалении магнита, наоборот, в соответствии с законом сохранения энергии требуется, чтобы появилась сила притяжения.

Справедливость этого вывода можно продемонстрировать с помощью прибора. На концах стержня, свободно вращающегося вокруг вертикальной оси, закреплены два проводящих алюминиевых кольца. Одно из них с разрезом. Если поднести магнит к кольцу без разреза, то в нем возникнет индукционный ток, и направлен он будет так, что кольцо оттолкнется от магнита и стержень повернется. Если удалять магнит от кольца, то оно, наоборот, притянется к магниту. С разрезанным кольцом магнит не взаимодействует, так как разрез препятствует возникновению в кольце индукционного тока. Отталкивает или притягивает ка-

тушка магнит, это зависит от направления индукционного тока в ней. Поэтому закон сохранения энергии позволяет сформулировать правило, определяющее направление индукционного тока.

Правило Ленца. При увеличении магнитного потока через витки катушки индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует нарастанию магнитного потока через витки катушки. Ведь линии индукции B'_1 этого поля направлены против линий индукции B поля, изменение которого порождает электрический ток. Если же магнитный поток через катушку ослабевает, то индукционный ток создает магнитное поле с индукцией B'_1 , увеличивающее магнитный поток через витки катушки. В этом состоит сущность общего правила определения направления индукционного тока, которое применимо во всех случаях: индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван (см. рис. 23.10).

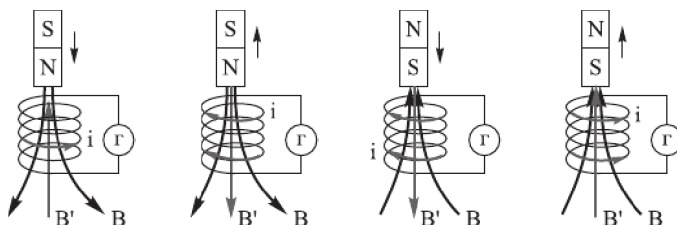


Рис. 23.10

Применять правило Ленца для нахождения направления индукционного тока I_i в контуре следует так:

- 1) установить направление линий магнитной индукции B внешнего магнитного поля;
- 2) выяснить, увеличивается ли поток магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром ($\Delta\Phi > 0$), или уменьшается ($\Delta\Phi < 0$);
- 3) установить направление линий магнитной индукции B_1 магнитного поля индукционного тока I_i ; эти линии должны быть согласно правилу Ленца направлены противоположно линиям B при $\Delta\Phi > 0$ и иметь одинаковое с ними направление при $\Delta\Phi < 0$;
- 4) зная направление линий магнитной индукции B_1 , найти направление индукционного тока I_i , пользуясь правилом буравчика.

ЭДС, наводимая в движущемся проводнике. Из формулы Фарадея следует, что возбуждаемая ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадь контура. Рассмотрим в качестве примера возникновение ЭДС индукции \mathbf{E} в прямоугольном контуре, помещенном в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости контура (прямоугольный симметричный контур удобен для анализа явления ЭДС). Рамка, подвижная сторона которой длиной l , перемещается со скоростью v перпендикулярно линиям индукции поля (рис. 23.11). При движении проводника в магнитном поле площадь

рамки, охватываемая магнитным полем, увеличивается, следовательно, возрастает магнитный поток сквозь рамку и возникает ЭДС индукции.

Пример. Проводящий стержень в магнитном поле. На рис. 23.11 проводящий стержень перемещается вправо по прямоугольному проводнику в магнитном поле \mathbf{B} , перпендикулярном плоскости, ограниченной проводником. По закону Фарадея, $E_i = d\Phi/dt$, где $\Phi = BS = B/x$ (x — перемещение стержня). Тогда $E_i = B/dx/dt$. Так как $dx/dt = v$, поэтому $E_i = Bv/l$. Полученное соотношение справедливо, если B , l и v взаимно перпендикулярны.

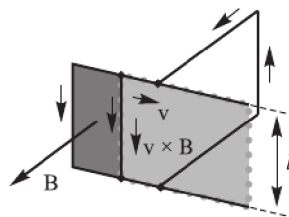


Рис. 23.11

Эту же формулу можно получить и из других соображений. При этом будут выявлены сущность электромагнитной индукции и причины ее происхождения. Предположим, что проводник на рис. 23.11 перемещается со скоростью v перпендикулярно индукции \mathbf{B} . Тогда на заряды проводника действует сила Лоренца \mathbf{F}_L , направление которой определяется правилом правого винта. Под действием этой силы свободные заряды проводника перемещаются и возникает разделение зарядов: положительный заряд накапливается на одном конце, отрицательный — на другом.

Разделение происходит до тех пор, пока электростатическая сила \mathbf{F}_s , направленная противоположно \mathbf{F}_L , не уравнивает последнюю: $\mathbf{F}_L = -\mathbf{F}_s$.

На концах проводника возникает разность потенциалов. Таким образом, движущийся в магнитном поле проводник является источником ЭДС. Работа A , связанная с перемещением зарядов при их разделении с одного конца стержня на другой, равна произведению силы на расстояние. Отсюда получаем $A = (qvB)(l)$. ЭДС равна работе сторонних сил по перемещению единичного заряда: $E_i = A/q = qvBl/q = Bv$, то есть выражению, полученному выше.

Направление индукционного тока, возникающего в прямолинейном проводнике при его движении в магнитном поле, определяется по правилу правой руки: если правую руку расположить вдоль проводника так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а отогнутый большой палец показывал направление движения проводника, то четыре вытянутых пальца укажут направление индукционного тока в проводнике (рис. 23.12).

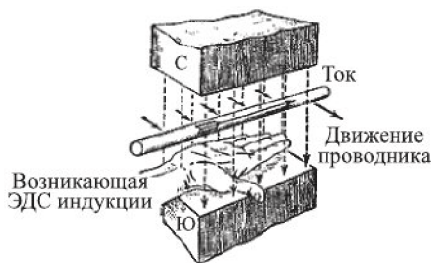


Рис. 23.12. Определение направления индукционного тока в проводнике, движущемся в магнитном поле

Так как в проводнике происходит движение зарядов, то, следовательно, в проводнике имеется электрическое поле. По определению, электрическое поле $E = F/q = vB$. Это выражение можно обобщить на случай, когда направления v и \mathbf{B} не перпендикулярны. В этом случае $E = F/q = v \times B$. Электрическое поле возникает и в том случае, когда ЭДС в контуре связана не с движением проводника, а с изменением магнитного потока. Таким образом, из приведенных рассуждений следует важный вывод: *изменение магнитного потока ведет к возникновению электрического поля*. Этот вывод

можно распространить не только на проводники — электрическое поле возникает в любой точке пространства, где происходит изменение магнитного потока (см. гл. 24). Сущность явления электромагнитной индукции в неподвижном проводнике состоит не столько в появлении индукционного тока, сколько в возникновении электрического поля, которое приводит в движение электрические заряды.

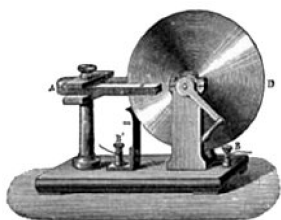


Рис. 23.13. Диск Фарадея (Википедия)

Электродвигатель и электрогенератор. Электрический генератор — это устройство, в котором неэлектрические виды энергии (механическая, химическая, тепловая) преобразуются в электрическую энергию. В основе работы электрогенератора лежит закон Фарадея. Он также построил первый электромагнитный генератор, названный диском Фарадея, используя медный диск, вращающийся между полюсами подковообразного магнита. Он вырабатывал небольшое постоянное напряжение и сильный ток.

Рассмотрим закон электромагнитной индукции для генератора. Как мы показали выше, если к проводнику, помещенному в магнитное поле, приложить движущую силу и он начнет перемещаться перпендикулярно силовым линиям, в нем будет индуцироваться (наводиться) ЭДС, направление которой определяется по правилу правой руки. Величина ЭДС определяется по формуле $\mathcal{E} = BvL$ (L — активная длина проводника, т. е. длина его части, находящейся в магнитном поле). Если концы проводника замкнуть (на активное сопротивление R), то под действием ЭДС по цепи потечет ток I . Этот ток, взаимодействуя с магнитным полем, создаст на проводнике электромагнитную силу $F_{\text{эм}}$, направление которой определяется по правилу левой руки. В генераторе электромагнитная сила является тормозящей. Величина электромагнитной силы определяется по формуле: $F_{\text{эм}} = BIL$.

При равномерном движении проводника движущая сила F равна по величине тормозящей силе $F_{\text{эм}}$, т. е. $F = F_{\text{эм}}$.

Умножим обе части последнего равенства на скорость V и подставим в него значение $F_{\text{эм}}$ из формулы, получим

$$\begin{aligned} F \cdot V &= F_{\text{эм}} \cdot V, \\ F \cdot V &= B \cdot I \cdot L \cdot V, \\ F \cdot V &= \mathcal{E} \cdot I. \end{aligned}$$

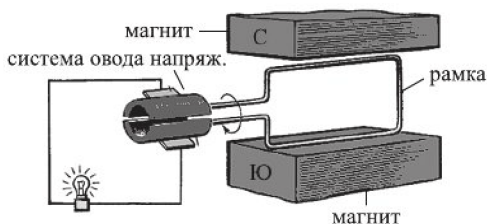


Рис. 23.14. Принципиальная схема электрогенератора

Левая часть равенства — $F \cdot V$ — механическая мощность, затраченная на перемещение проводника в магнитном поле. Правая часть — $\mathcal{E} \cdot I$ — это электрическая мощность, развиваемая током I в замкнутом контуре.

Знак равенства показывает, что в генераторе механическая мощность преобразуется в электрическую.

Составными частями электрического генератора являются магнитная система (в основном используются электромагниты) и система проводников (катушек). Первая создает магнитное поле, а вторая, вращаясь в нем, преобразует его в электрическое. Дополнительно в генераторе есть еще и система отвода напряжения (разрезной коллектор и щетки, соединение катушек определенным образом). Она, собственно, связывает генератор с потребителями электрического тока. Вращающаяся часть генератора (на упрощенной схеме это один виток) — ротор приводится во вращение механическим способом.

На роторе имеется несколько проволочных обмоток. Контакты (щетки) постоянно прижаты к контактным кольцам (токосъемникам) и служат для «отвода» электрической энергии. На выходе такого генератора — пульсирующий постоянный ток. Уменьшение пульсаций достигается за счет увеличения числа коллекторов. В промышленном генераторе имеется сложная система электромагнитов и намного сложнее катушка из проводников, обычно медных (рис. 23.15).

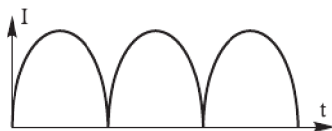
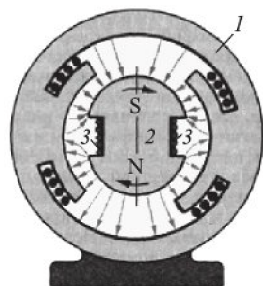


Рис. 23.15. Пульсирующий ток на выходе генератора

Электродвигатели различаются как по типу привода, так и по виду выходного напряжения. По типу привода, который приводит его в движение, — это:

- турбогенератор — приводится в движение при помощи паровой турбины или газотурбинного двигателя; в основном используются на больших (промышленных) электростанциях;
- гидрогенератор — приводится в движение при помощи гидравлической турбины; применяется также на больших электростанциях, работающих посредством движения речной или морской воды;
- ветрогенератор — приводится в движение при помощи энергии ветра; используется как в маленьких (частных) ветряных электростанциях, так и в больших промышленных;
- дизель-генератор и бензогенератор — приводятся в движение соответственно дизельным и бензиновым двигателем.

Рис. 23.16. Поперечный разрез промышленного генератора. Неподвижная часть генератора, статор, представляет собой станину (1), набранную из листов магнитомягкой электротехнической стали. На статоре имеется обмотка из толстого медного провода. Вращающаяся часть генератора — ротор (2), представляет собой электромагнит, обмотка (3) которого питается от специального генератора постоянного тока — возбуждателя. При вращении ротора магнитное поле, пронизывающее обмотку статора, периодически меняется, за счет чего в ней индуцируется переменная ЭДС индукции



Рассмотрим закон электромагнитной индукции для двигателя. Если к проводнику, помещенному в магнитное поле, подвести напряжение от источника постоянного тока, то по нему потечет электрический ток и в результате взаимодействия тока с магнитным полем на проводнике появится электромагнитная

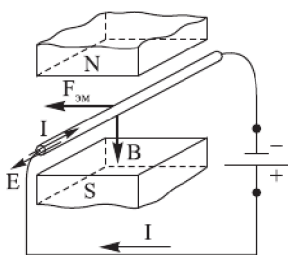


Рис. 23.17. Действие силы на проводник в магнитном поле, к которому приложено внешнее напряжение

сила $F_{эм}$. Под действием этой силы проводник начнет перемещаться в магнитном поле и в нем будет индуцироваться ЭДС, направление которой будет противоположно приложенному к проводнику напряжению: $U = E + I \cdot R$.

Из уравнения напряжений видно, что часть напряжения приложенного к проводнику уравновешивается ЭДС E , а другая часть представляет собой падение напряжения на активном сопротивлении проводника. Умножим обе части равенства на ток I , подставим значение ЭДС, получим после некоторых преобразований уравнение мощностей двигателя:

$$U \cdot I = E \cdot I + I^2 \cdot R,$$

$$U \cdot I = B \cdot V \cdot I + I^2 \cdot R,$$

$$U \cdot I = F_{эм} \cdot V + I^2 \cdot R.$$

Следовательно, электрическая мощность ($U \cdot I$), поступающая в проводник, преобразуется в механическую ($F_{эм} \cdot V$), затрачиваемую на перемещение проводника, и частично расходуется на нагрев проводника ($I^2 R$).

При изменении направления тока в проводниках они поворачиваются в магнитном поле на 180° . Чтобы повернуть проводники еще раз на 180° , нужно изменить направление тока в них в тот момент, когда они прошли уже положение равновесия. Следовательно, если бы удалось придумать приспособление, позволяющее в необходимый момент менять направление тока в проводниках (катушке), проводники стали бы вращаться в магнитном поле до тех пор, пока в них проходил бы ток. Для автоматического изменения направления тока применяют коллектор, который состоит из двух полуколец, укрепленных на той же оси, на которой находятся проводники. Ток к полукольцам подводится при помощи двух пластинок, называемых щетками, которые касаются полуколец. При вращении проводников вместе с ними вращаются и укрепленные на оси полукольца. Как мы видим, устройство электродвигателя практически аналогично устройству электрогенератора. Поэтому одна и та же электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя (это свойство называется обратимостью электрических машин).

Вихревое электрическое поле. Электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, имеет совсем другую структуру, чем электростатическое. Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами, и его линии напряженности не могут на них начинаться и кончаться. Они вообще нигде не начинаются и не кончаются, а представляют собой замкнутые линии, подобные линиям индукции магнитного поля. Это так называемое вихревое электрическое поле.

Вихревое поле действует на заряд q точно так же, как и электростатическое. Сила, действующая на заряд, по-прежнему равна $F = qE$, где E — напряженность вихревого поля. Так, если магнитный поток создается однородным магнитным полем, сконцентрированным в длинной узкой цилиндрической трубке радиусом r_0 (рис. 23.18), то из соображений симметрии очевидно, что линии напряжен-

ности электрического поля лежат в плоскостях, перпендикулярных линиям \vec{B} , и представляют собой окружности. В соответствии с правилом Ленца при возрастании магнитной индукции ($\Delta B/\Delta t > 0$) линии напряженности \vec{E} образуют левый винт с направлением магнитной индукции \vec{B} .

В отличие от статического или стационарного электрического поля работа вихревого поля на замкнутом пути не равна нулю. Ведь при перемещении заряда вдоль замкнутой линии напряженности электрического поля работа на всех участках пути имеет один и тот же знак, так как сила и перемещение совпадают по направлению. Вихревое электрическое поле, так же как и магнитное поле, не потенциальное.

Работа вихревого электрического поля по перемещению единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике.

Вихревые токи возникают и когда сплошная масса металла вращается в магнитном поле (рис. 23.19).

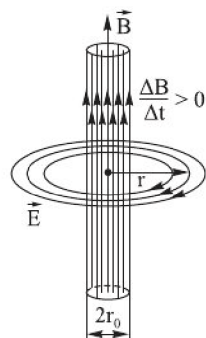


Рис. 23.18

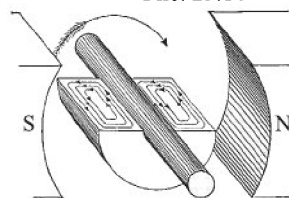


Рис. 23.19

Токи Фуко. Впервые вихревые токи были обнаружены французским ученым Доменико Араго в 1824 году в медном диске, расположенном на оси под вращающейся магнитной стрелкой. За счет вихревых токов диск приходил во вращение. Это явление, названное явлением Араго, было объяснено несколько лет спустя М. Фарадеем с позиций открытого им закона электромагнитной индукции: вращаемое магнитное поле наводит в медном диске вихревые токи, которые взаимодействуют с магнитной стрелкой. Вихревые токи были подробно исследованы французским физиком Фуко и названы его именем. Он открыл явление нагревания металлических тел, вращаемых в магнитном поле, вихревыми токами. Токи Фуко возникают под воздействием переменного электромагнитного поля и по физической природе ничем не отличаются от индукционных токов, возникающих в линейных проводниках. Они вихревые, то есть замкнуты в кольце. Электрическое сопротивление массивного медного проводника мало, поэтому токи Фуко достигают очень большой силы. Токи Фуко, как и индукционные токи в линейных проводниках, подчиняются правилу Ленца: их магнитное поле направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующего вихревые токи. Например, если между полюсами невключенного электромагнита массивный медный маятник совершает практически незатухающие колебания, то при включении тока он испытывает сильное торможение и очень быстро останавливается (рис. 23.20). Это объясняется тем, что возникшие токи Фуко имеют такое направление, что действующие на них со стороны магнитного поля силы тормозят движение маятника. Этот факт используется для успокоения подвижных частей различных приборов. Если в описанном маятнике сделать радиальные вырезы, то вихревые токи ослабляются и торможение почти отсутствует.

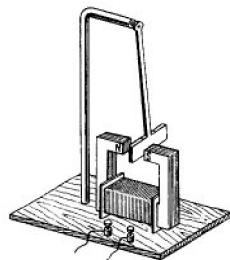


Рис. 23.20

Вихревые токи помимо торможения вызывают нагревания проводников. Поэтому для уменьшения потерь на нагревание якоря генераторов и сердечники трансформаторов делают не сплошными, а изготавливают из тонких пластин, отделенных одна от другой слоями изолятора, и устанавливают их так, чтобы вихревые токи были направлены поперек пластин.

Джоулева теплота, выделяемая токами Фуко, используется в индукционных металлургических печах. Индукционная печь представляет собой тигель, помещаемый внутри катушки, в которой пропускается ток высокой частоты. В металле возникают интенсивные вихревые токи, способные разогреть его до плавления. Такой способ позволяет плавить металлы в вакууме, в результате чего получают сверхчистые материалы.

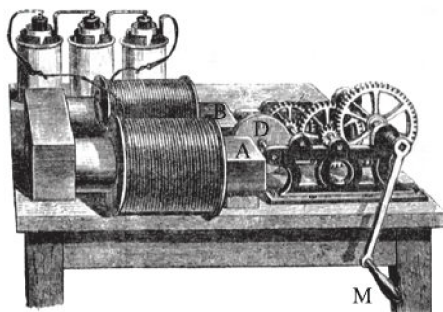


Рис. 23.21. Опыт Фуко с индуктивными токами в металлических массах (A. Garnot, *Traite elementaire de physique experimentale et appliquee*, 1857): диск D, приведенный в быстрое вращательное движение, почти мгновенно останавливается, как только включаются электромагниты; вращение диска при включенных электромагнитах вызывает сильное его нагревание

Мы не закончили рассмотрение явлений, связанных с магнитным полем в электрической цепи. Продолжая наше путешествие, мы обнаружим еще много интересных явлений.

24. *Важный элемент электрической цепи — индуктивность. Индуктивность цилиндрической катушки. Магнитная проницаемость. Ток в цепи при наличии индуктивности. Энергия магнитного поля. Трансформатор. Электрические цепи, содержащие активные и реактивные элементы. RL-цепочка. Формула Томсона. RLC-контур. «Война токов».*

Давайте вспомним, о чем шел рассказ в предыдущей части. Экспериментально было обнаружено, что достаточно перемещать проводник в магнитном поле постоянного магнита или, наоборот, перемещать (практически всегда вращением) магнит около проводника, как в последнем возбуждается так называемая ЭДС индукции. Именно индукция используется для получения ЭДС в различных генераторах. Во всех рассмотренных ранее случаях в возникновении ЭДС индукции принимали участие проводники и магнитное поле.

Можно получить ЭДС индукции в случае двух проводников. В одном из них протекает изменяющийся ток, который создает вокруг него переменное магнитное поле. Если рядом находится еще один проводник, то на его концах возникает переменная ЭДС. Такой способ получения ЭДС называется взаимной индукцией. Именно по принципу взаимной индукции работают все трансформаторы, только проводники у них выполнены в виде катушек. Подробнее трансформаторы мы рассмотрим в дальнейшем.

Индуктивность. Если ток в первом проводнике прекратится (например, произойдет обрыв цепи) или станет пусть даже очень сильным, но постоянным (нет никаких изменений), то на концах второго проводника никакой ЭДС получить не удастся. Иное дело, если ток будет изменяться. Причем чем сильнее скорость изменения тока в одном проводнике, тем больше будет наведенная ЭДС во втором.

Итак, если в некоторой цепи (рис. 24.1) изменяется электрический ток, то этот ток создает изменяющееся магнитное поле \mathbf{B} , которое приводит к появлению вихревого электрического поля \mathbf{E} . Причем это поле появляется во всех точках пространства, где изменяется магнитное поле, в том числе и в проводниках, образующих электрическую цепь.

При прохождении по проводнику постоянного тока количество силовых линий не меняется; при прохождении по проводу переменного тока или при изменении силы постоянного тока, число силовых линий магнитного поля возрастает при увеличении силы тока и уменьшается при ослаблении его. Мы можем себе представить, что при увеличении силы тока силовые линии как бы «разворачиваются» из провода, выходят из него все в большем количестве, а при ослаблении тока как бы сжимаются, сворачиваются в провод. При этом известно, что в тех случаях, когда какой-либо проводник пересекается силовыми линиями, в этом проводнике возникает электрический ток. Но возникновение в проводнике тока имеет место не только тогда, когда проводник пересекается силовыми линиями «чужого поля» (как это происходило в примерах, рассмотренных выше), т. е. поля, созданного соседним проводником, а также и тогда, когда провод пересекается собственными силовыми линиями, т. е. теми линиями, которые созданы в нем тем током, который протекает по нему от какого-либо источника. Появление в проводе дополнительного напряжения, вызванного своими же собственными силовыми линиями, носит название самоиндукции. Индуцированный ток имеет направление, обратное начальному току в том случае, когда сила начального тока увеличивается и совпадает с ним по направлению, когда сила начального тока уменьшается. Следовательно, можно сказать, что индуцированный ток как бы стремится противодействовать всем изменениям начального тока, так как если начальный ток усиливается, то индуцированный направляется в противоположную сторону и как бы ослабляет его, когда же первичный ток ослабляется, то индуцированный ток течет в направлении начального, складывается с ним. Это явление привело к открытию Ленцем закона, который мы рассмотрели выше.

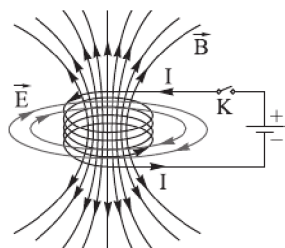


Рис. 24.1. Переменное магнитное поле создает вихревое электрическое поле

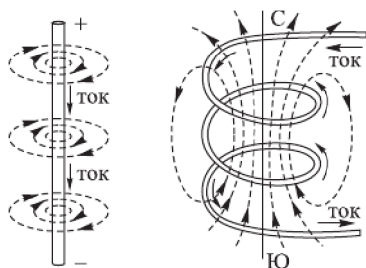


Рис. 24.2. Силовые линии в прямом проводнике и в соленоиде

Явление самоиндукции наблюдается во всех проводниках любых форм, но в прямолинейных проводниках оно сравнительно слабо; в прямолинейных проводниках, свитых в катушку, явление самоиндукции заметно чрезвычайно резко. Это объясняется тем, что силовые линии, возникающие вокруг каждого витка катушки, пересекают не только свой виток, но и соседние витки, индуцируя в них также напряжение; вследствие этого токи индуктивности в проводниках, свитых в катушку, получаются значительно более сильными (рис. 24.2).

Так как магнитный поток всегда пропорционален силе тока в цепи I , поэтому он является потоком поля, созданного этим током. Отсюда можно принять, что $\Phi = LI$, где коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью. Этот термин был предложен Оливером Хевисайдом в феврале 1886 года. Используя это выражение и закон электромагнитной индукции, можно формулу для ЭДС индукции записать следующим образом: $E_i = -L di/dt$.

Величина индуктивности полностью определяется геометрическими размерами и формой цепи и магнитными свойствами среды, в которой расположена цепь. Часто индуктивность относят не ко всей цепи, а к некоторым ее элементам. Следует подчеркнуть, что любая электрическая цепь, любой ее элемент обладают в той или иной степени индуктивностью. Однако во многих случаях явление самоиндукции оказывает настолько слабое влияние на ток в цепи, что часто им пренебрегают. Понятно, что это явление полностью отсутствует в цепях постоянного тока, когда токи и созданные ими магнитные поля не изменяются. В таких цепях явления самоиндукции могут играть заметную роль только в моменты включения и выключения тока, когда поля могут изменяться достаточно резко и приводить к появлению сильных индукционных токов.

В качестве единицы индуктивности взят генри (название в честь американского физика Джозефа Генри (1797–1878)).

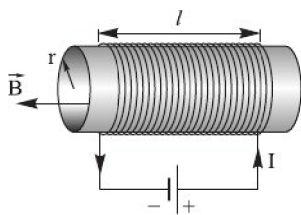


Рис. 24.3

Индуктивностью в один генри обладает такая катушка, изменение силы тока в которой на один ампер в секунду создает электродвижущую силу в один вольт: $1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А}$. Практически генри является величиной довольно большой. При определении индуктивности катушек обычно пользуются единицами в тысячу или в миллион раз меньшими, которые называются соответственно миллигенри и микрогенри.

Рассчитаем индуктивность длинной цилиндрической катушки (соленоида) длиной l , содержащей N проволочных намотанных на цилиндрический каркас витков радиуса r (рис. 24.3).

Если по обмотке соленоида протекает электрический ток силой I , то внутри его создается магнитное поле индуктивности B , направленное вдоль оси, причем модуль этого вектора равен $B = \mu_0 n I$, где $n = N/l$ — плотность намотки, т. е. число витков на единицу длины.

Так как магнитное поле внутри соленоида однородное (если пренебречь краевыми эффектами), то магнитный поток через один виток равен $\Phi_1 = BS$ ($S = \pi r^2$ — площадь витка), а суммарный поток через все витки, т. е. поток через соленоид, $\Phi = N\Phi_1$. ЭДС в катушке равна сумме ЭДС во всех витках.

Используя формулу для индукции поля, запишем выражение для магнитного потока через обмотку:

$$\Phi = NBS = N\mu_0 nIS = \mu_0 n^2 lSI = \mu_0 n^2 VI.$$

Здесь $V = lS$ — объем соленоида.

Коэффициент пропорциональности, т. е. индуктивность соленоида, равен

$$L = \mu_0 n^2 V.$$

Используя формулу для индуктивности соленоида, выразим размерность абсолютной магнитной постоянной: $[\mu_0] = [L]/[n^2][V] = \text{Гн/м}^{-2} \cdot \text{м}^3 = \text{Гн/м}$. Именно эта размерность приводится в различных справочниках. Магнитная постоянная (ср.: электрическая проницаемость) равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Индуктивность катушки можно значительно увеличить, вставив в нее сердечник, изготовленный из материала с большой магнитной проницаемостью μ . Такой эффект заметил еще Э. Ленц: «Искра при открытии цепи будет сильнее, когда длинную соединительную проволоку наматывают на цилиндр в виде спирали, а еще сильнее, когда цилиндр будет железный».

Магнитная проницаемость (μ) — физическая величина, характеризующая магнитные свойства вещества.

Относительная магнитная проницаемость показывает, во сколько раз в данной среде сила взаимодействия между проводниками с током изменяется по сравнению с вакуумом. Магнитная проницаемость воздуха и большинства веществ, за исключением ферромагнитных материалов, близка к единице.

Диамагнитные вещества внутри катушки ослабляют магнитное поле соленоида. Элементарные токи в них направлены противоположно току в соленоиде. Зато ферромагнетики значительно увеличивают индуктивность.

Таблица 21. Относительная магнитная проницаемость веществ

Вещество	μ	Вещество	μ
пара- и диамагнетики		ферромагнетики	
Алюминий	1,000023	Железо мягкое	8000
Воздух	1,00000038	Кобальт	175
Вольфрам	1,000176	Никель	1100
Кислород	1,0000019	Пермаллой-68	250 000
Кислород жидкий	1,003400	Чугун	600–800
Висмут	0,999824		
Вода	0,999991		
Водород	0,99999937		
Медь	0,999990		
Стекло	0,999987		

При наличии сердечника индуктивность катушки вычисляется по формуле

$$L = \mu \mu_0 n^2 V.$$

Скорость изменения напряжения и тока в цепи зависят от значения индуктивности. Чем больше индуктивность, тем меньше скорость изменения тока, а следовательно, и сама сила тока. Таким образом, индуктивность в цепи переменного тока ведет себя подобно электрическому сопротивлению. Это свойство индуктивности характеризуют индуктивным (реактивным) сопротивлением, или импедансом.

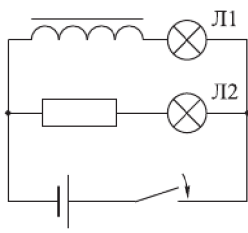


Рис. 24.4

Простой эксперимент подтверждает сказанное выше. Рассмотрим цепь, показанную на рис. 24.4. В цепи имеются две лампочки (Л1 и Л2), резистор и катушка индуктивности (условное изображение в цепи очевидно).

При замыкании в электрической цепи нарастает ток, что вызывает в катушке увеличение магнитного потока, возникает вихревое электрическое поле, направленное против тока, т. е. в катушке возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая нарастанию тока в цепи (вихревое поле тормозит электроны). В результате лампа Л1 загорается позже, чем Л2. На рис. 24.5 приведена временная характеристика тока в цепи, в которой имеется индуктивность.

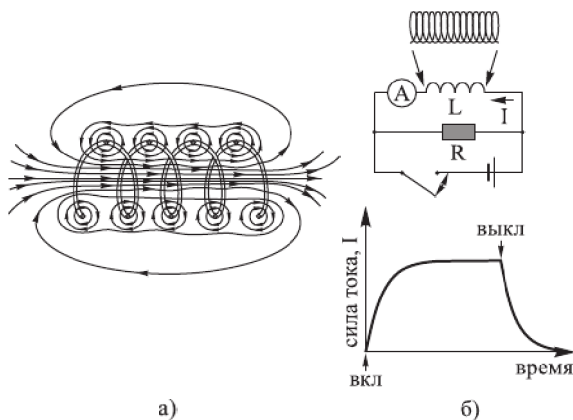


Рис. 24.5. (а) линии магнитной индукции катушки с током; (б) график изменения тока

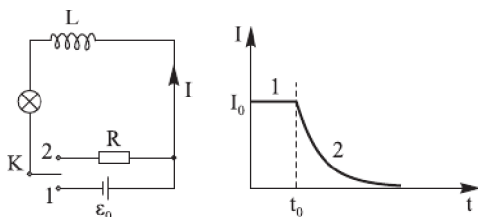


Рис. 24.6

Энергия магнитного поля.

Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии. Выполним эксперимент с электрической цепью, показанной на рис. 24.6.

Сначала замкнем соленоид L на источник ЭДС E_0 , в нем будет протекать ток I_0 . Затем в момент времени t_0 переключим ключ в положение 2 — замкнем соленоид на сопротивление R . В цепи будет течь убывающий ток I . Ток в цепи рис. 24.6 возникает под действием ЭДС самоиндукции. Для создания тока необходимо затратить энергию, т. е. необходимо совершить работу, так как при замыкании цепи, когда ток начинает нарастать, в проводнике появляется вихревое электрическое поле, действующее против того электрического поля, которое создается в проводнике благодаря источнику тока. Для того чтобы сила тока стала равной I , источник тока должен совершить работу против сил вихревого поля. Эта работа идет на увеличение энергии магнитного поля тока. Итак, при протекании в цепи тока I совершается работа $dA = E_l Idt$, которую можно также представить в виде $-(Ldl/dt)Idt = -LIdl$. Полную работу найдем, интегрируя написанное выражение в пределах от I до 0: $A = LI^2/2$. При размыкании цепи ток исчезает и вихревое поле совершает положительную работу. Запасенная током энергия выделяется. Эта работа пойдет на нагревание проводников.

Но откуда взялась эта энергия? Поскольку других изменений, кроме исчезновения магнитного поля в окружающем пространстве, не произошло, остается заключить, что энергия была локализована в магнитном поле. Значит, проводник с индуктивностью L , по которой течет ток I , обладает энергией $W = LI^2/2$.

Сказанное можно проиллюстрировать следующим образом. При включении лампы в электрическую цепь тока постоянного значения параллельно катушке с большим значением индуктивности при размыкании цепи регистрируется кратковременная вспышка. Электрический ток в цепи появляется под воздействием электродвижущей силы самоиндукции, а источником тока, возникающего при этом в цепи, становится магнитное поле катушки.

Энергию магнитного поля можно рассматривать как функцию величин, которые характеризуют это поле в окружающем пространстве. Для этого рассмотрим частный случай — однородное магнитное поле внутри длинного соленоида. Подставив в формулу для энергии магнитного поля выражение для индуктивности соленоида, найдем $W = \mu_0 n^2 V I^2 / 2$. Учитывая, что индукция магнитного поля внутри соленоида $B = \mu_0 n I$, магнитное поле внутри соленоида однородно и сосредоточено внутри него и имеет в нем однородное распределение с постоянной объемной плотностью $\omega = W/V = B^2 / 2\mu_0$.

Если по аналогии с электрическим полем ввести напряженность магнитного поля H , тогда $\omega = \mu_0 H^2 / 2 = BH/2$. Эта формула для объемной плотности энергии магнитного поля имеет вид, аналогичный выражению для объемной плотности энергии электростатического поля, с тем отличием, что электрические величины заменены в нем магнитными. Данная формула выводилась для однородного поля, но она верна и для неоднородных полей. Она справедлива только для сред, для которых имеет место линейная зависимость B от H .

Трансформатор. Явление взаимной индукции наблюдается между близко расположенными катушками. Сущность взаимной индукции заключается в переносе электрической энергии из одной цепи в другую посредством общего магнитного поля: в одном из контуров электрическая энергия преобразуется в энергию магнитного поля, в другом контуре происходит обратный переход энергии магнитного поля в электрическую энергию. Из сказанного следует, что

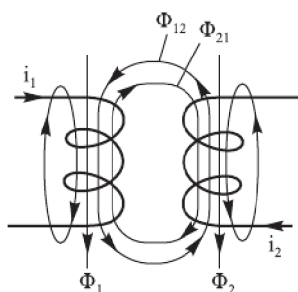


Рис. 24.7. Взаимная индукция двух катушек

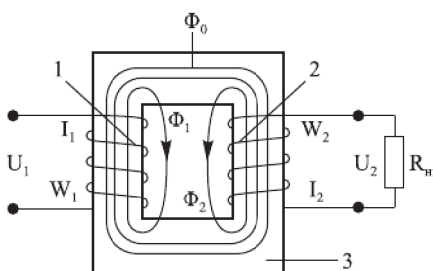


Рис. 24.8. Схема простейшего электрического трансформатора

магнитное поле является переносчиком электрической энергии из одной цепи в другую.

Пример практического использования описываемого явления — трансформатор. Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, собранного из пластин, на который надеты две (иногда и более) катушки с проволоочными обмотками. Одна из обмоток, называемая первичной, подключается к источнику переменного напряжения. Другая обмотка, к которой присоединяют нагрузку, т. е. приборы и устройства, потребляющие электроэнергию, называется вторичной. На рис. 24.8 показана принципиальная схема трансформатора.

На этом рисунке 1 и 2 — первичная и вторичная обмотки соответственно с числом витков W_1 и W_2 ; 3 — сердечник; Φ_0 — основной магнитный поток; Φ_1 и Φ_2 — потоки рассеяния; I_1 и I_2 — токи в первичной и вторичной обмотках; U_1 — напряжение на первичной обмотке; U_2 — напряжение на вторичной обмотке; R_n — сопротивление нагрузки.

Из закона Фарадея можно получить следующее равенство, называемое уравнением трансформатора: $W_1/W_2 = U_1/U_2$.

Это уравнение показывает, как напряжение на вторичной обмотке связано с напряжением на первичной обмотке. Если $W_2 > W_1$, трансформатор называется повышающим: напряжение на вторичной обмотке выше, чем на первичной. Если $W_2 < W_1$, то трансформатор — понижающий.

Из закона сохранения энергии следует, что выходная мощность не может превышать его входную мощность. В трансформаторах хорошей конструкции КПД может достигать 99 %. Трансформатор может работать только на переменном токе. Постоянный ток в первичной обмотке не будет создавать переменный магнитный поток во вторичной обмотке.

Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в 1831 году в работах Фарадея и Генри. Однако ни тот ни другой не отмечали в своем приборе такого свойства трансформатора, как изменение напряжений и токов, то есть трансформирование переменного тока. В 1848 году французский механик Г. Румкорф изобрел индукционную катушку. Она явилась прообразом трансформатора. 30 ноября 1876 года — дата получения патента Павлом Николаевичем Яблочковым (1847–1894). А два года спустя Яблочков впервые использовал трансформатор для питания изобретенных им электрических свечей — нового в то время источника света. Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в 1884 году братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсонами.

С изобретением трансформатора возник технический интерес к переменному току, разговор о котором — в следующей части.

Цепи электрического тока, содержащие активные и реактивные элементы. В электрической цепи, как правило, помимо ЭДС присутствуют три основных элемента: сопротивление R , емкость C и индуктивность L . Рассмотрим вначале цепочки из элементов RL и LC .

1. RL -цепочка.

Эта цепочка, как следует из названия, состоит из индуктивности L и сопротивления. Любая реальная катушка обладает электрическим сопротивлением. Поэтому эквивалентную схему катушки индуктивности можно представить в виде последовательно соединенных индуктивности L и резистора. Причем, этот резистор R может включать и сопротивление отдельного резистора в цепи (рис. 24.9).

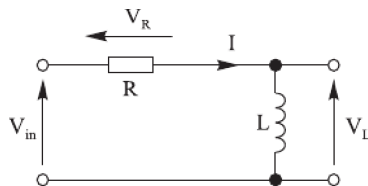


Рис. 24.9. RL -цепочка

Показанная на рис. 24.9 цепь представляет собой сочетание активного (резистивного) сопротивления и индуктивного реактивного сопротивления. Так что в цепи имеется не чистое реактивное сопротивление и не чистое активное сопротивление, а сочетание двух данных факторов, известное как полное (комплексное) сопротивление, или импеданс.

Рассмотрим процессы, происходящие в такой цепи при включении батареи (тока). При появлении тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая увеличению тока. По мере возрастания силы тока падение напряжения на резисторе увеличивается, а на индуктивности уменьшается, и ток в цепи постепенно нарастает. Этот ток приближается к своему максимальному (стационарному) значению $I = V/R$, где V — напряжение батареи. Подтвердим эти качественные рассуждения математическим расчетом.

Применим к цепи, изображенной на рис. 24.9, правила Кирхгофа. Источниками ЭДС в цепи являются батарея (V) и ЭДС самоиндукции $E_i = -LdI/dt$. Здесь I — мгновенное (т. е. в данный момент времени) значение тока в цепи. Сумма этих ЭДС равна падению напряжения на резисторе R :

$$V - LdI/dt = IR.$$

Перепишем это равенство, чтобы получить простейший вид линейного дифференциального уравнения:

$$LdI/dt + RI = V.$$

Это уравнение точно такое же, которое мы рассматривали в случае RC -цепочки в части 23. Если в начальный момент ток равен нулю, решение

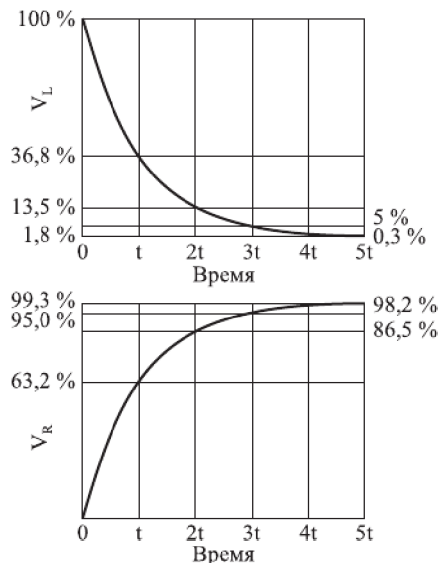


Рис. 24.10. Верхний график — зависимость падения напряжения на катушке L от времени; нижний график — зависимость нарастания напряжения на резисторе R от времени

ния имеет вид $I = V/R(1 - e^{-t/\tau})$, где через τ обозначено отношение L/R . τ — постоянная времени RL -цепочки. При $t = \tau$ сила тока в цепи достигает 63 % своего максимального значения.

Если батарею выключить из цепи (т. е. $V = 0$), то в этом случае получим уравнение $L di/dt + RI = 0$. Его решение имеет вид $I = I_0 e^{-t/\tau}$. Здесь I_0 — значение тока в начальный момент, когда $t = 0$. Таким образом, ток спадает до нуля экспоненциально.

Мы видим, что изменение тока (напряжения) в цепи происходят не мгновенно. Поэтому при включении или выключении, например, электромагнита имеет место некоторое запаздывание.

2. LC-контур и электромагнитные колебания.

Как только выяснилось, что разряд лейденской банки, а затем и индукционной катушки носит колебательный характер, начались интенсивные исследования колебательного контура. Известные физики занялись этой проблемой, и среди них — Томсон (лорд Кельвин). Начнем рассмотрение проблемы электромагнитных колебаний с простого LC-контура. При этом будем сравнивать процессы в таком контуре с его механическим аналогом.

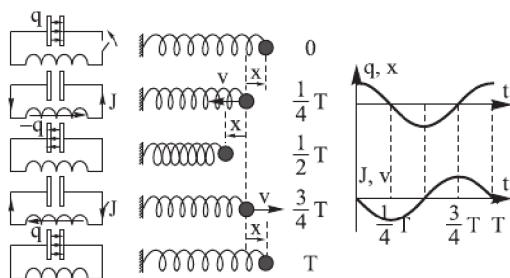


Рис. 24.11. Процессы в LC-цепочке

Пусть вначале конденсатор заряжен так, что на одной из его обкладок имеется заряд $+q$, а на другой — $-q$ (рис. 24.11). На рисунке показана картина движения груза на пружине (осциллятора), рассмотренная ранее (с. 186). Эта внешняя аналогия полезна, так как в конечном итоге мы получим уравнение, аналогичное уравнению гармонических колебаний.

Далее, пусть в момент $t = 0$ конденсатор начинает разряжаться (растянутая пружина, обладавшая потенциальной энергией сжимается). По мере разрядки конденсатора ток I в катушке индуктивности нарастает. При этом в каждый момент времени разность потенциалов на обкладках конденсатора $V = q/C$ (q — заряд конденсатора емкости C в данный момент) равна разности потенциалов на катушке, т. е. ЭДС самоиндукции $-L di/dt$. Когда конденсатор полностью разрядится ($q = 0$), сила тока в катушке достигнет максимального значения и перестанет изменяться.

Затем сила тока начинает уменьшаться, а заряд будет накапливаться на противоположных пластинах конденсатора. Когда сила тока достигнет нуля, заряд конденсатора достигнет максимального значения (пружина максимально сжата). При этом обкладка, заряженная ранее положительно, теперь будет нести заряд противоположного знака (отрицательный). Затем конденсатор начнет разряжаться, а ток потечет в обратном направлении (пружина движется вправо). Процесс повторится.

Опишем сказанное математически. В любой момент времени разность потенциалов на обкладках конденсатора равна ЭДС самоиндукции: $q/C = -L di/dt$, где q — заряд на одной из пластин конденсатора в данный момент, I — сила тока

в катушке в тот же момент. Сила тока обусловлена только перетеканием заряда с одной обкладки конденсатора на другую, т. е. $I = dq/dt$. Принимая это во внимание, запишем приведенное выше уравнение в виде

$$d^2q/dt^2 + 1/(LC)q = 0.$$

По форме это уравнение совпадает с рассмотренным ранее уравнением простого гармонического осциллятора:

$$d^2x/dt^2 + k/mx = 0.$$

Если отвлечься от названия переменных, эти два уравнения идентичны. Поэтому решением нашего уравнения для заряда также будет синусоидальная функция $q = q_0 \cos(\omega t)$. Если подставить это решение в уравнение, то можно получить, что $\omega^2 - 1/LC = 0$. Отсюда получаем $\omega = 2\pi f = \sqrt{1/LC}$. Полученная формула для контура рис. 24.11 носит название формулы Томсона (Кельвина), который вывел ее в 1853 году. Она часто записывается для периода колебаний T :

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Рассмотрим теперь колебания в контуре с энергетической точки зрения. Вначале энергия, запасенная в конденсаторе, равна $W_c = q_0^2/2C$, а в произвольный момент времени t эта энергия $W_c = q^2/2C = q_0^2/2C \sin^2(\omega t)$. Как видно из рис. 24.11, вся энергия сосредоточена в конденсаторе в моменты $t = 0$, $t = T$ и далее $t = 2T \dots$ В моменты $t = T/2$, $t = 3T/2$, ... вся энергия накапливается магнитным полем катушки W_L . Полная энергия $W = W_c + W_L = q_0^2(\cos^2\omega t + \sin^2\omega t) = q_0^2/2C$. Таким образом, полная энергия остается постоянной, т. е. сохраняется.

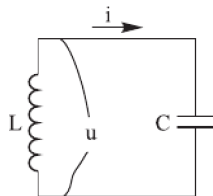


Рис. 24.12. Простейший колебательный контур

3. RLC-цепочка. Колебательный контур с сопротивлением.

Любая реальная электрическая цепь всегда обладает активным сопротивлением. Поэтому рассмотрим контур, обладающий всеми рассмотренными выше сопротивлениями, так называемый RLC-контур. С точки зрения топологии чаще всего рассматриваются два вида электрических цепей: последовательная RLC-цепь и параллельная RLC-цепь. Здесь рассматривается случай, когда эти элементы соединены последовательно (рис. 24.13).

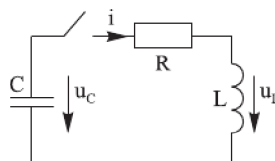


Рис. 24.13. Последовательный RLC-контур

Пусть, как и ранее, конденсатору сообщают заряд q_0 и в момент $t = 0$ замыкается выключатель. Так как цепь содержит сопротивление, на котором часть энергии будет превращаться в тепло, то незатухающего процесса, который мы получили в предыдущем разделе, не получится. Возникшие колебания будут затухающими.

Применение правил Кирхгофа для цепи рис. 24.13 приводит к следующему уравнению:

$$LdI/dt + q/C + IR = 0.$$

Так как $I = dq/dt$, то

$$Ld^2q/dt^2 + Rdq/dt + Q/C = 0.$$

Это дифференциальное уравнение второго порядка относительно заряда Q имеет такой же вид, как уравнение гармонического осциллятора с затуханием. Такое уравнение хорошо исследовано в теории линейных дифференциальных уравнений. Характеристическое уравнение последовательного колебательного контура $LC\lambda^2 + RC\lambda + 1 = 0$ имеет корни $\lambda_{1,2} = [-RC \pm \sqrt{(RC)^2 - 4LC}]/(2LC)$. Если подкоренное выражение больше нуля, т. е. $R^2 > 4L/C$, тогда угловая частота $\omega = \sqrt{1/LC - R^2/4L^2}$, а заряд измеряется во времени по закону $q = q_0 \exp[(-R/2L)t] \cos(\omega t)$.

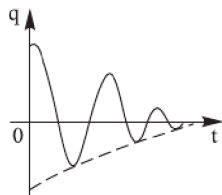


Рис. 24.14. Изменение заряда q во времени в RLC-контуре

Итак, все реальные контуры содержат электрическое сопротивление R . Процесс свободных колебаний в таком контуре уже не подчиняется гармоническому закону. За каждый период колебаний часть электромагнитной энергии, запасенной в контуре, превращается в джоулево тепло, и колебания становятся затухающими. Поэтому генератор колебаний, как правило, нуждается в периодической подкачке энергии, чтобы восполнить ее потери.

Из истории колебательного контура. Первый электрический колебательный контур был создан в 40-х годах девятнадцатого века Джозефом Генри. Произошло это случайно, при исследовании разряда конденсатора. Генри исследовал разряд заряженного конденсатора путем его короткого замыкания. На самом деле это было не коротким замыканием, а разрядом через катушку индуктивности, поскольку для индикации тока разряда использовался прамодельный современный амперметр, который представлял собой магнитную стрелку, окруженную большим количеством витков провода. При этом Дж. Генри считал провод достаточно толстым, чтобы пренебречь его сопротивлением, а действие индуктивного сопротивления было еще неизвестным. Предполагалось, что при разряде конденсатора стрелка покажет всплеск тока, что свидетельствовало бы о «вытекании электрической жидкости из лейденской банки». Вместо этого при разряде стрелка попеременно отклонялась то в одну, то в другую сторону. Это было воспринято как свидетельство того, что электрическая жидкость при разряде не только вытекает, но и втекает обратно в лейденскую банку. Поэтому ученые того времени объяснили многократное изменение направления тока интерференционными процессами, возникающими в результате короткого замыкания лейденской банки, заполненной электрической жидкостью. На опубликованное в 1848 году описание этого эксперимента Дж. Генри последовали весьма эмоциональные отрицательные отзывы всех изучавших в то время электрические явления ученых. Однако, попытавшись опровергнуть опубликованные материалы, оппоненты Дж. Генри убедились, что описанный им эксперимент оказался хорошо повторяемым. Обнаружив, спустя 20 с лишним лет, что этот знакопеременный процесс имеет форму затухающей синусоиды, лорд Кельвин заявил категорически и однозначно об открытии новой, ранее неизвестной, колебательной системы. Это было второе открытие контура. Но при этом все еще была неизвестной роль индуктивности, и лорд Кельвин считал, что колебательной системой является конденсатор сам по себе.

Спустя еще 10 лет Фергюссон осознал роль индуктивности, и контур был открыт окончательно.

До сих пор мы путешествовали по просторам постоянного тока. Применение постоянного тока привело к революционным изменениям в жизни людей. Оно заменило старомодный свет газовых фонарей, свечей и масла, осветило множество темных улиц городов. Изобретатели и предприниматели начали усиленно работать над усовершенствованием электрических машин и широким внедрением электричества в быт людей и промышленность.

Но уже тогда, в период появления угольных дуговых ламп, проявились недостатки постоянного тока. Одним из вариантов дуговых ламп был изобретен русским инженером Павлом Яблочковым. Его свеча состояла из двух высоких, тонких стержней углерода, разделенных слоем каолиновой глины, которая служила одновременно изолятором «связующим веществом». В отличие от предыдущих дуговых ламп «свеча Яблочкова» могла работать целых шестнадцать часов, потому что, как только одна пара сгорала, включалась другая. В 1878 году на эlegantной авеню де Опера горели его дуговые лампы, как и в магазинах Лувра и де Шатле. При постоянном электрическом токе положительный электрод нагревается значительно сильнее отрицательного и сгорает в два раза быстрее. Чтобы сгорание происходило одновременно, Яблочков впервые в истории электротехники применил для питания дуговых электрических ламп переменный ток. Для 1870-х годов это являлось очень смелым решением: переменный ток тогда был мало изучен, и подавляющее большинство электротехников считало его совершенно непригодным для практического использования. Яблочков опроверг это предубеждение, сконструировав генератор переменного тока, который был построен на французском заводе З. Грамма и первоначально назывался «альтернатор Грамма–Яблочкова». В это время взоры некоторых исследователей обратились к переменному току.

Переменный ток у всех на слуху. Откуда он взялся? С переменным током связана интересная история. Переменный ток далеко не сразу завоевал те позиции, которые по праву принадлежат ему в настоящее время (подробнее см. книгу С. Хакинга «Тесла против Эдисона». М.: Яуза-Пресс, 2015).

Еще на заре первых попыток бытового применения электричества разгорелся жаркий спор о том, какой ток лучше использовать для удовлетворения человеческих потребностей: постоянный или переменный? В быту сегодня широко применяется только переменный ток. Это обусловлено тем, что напряжение и силу переменного тока можно преобразовывать практически без потерь энергии. Сегодня понятно, что все зависит от источников потребления. А вот в восьмидесятых годах девятнадцатого века из-за вопросов, какой ток лучше и как выгоднее передавать электрическую энергию, развязалась более чем столетняя война (фактически закончившаяся лишь в конце ноября 2007 года) между конкурирующими фирмами «Edison Electric Light Company» и «Westinghouse Electric Corporation» (о деятельности этой компании еще поговорим ниже). Все началось в 1878 году, когда Томас Эдисон (1847–1931) основал компанию «Edison Electric Light», в будущем ставшую всемирно известной под именем «General Electric». За девять лет своего существования компания построила более сотни электростанций постоянного тока. Постоянный ток Эдисона отлично работал с лампами накаливания и первыми

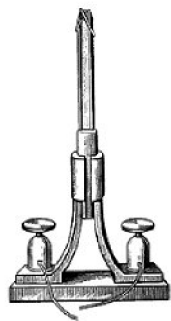


Рис. 24.15. «Свеча Яблочкова»



Рис. 24.16. Освещение по системе Яблочкова было установлено на улицах Парижа к открытию Всемирной выставки 1878 года («Наука и жизнь»)

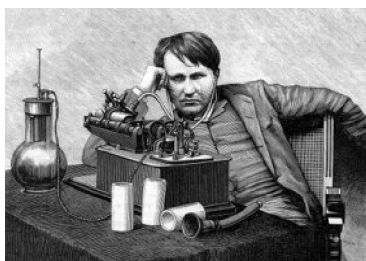


Рис. 24.17. Томас Альва Эдисон
(Википедия)

электродвигателями — единственными на тот момент предметами, нуждавшимися в электро-энергии. Однако столь мощного наступления одной компании не могли допустить его конкуренты, которые пытались противопоставить постоянному току Эдисона переменный. Одним из таких конкурентов оказался ведущий ученый-инженер и по совместительству успешный бизнесмен Джордж Вестингауз. Ознакомившись с патентом Эдисона, Джордж Вестингауз сразу же заметил слабое звено в его электростанциях

постоянного тока — большие потери мощности в проводах. Основной проблемой постоянного тока Эдисона явилась проблема передачи тока на большие расстояния, а точнее сопутствующая передаче потеря мощности в проводах, так как при увеличении расстояния растет сопротивление проводов. Чтобы снизить потери мощности при передаче, необходимо либо делать провод толще (т. е. снижать его сопротивление), либо повышать напряжение (что приведет к снижению силы тока). Поскольку способов эффективно повысить напряжение постоянного тока на тот момент науке известно не было, то в электростанциях Эдисона использовалось напряжение, близкое к нуждам потребителя, т. е. колеблющееся в диапазоне от ста до двухсот вольт. Однако электростанции не позволяли передать потребителю большей мощности, необходимой, скажем, для промышленных предприятий. Но даже знание недостатка эдисоновской системы не позволили Вестингаузу разработать нечто прорывное, способное на равных конкурировать с предложением Эдисона.



Рис. 24.18. Никола
Тесла (1856–1943)
(Википедия)

Однажды весной 1885 года Вестингауз прочитал в английском журнале «Инженерия» статью, в которой описывалась система переменного тока, включавшая в себя использование «вспомогательного генератора» (ставшего впоследствии более известным как трансформатор). С этого времени Вестингауз был полностью захвачен идеей применения переменного тока.

В 1887 году Вестингауз познакомился с Николой Теслой и его изобретениями. Тесла, работая на пределе человеческих сил, очень быстро получил патенты на несколько аппаратов переменного тока. В деловом мире началась борьба за сотрудничество с обладателем прав на наиболее эффективную систему переменного тока. В финальном противостоянии между Томсоном и Теслой на знаменитой лекции в Американском институте инженеров-электриков в мае 1888 года победу одержал последний. Сербский изобретатель, представив свою систему, доказал, что она способна транспортировать электроэнергию на сотни миль от источника ее получения, в то время как проект его соперника позволял осуществлять электропередачу на расстояние не более мили. За два года доходы компании Вестингауза выросли в четыре раза, что на современные деньги составило бы несколько миллионов.

Двигатель Теслы совершил настоящую революцию в передаче энергии. Тесла было суждено стать великим первопроходцем, открывшим миру невиданные

ранее возможности переменного тока. Внедрение переменного тока развязало вторую, после пара, промышленную революцию. Началась так называемая Война токов.

25. Переменный ток. Резистор, индуктивность и емкость в цепи переменного тока. Мощность тока. Резонанс в цепях переменного тока.

Электроснабжение постоянным током неохотно сдавало свои позиции. И это неудивительно. Постоянный ток используется широко: он протекает в фонарике и мобильном телефоне, в автомобиле и множестве других устройств бытового и специального назначения, где есть хоть один транзистор или диод. Именно от источников постоянного тока запитаны компьютер и все его микросхемы. И все же при всей широте применения постоянного тока в повседневной деятельности для питания бытовых приборов и промышленных установок доминирует переменный ток. А постоянный ток преобразовывался из переменного с помощью ртутных выпрямителей, при этом его можно преобразовывать практически без потерь энергии. Электростанции постоянного тока в США строились вплоть до 1920-х годов. В Европе переменный ток одержал полную победу гораздо быстрее, чем в США. Вероятно, это связано с тем, что в Европе позиции эдисоновской «General Electric» были вовсе незначительными, и люди проводили электрификацию, в большей мере основываясь на доводах ученых-физиков, а не ориентируясь на рекламу и имя Эдисона. Теперь электростанции с углем, шумом, дымом, находившиеся на близком расстоянии от городских потребителей, могли строиться за пределами городской черты. С исчезновением последнего потребителя постоянного тока, в ноябре 2007 года, главный инженер компании «Консолидейтед Эдисон», которая предоставляла электроснабжение постоянным током, перерезал символический кабель. Это и положило конец Войне токов. Вот такая история.

Параметры переменного тока. Представление о переменном токе можно получить, если медленно вращать ручку действующей модели генератора, подключенного к гальванометру. Отклонение стрелки гальванометра то вправо, то влево говорит о периодическом изменении величины и направления тока в цепи, т. е. о переменном токе.

Переменный ток получают при помощи генераторов переменного тока с использованием явлений электромагнитной индукции. На рис. 25.1 изображена простейшая установка для выработки переменного тока. При вращении рамки в ней возникнет ЭДС индукции — явление, которое подробно обсуждалось выше. Во вращающейся рамке из-за изменения во времени величины магнитного потока возникает изменяющаяся во времени ЭДС. Исходя из положений рамки, можно увидеть, что ЭДС индукции меняет не только значение, но и знак.

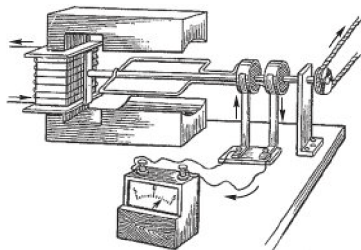


Рис. 25.1. Простейшая установка для получения переменного тока

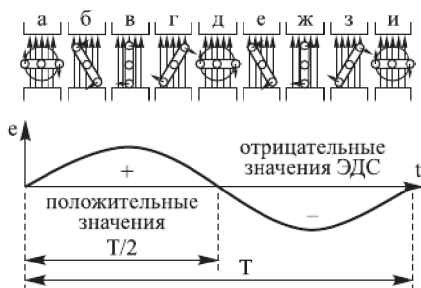


Рис. 25.2



Рис. 25.3. График переменного тока и напряжения

Таким образом, она является переменной (см. график на рис. 25.2). Если рамка имеет только активное сопротивление, то ток, который возникает в контуре под действием ЭДС индукции, с течением времени будет меняться, как и сама ЭДС. В генераторах переменного тока получают ЭДС, изменяющуюся во времени по закону синуса. При этом все токи и напряжения являются синусоидальными функциями времени. Используемый в производстве и быту ток изменяется по синусоидальному закону: $i = I_m \sin \omega t$ (рис. 25.3). В этом случае обеспечивается наиболее выгодный эксплуатационный режим работы электрических установок. Кроме того, синусоидальная форма тока и напряжения позволяет проводить точный расчет электрических цепей с использованием известных законов Ома и Кирхгофа, записанных в векторной или комплексной форме.

Переменные токи, ЭДС и напряжения характеризуются четырьмя основными параметрами: периодом, частотой, амплитудой и действующим значением.

Период. Промежуток времени T , в течение которого ЭДС, напряжение u или ток i совершают полный цикл изменений, называется периодом. Чем быстрее вращается виток или ротор генератора переменного тока, тем меньше период изменения ЭДС или тока.

Частота. Число полных периодов изменения ЭДС, напряжения или тока в 1 с называется частотой, $f = 1/T$. Она измеряется в герцах (Гц), т. е. числом периодов в секунду. Чем больше частота, тем меньше период изменения тока, напряжения или ЭДС. У нас все электрические станции переменного тока вырабатывают ток, изменяющийся с частотой 50 Гц, т. е. 50 периодов в секунду.

Амплитуда. Наибольшее значение переменного тока (переменных ЭДС и напряжения) называют амплитудным значением, или амплитудой. ЭДС дважды достигает амплитудного значения за время периода. Точно так же за один период ток два раза достигает амплитудного значения.

Ток, напряжение и ЭДС, действующие в электрической цепи в каждый отдельный момент времени, определяются так называемыми мгновенными значениями. Эти значения принято обозначать строчными буквами i , u , e .

Характеристикой переменного тока могут быть действия, которые не зависят от направления тока и могут быть такими же, как и при постоянном токе. К таким действиям можно отнести тепловое. К примеру, переменный ток протекает через проводник с заданным сопротивлением. Через определенный промежуток времени в этом проводнике выделится какое-то количество тепла. Можно подобрать такое значение силы постоянного тока, чтобы на этом же проводнике за то же время выделялось этим током такое же количество тепла, что и при пе-

ременном токе. Такое значение постоянного тока называется *действующим значением* силы переменного тока.

Для определения средней мощности нельзя воспользоваться средними значениями тока или напряжения (эти значения равны нулю). Поэтому берут средние значения от квадратов токов и напряжений. Получающиеся величины называются действующими значениями тока и напряжения. Действующие значения тока, напряжения и ЭДС обозначают соответственно I , U , E .

При синусоидальном переменном токе $I = I_0/\sqrt{2} = 0,707I_0$. Если известно действующее значение тока I , то его амплитудное значение $I_0 = \sqrt{2}I = 1,41 \cdot I$.

Аналогично для синусоидальных напряжений и ЭДС: $U = U_0/\sqrt{2}$, $E = E_0/\sqrt{2}$, где U_0 , E_0 — амплитудное значение тока, напряжения и ЭДС соответственно.

На практике для характеристики параметров переменного тока используют главным образом действующие значения тока, напряжения и ЭДС. В домашней электросети напряжение 220 В. Это действующее (эффективное) значение, а амплитудное в 1,41 раза больше и приблизительно равно 310 В. Мгновенное же напряжение изменяется от нуля до +310 В, затем через нуль до -310 В и в обратную сторону — вновь до нуля.

Электрическая энергия и механическая работа, создаваемые переменным током в различных электрических устройствах, пропорциональны действующим значениям тока и напряжения. Судить о переменных ЭДС, токе или напряжении по их мгновенным значениям неудобно, так как эти значения непрерывно меняются. Амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы не позволяют производить замеры в цепях переменного тока. Это происходит потому, что при каждом изменении тока в катушке меняется направление вращающего момента, которое воздействует на стрелку прибора. Из-за того, что катушка и стрелка обладают большой инерцией, прибор не реагирует на переменный ток. Для этих целей применяются приборы, не зависящие от направления тока. Большинство электроизмерительных приборов отражают как раз эффективное значение тока или напряжения. Например, это могут быть приборы, основанные на тепловом действии тока. В таких приборах стрелка поворачивается за счет удлинения нити (см. с. 302), нагреваемой током.

Резистор, индуктивность и конденсатор в цепях переменного тока.

1. Резистор в цепи переменного тока.

Еще раз подчеркнем, что особенностями переменного тока являются изменения силы и направления тока. Эти явления отличают его от постоянного тока. К примеру, при помощи переменного тока нельзя зарядить аккумулятор. Также нельзя применять его для других технических целей. В цепи переменного тока могут быть и другие сопротивления, зависящие от индуктивности цепи и ее емкости. Сейчас будем рассматривать электрическую цепь, в которой имеется сопротивление R , а катушка индуктивности и конденсатор отсутствуют (рис. 25.4).

Такой цепью может быть, например, нить накаливания электрической лампы и подводящие провода. Величину R , которую мы до сих пор называли электриче-

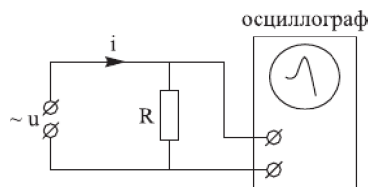


Рис. 25.4. Резистор в цепи переменного тока

ским сопротивлением или резистором, теперь будем называть *активным сопротивлением*. Такое название связано с тем, что только в резисторе происходит превращение электрической энергии во внутреннюю энергию.

Пусть напряжение на клеммах источника меняется по гармоническому закону: $u = U_m \sin \omega t$. Согласно закону Ома сила тока через резистор будет меняться

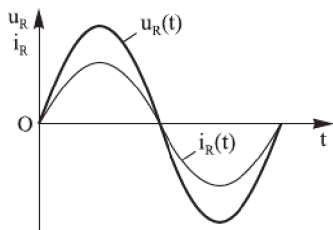


Рис. 25.5. Графики изменения тока и напряжения на резисторе

в соответствии с изменением ЭДС: $i = u/R = V/R = E/R \sin \omega t$, где V , E — максимальные (пиковые) значения напряжения. Как и в случае постоянного тока, мгновенное значение силы тока прямо пропорционально мгновенному значению напряжения.

В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения (рис. 25.5), а амплитуда силы тока равна амплитуде напряжения, деленной на сопротивление

2. Конденсатор в цепи переменного тока.

Если подключить конденсатор к источнику постоянного тока, то в цепи возникнет кратковременный импульс тока, который зарядит конденсатор до напряжения источника, а затем ток прекратится. Если заряженный конденсатор отключить от источника постоянного тока и соединить его обкладки с выводами лампы накаливания, то конденсатор будет разряжаться, при этом наблюдается кратковременная вспышка лампы.

При включении конденсатора в цепь переменного тока процесс его зарядки длится четверть периода. После достижения амплитудного значения напряжение между обкладками конденсатора уменьшается и конденсатор в течение четверти периода разряжается. В следующую четверть периода конденсатор вновь заряжается, но полярность напряжения на его обкладках изменяется на противоположную и т. д. Процессы зарядки и разрядки конденсатора чередуются с периодом, равным периоду колебаний приложенного переменного напряжения.

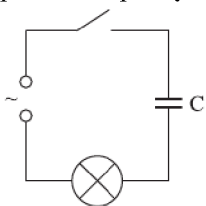


Рис. 25.6. Конденсатор в цепи переменного тока

Как и в цепи постоянного тока, через диэлектрик, разделяющий обкладки конденсатора, электрические заряды не проходят. Но в результате периодически повторяющихся процессов зарядки и разрядки конденсатора по проводам, соединенным с его выводами, течет переменный ток.

Лампа накаливания, включенная последовательно с конденсатором в цепь переменного тока (рис. 25.6), кажется горящей непрерывно, так как человеческий глаз при высокой частоте колебаний силы тока не замечает периодического ослабления свечения нити лампы.

Рассмотрим процессы в цепи подробнее. В соответствии с правилом Кирхгофа ЭДС источника в любой момент времени равна напряжению на обкладках конденсатора, $V = Q/C$, где Q — заряд конденсатора в этот момент. Таким образом, имеем $V = Q/C = E_0 \sin \omega t$.

Отсюда следует, что заряд на обкладках конденсатора изменяется в фазе с напряжением. А что с током? Так как $i = dQ/dt$, то $i = I_0 \cos \omega t = I_0 \sin (\omega t + 90^\circ)$,

где $I_0 = \omega C E_0$ есть амплитудное значение силы тока, а фазовый угол $\varphi = 90^\circ$. Таким образом, сила тока и напряжение не совпадают по фазе. Ток опережает напряжение на 90° (на $\pi/2$). То есть сила тока достигает максимального значения на четверть периода раньше, чем напряжение.

Можно также сказать, что напряжение отстает от силы тока по фазе на 90° .

Конденсатор в цепи переменного тока, подобно резистору, затрудняет перетекание заряда, так как на его обкладках накапливается заряд. Для резистора пиковое значение напряжения в соответствии с законом Ома запишем так: $V_0 = I_0 R$. Похожее соотношение можно записать и для конденсатора: $V_0 = I_0 X_c$, где X_c в соответствии с полученным выше будет: $X_c = 1/\omega C$. Величина X_c называется реактивным емкостным сопротивлением. Заметим, что это сопротивление нельзя рассматривать как связь между мгновенными значениями тока и напряжения, как в случае закона Ома. Это связано с тем, что напряжение и сила тока расходятся по фазе и пикового значения достигают не одновременно.

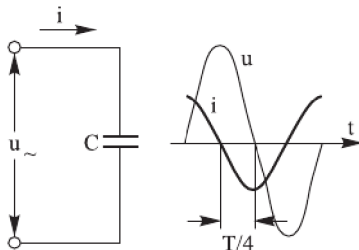


Рис. 25.7. В цепях с конденсатором ток опережает напряжение на четверть периода

Величина X_c устанавливает связь между пиковыми (и эффективными) значениями тока и напряжения. С физической точки зрения зависимость от частоты понятна. Чем выше частота, тем короче время накопления заряда. А чем больше C , тем больший заряд может накопиться в конденсаторе. Поэтому X_c обратно пропорциональна и емкости, и частоте. В случае постоянного тока X_c стремится к бесконечности ($\omega = 0$) и, как и следовало ожидать, конденсатор не проводит постоянный ток.

3. Индуктивность в цепи переменного тока.

Сила переменного тока состоит в прямой зависимости не только от напряжения и сопротивления, но и индуктивности проводников, подключенных к цепи. Вследствие наличия ЭДС самоиндукции, которая не дает току увеличиваться до тех значений, которые были бы, не будь индуктивности. Подключение к цепи катушки индуктивности увеличит общее сопротивление. Если напряжение изменится, то сила тока просто не успевает достигнуть тех максимальных значений, которые она приобрела бы, не будь самоиндукции. Из этого вытекает, что наибольшее значение силы переменного тока ограничивается индуктивностью. Рассмотрим цепь, в которой включена индуктивность L и отсутствует активное сопротивление (рассматривается идеальная катушка индуктивности). Тогда по второму закону Кирхгофа напряжение источника всегда равно по величине и противоположно по направлению ЭДС самоиндукции.

Сказанное запишем в виде следующего равенства: $E - L di/dt = 0$. Или

$$L di/dt = E_0 \sin \omega t.$$

Отсюда $di = (E_0/L) \sin \omega t dt$. Интегрируя это выражение, получим

$$i = -(E_0/\omega L) \cos \omega t.$$

Это равенство можно переписать следующим образом:

$$i = I_0 \sin (\omega t - 90^\circ),$$

где $I_0 = E_0/\omega L$.

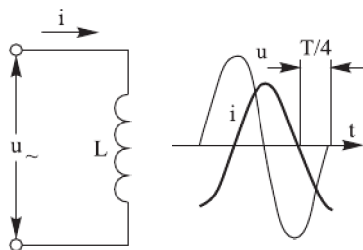


Рис. 25.8. Катушка индуктивности в цепи переменного тока

Здесь фазовый угол $\varphi = -90^\circ$. Графики напряжения и силы тока показаны на рис. 25.8. Видно, что сила тока отстает по фазе от напряжения на 90° .

Аналогично тому, как мы поступили в случае с конденсатором, напомним соотношение между пиковыми значениями напряжения и тока: $V_0 = I_0 X_L$. Величина X_L называется реактивным индуктивным сопротивлением: $X_L = \omega L$. Реактивное сопротивление также измеряется в омах. Как и реактивное емкостное сопротивление, оно устанавливает связь между пиковыми и эффективными значениями тока и напряжения и неприменимо для мгновенных значений.

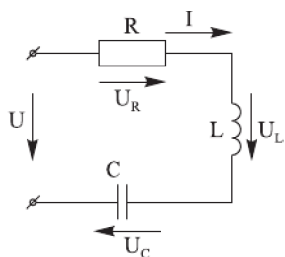


Рис. 25.9. Последовательный RLC-контур

4. Переменный ток в RLC-цепочке.

В общем случае неразветвленная цепь переменного тока может быть представлена расчетной схемой с активным сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C (рис. 25.9).

На схеме рис. U_R , U_L , U_C — падения напряжений на соответствующих элементах в данный момент времени. Пиковые напряжения обозначены как U_{R0} , U_{L0} , U_{C0} . Фазовые соотношения между силой тока и напряжений на каждом из элементов будут такими же, как и для каждого элемента в отдельности. Они

рассмотрены выше в соответствующих местах. В любой момент времени верно соотношение $E = U = U_R + U_L + U_C$.

Так как все напряжения расходятся по фазам, то сумма эффективных значений, которые обычно измеряет вольтметр переменного тока, не будет равна эффективному напряжению источника. То же заключение относится и к пиковым значениям.

Мощность в цепи переменного тока. В цепи, содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивления, в которой ток i и напряжение u в общем случае сдвинуты по фазе на некоторый угол φ , мгновенное значение мощности P равно произведению мгновенных значений силы тока i и напряжения u . Кривую мгновенной мощности p можно получить перемножением мгновенных значений тока i и напряжения u при различных углах. В некоторые моменты времени, когда ток и напряжение направлены навстречу друг другу, мощность имеет отрицательное значение. Возникновение в электрической цепи отрицательных значений мощности является вредным. Это означает, что в такие периоды времени приемник возвращает часть полученной электроэнергии обратно источнику; в результате уменьшается мощность, передаваемая от источника к приемнику. Чем больше угол сдвига φ , тем больше время, в течение которого часть электроэнергии возвращается обратно к источнику, и тем больше возвращаемая обратно энергия и мощность.

Полная, или кажущаяся, мощность S измеряется в вольт-амперах и определяется произведением переменных напряжения и тока системы. Удобно считать,

что полная мощность в цепи переменного тока выражается комплексным числом, таким, что активная мощность является его действительной частью, реактивная мощность — мнимой.

Если $\sin \varphi > 0$, то нагрузка имеет активно-индуктивный характер (электромоторы, трансформаторы, катушки, ...) — ток отстает от напряжения, если $\sin \varphi < 0$, нагрузка имеет активно-емкостный характер — (конденсаторы...) — ток опережает напряжение. Активная мощность P измеряется в ваттах (Вт, W), и это та мощность, которая потребляется электрическим сопротивлением системы на тепло и полезную работу.

Для сетей переменного тока мощность $P = UI \cos \varphi$, где U и I — эффективные значения напряжения и тока, а φ — сдвиг фаз между ними.

Реактивная мощность Q измеряется в вольт-амперах реактивных (ВА), и это электромагнитная мощность, которая запасается и отдается обратно в сеть колебательным контуром системы. Реактивная мощность в идеале не выполняет работы, т. е. название вводит в заблуждение. Из рис. 25.10 следует, что $Q = UI \sin \varphi$.

Все соотношения между P , S и Q определяются теоремой Пифагора и элементарными тригонометрическими тождествами для прямоугольного треугольника. Полная мощность (кажущаяся) — мощность цепи переменного тока, равная корню квадратному из суммы квадратов активной и реактивной мощностей:

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)}.$$

Итак, мы видим, что переменный ток характеризуется тремя видами мощностей.

Полная мощность (обозначается как S) — ее можно узнать перемножением действующего напряжения и тока. Это те значения, которые нам показывают амперметр и вольтметр. Единица полной мощности — вольт-ампер (ВА).

Активная мощность (обозначается как P) — мощность, которая фактически преобразуется в полезную мощность. Ее-то нам и показывает наш квартирный счетчик.

Активная мощность P зависит не только от тока I и напряжения U , но и от величины $\cos \varphi$, называемой *коэффициентом мощности*:

$$\cos \varphi = P/(UI) = P/\sqrt{(P^2 + Q^2)}.$$

По значению $\cos \varphi$ можно судить, как использует мощность источник данный приемник или электрическая цепь. Чем больше $\cos \varphi$, тем меньше $\sin \varphi$, следовательно, при заданных U и I тем больше активная и меньше реактивная мощности, отдаваемые источником. При повышении $\cos \varphi$ и постоянной активной мощности P , поступающей в приемник, уменьшается ток в цепи I . При этом уменьшаются потери мощности $I^2 R_{\text{пр}}$ в проводах и обеспечивается возможность дополнительной загрузки источника и электрической сети, т. е. лучшего их использования. При $\cos \varphi = 1$ реактивная мощность равна нулю и вся мощность, отдаваемая источником, является активной. Поэтому на всех предприятиях и во всех отраслях народного хозяйства стремятся всемерно повышать коэффициент мощности ($\cos \varphi$) и доводить его по возможности до единицы.

Значения коэффициента мощности электрических установок переменного тока различны. Электрические лампы обладают главным образом активным со-

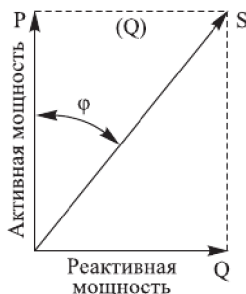


Рис. 25.10

противлением, поэтому при их включении сдвиг фаз между током и напряжением практически отсутствует. Следовательно, для осветительной нагрузки коэффициент мощности можно считать равным единице. Коэффициент мощности для двигателей переменного тока зависит от нагрузки, и при номинальной расчетной нагрузке двигателя значения коэффициента мощности электрических установок переменного тока различны. Для двигателя $\cos \varphi = 0,8\text{--}0,9$, а у крупных двигателей даже выше. При недогрузке двигателей коэффициент мощности их резко снижается (при холостом ходе $\cos \varphi = 0,25\text{--}0,3$).

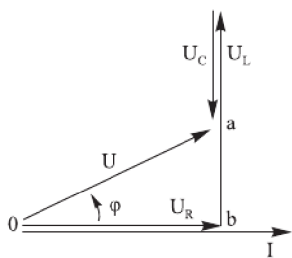


Рис. 25.11. Векторная диаграмма для последовательной RLC-цепочки

Резонанс в цепях переменного тока. Можно показать¹, что полное сопротивление цепи переменного тока (Z) равно

$$Z = \sqrt{[R^2 + (X_L - X_C)^2]} = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Здесь $X = (X_L - X_C)$. Подставляя вместо реактивных сопротивлений их полные выражения, для эффективного значения силы тока в цепи получим выражение

$$I_{\text{эфф}} = E_{\text{эфф}}/Z = E_{\text{эфф}}/\sqrt{[R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]}.$$

Из приведенного соотношения следует, что сила тока в цепи зависит от частоты питающего напряжения. Так как под корнем стоят положительные вели-

¹ При анализе электрических цепей синусоидального тока во многих случаях помогает следующий подход. По установленным правилам строится векторная диаграмма, из анализа которой выводятся необходимые расчетные формулы. Векторы напряжений на всех элементах и в соответствии со вторым законом Кирхгофа $U = U_R + U_L + U_C$ дают вектор входного напряжения.

Направление первого вектора при построении диаграмм произвольно. Оно диктуется соображениями удобства.

Сложение векторов можно выполнять по правилу параллелограмма, однако удобнее применять правило многоугольника, когда каждый последующий вектор пристраивается к концу предыдущего.

Нам известно, что напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током, поэтому вектор U_R мы направляем по вектору I (см. рис. 25.11). Отрезок ob . К его концу пристраиваем вектор U_L и направляем его вверх, так как напряжение на индуктивности опережает ток на 90° . Напряжение U_C находится в противофазе с U_L , т. е. отстает от тока на тот же угол 90° , поэтому вектор U_C , пристроенный к концу вектора U_L , направлен вниз (точка a). Векторная сумма U_R , U_L и U_C дает вектор приложенного напряжения U .

Так как $U_{L0} = I_0 X_L$, $U_{C0} = I_0 X_C$, тогда из треугольника oab , по теореме Пифагора, получим

$$U = \sqrt{[U_R^2 + (U_{L0} - U_{C0})^2]} = \sqrt{[(I_0 R)^2 + (I_0 X_L - I_0 X_C)^2]}.$$

Ток I можно вынести из-под корня и записать предыдущее выражение в виде $U = IZ$, где Z — полное сопротивление (полный импеданс) цепи

$$Z = \sqrt{[R^2 + (X_L - X_C)^2]} = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Здесь $X = (X_L - X_C)$. Это общее реактивное сопротивление цепи.

Полученное выражение для напряжения U называется законом Ома для всей цепи и может быть записано следующим образом: $I = U/Z$. Из треугольника oab можно определить угол сдвига фаз между напряжением и током:

$$\varphi = \arctg(ab/ob) = \arctg(U_L - U_C)/U_R = \arctg(X_L - X_C)/R = \arctg(X/R).$$

При $L = 0$ и C , равной бесконечности, получим чисто активное сопротивление $Z = R$.

Заметим, что векторная диаграмма построена для случая, когда $U_L > U_C$, что имеет место, когда в цепи преобладает индуктивность ($X_L > X_C$) — цепь носит активно-индуктивный характер. Общий ток отстает по фазе от входного напряжения. Возможны и иные режимы: $U_L < U_C$ и $U_L = U_C$.

чины, то можно заключить, что сила тока будет максимальна при равенстве нулю выражения в круглой скобке, т. е. когда $(\omega L - 1/\omega C) = 0$. Отсюда получаем, что это будет иметь место при частоте $\omega_0 = \sqrt{1/(LC)}$. Когда $\omega = \omega_0$ в цепи наблюдается резонанс. При этом $X_C = X_L$, поэтому импеданс соответствует чисто активному сопротивлению и $\cos \varphi = 1$. На рис. 25.12 показана зависимость тока в контуре при трех значениях сопротивления R . Чем R меньше, тем выше и острее резонанс.

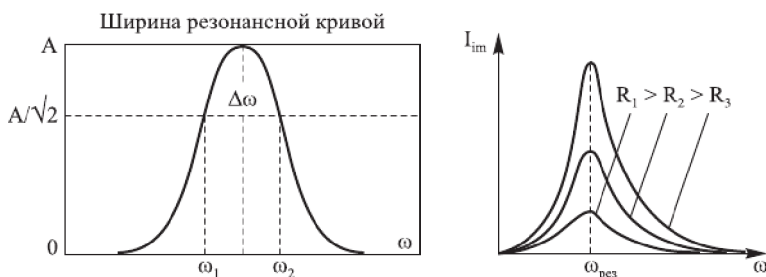


Рис. 25.12. Зависимость тока в RLC-контуре при резонансе

Как и в случае механического резонанса, при резонансе в колебательном контуре создаются оптимальные условия для поступления энергии от внешнего источника в контур. Мощность в контуре максимальна в том случае, когда сила тока совпадает по фазе с напряжением. Здесь наблюдается полная аналогия с механическими колебаниями: при резонансе в механической колебательной системе внешняя сила (аналог напряжения в цепи) совпадает по фазе со скоростью (аналог силы тока). На электрическом резонансе основано много схем. Так, для узкого интервала частот вблизи резонансной частоты контура можно выделить из многих сигналов одно колебание определенной частоты, т. е. в радиоприемнике настроиться на нужную длину волны.

На схеме 25.13 изображен входной контур простого радиоприемника, рассчитанного на работу в диапазонах средних и длинных волн.

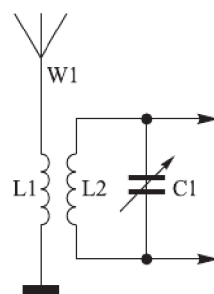


Рис. 25.13. Колебательный контур — необходимый узел радиотехнических устройств

Трехфазный ток. Как уже отмечалось, большинство потребителей электрической энергии работает на переменном токе. Переменное напряжение легко преобразовывать в другие величины при помощи трансформаторов, что открывает отличные перспективы для передачи практически без потерь значительных мощностей на любые расстояния, что недостижимо для установок постоянного тока, кроме работающих на сверхвысоких напряжениях. Появление генераторов и систем передачи энергии переменного тока стало одним из важнейших достижений девятнадцатого века. Большим событием в истории переменных токов была постройка самой крупной в мире в те годы гидроэлектростанции на Ниагарском водопаде. Этот величайший в мире водопад давно уже привлекал внимание предпринимателей, мечтавших об использовании его энергии. В октябре

1893 года под влиянием успеха фирмы «Вестингауз» на Чикагской выставке было решено принять проект, предложенный этой компанией. На Ниагарской гидроэлектростанции установили три генератора двухфазного тока по 5 тысяч лошадиных сил каждый. Пуск Ниагарской станции явился последним триумфом двухфазного тока. На первые позиции стал выходить трехфазный ток.

Подлинным триумфом трехфазного тока явилась установка по передаче энергии на расстояние 175 км от Лауфенского водопада до Франкфурта-на-Майне, осуществленная М. О. Доливо-Добровольским в 1891 году. К разработке системы трехфазного тока приложил руку все тот же Тесла.

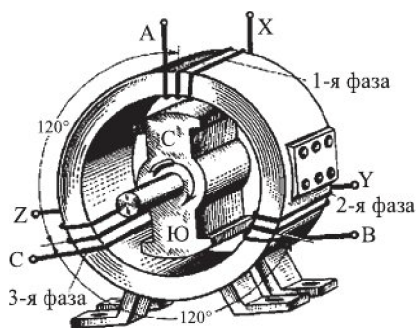


Рис. 25.14. Генератор трехфазного тока

Несомненные преимущества трехфазного тока вытеснили менее совершенный двухфазный не только в Европе, но и в США. Саму Ниагарскую станцию вскоре переоборудовали, установив на ней трехфазные генераторы.

Простейший генератор трехфазного тока (рис. 25.14) отличается от генератора однофазного тока тем, что на статоре его расположены три отдельные обмотки, оси которых сдвинуты одна относительно другой на угол 120° . Каждую из обмоток трехфазного генератора вместе с присоединенной к ней внешней цепью принято называть фазой.

Согласно государственному стандарту фазы обозначаются буквами А, В и С.

Выбор трехфазного переменного тока в качестве основной промышленной системы обусловлен рядом *преимуществ трехфазного тока* по сравнению с другими системами. Основные преимущества следующие:

- экономичность передачи электроэнергии на значительные расстояния; экономичность проявляется в необходимости меньшего числа линейных проводников, что снижает затраты на токопроводящие материалы;
- уравновешенность системы; это свойство является одним из важнейших, так как в неуравновешенной системе возникает неравномерная механическая нагрузка на энергогенерирующую установку, что значительно снижает срок ее службы;
- возможность простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для трехфазного асинхронного двигателя² и ряда других электротехнических устройств;
- возможность получения в одной установке двух рабочих напряжений — фазного и линейного.

Трехфазная система переменного тока получила широкое распространение во всем мире благодаря тому, что она обеспечивает наиболее выгодную передачу

² Асинхронный двигатель — электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора. В этом двигателе отсутствуют механические коммутаторы в цепи ротора. Наибольший вклад в создание асинхронных двигателей внесли Галилео Феррарис и Никола Тесла.

электрической энергии и позволяет использовать надежные в работе и простые по устройству электродвигатели (так называемые асинхронные двигатели). Электрифицированные железные дороги также получают энергию по линиям трехфазного тока, который затем на тяговых подстанциях преобразуют в постоянный или однофазный переменный ток, подаваемый в контактную сеть.

Современный генератор электрического тока — это внушительное сооружение из медных проводов, изоляционных материалов и стальных конструкций. При размерах в несколько метров важнейшие детали генераторов изготавливаются с точностью до миллиметра. Генерируемый ток удобнее снимать с неподвижных обмоток, а через скользящие контакты — подводить сравнительно слабый ток к вращающемуся электромагниту. Этот ток вырабатывается отдельным генератором постоянного тока (возбудителем, расположенным левее на том же валу).

Мы продолжаем наше путешествие по области электричества. Впереди рассказ об интереснейших открытиях, имевших огромные последствия в жизни людей.

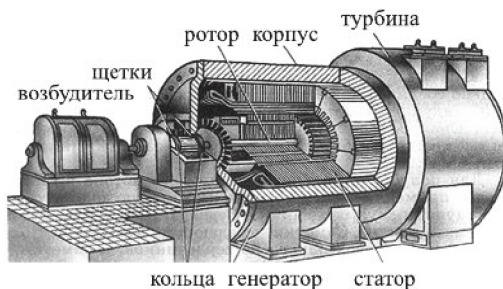


Рис. 25.15. Структурная схема генератора переменного тока

26. *Связавший два вида полей. Ток смещения. Уравнения Максвелла. Электромагнитные волны. Опыты Герца. Шкала электромагнитных волн. Свет как электромагнитная волна.*

Опыты Фарадея по электромагнитной индукции отчетливо показали, что электродвижущая сила индукции (ЭДС индукции) пропорциональна скорости изменения магнитного поля. Фарадей также пришел к фундаментальному выводу в сформулированной им идее магнитного поля. Дальнейшее развитие идей Фарадея мы находим в основополагающих работах Максвелла (1831–1879).

Согласно закону Фарадея переменные магнитные поля порождают электрические поля. Но не было известно, порождают ли переменные электрические поля — магнитные. Избавиться от противоречия и восстановить симметрию электрического и магнитного полей Максвеллу удалось путем введения источника магнитного поля, который можно было представить как некий воображаемый электрический ток. Идея Максвелла заключалась в том, что изменяющееся во времени электрическое поле с определенной точки зрения можно рассматривать как электрический ток и этот ток способен возбуждать в окружающем пространстве магнитное поле. Максвелл допустил, что такого рода процесс реально происходит в природе. Переменное электрическое поле в пустоте или внутри диэлектрика было названо им током смещения. Током названо потому, что это поле порождает магнитное поле точно так же, как и обычный ток. (Этим начинается,

этим же и кончается сходство тока смещения с током проводимости.) Утверждение Максвелла долгое время оставалось не чем иным, как гипотезой. Сейчас может показаться, что ничего нет в этом предположении необычного. Но не надо забывать, что сама возможность этой гипотезы возникла лишь после объяснения электромагнитной индукции на основе представлений о поле, когда большинство известных ученых вообще не придавало самому понятию поля сколько-нибудь серьезного значения.

Ток смещения. Допустим, что мы длинными прямыми проводами подключили к генератору переменного тока простейший воздушный конденсатор, состоящий из двух пластин. Понятно, в цепи потечет какой-то ток. Возьмем маленький индикатор переменного магнитного поля и поведем его вдоль провода. Индикатор покажет некую величину магнитного поля: ведь по проводу течет, значит, он обязан создавать вокруг себя магнитное поле. А теперь, продолжая вести индикатор вдоль проводов, передвинем его дальше так, чтобы он оказался бы напротив конденсатора (сбоку от пластин). Что покажет индикатор? Ноль (ведь тока проводимости между обкладками конденсатора нет)? Это было бы нелогично: одинаковое магнитное поле вдоль провода, потом вдруг полный ноль между обкладками, а потом (когда пойдем индикатором вдоль второго провода) снова поле. Интуитивно ясно, что магнитное поле вдоль всей цепи должно быть одинаковым (считая размеры конструкции малыми, чтобы пренебречь излучением).

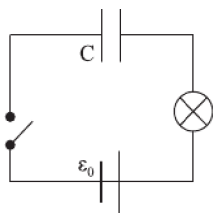


Рис. 26.1

Так и есть на практике. Но магнитное поле около конденсатора создает не ток, а меняющееся по времени электрическое поле между его обкладками, которое Максвелл назвал током смещения. Продолжим обсуждение на примере электрической цепи (рис. 26.1).

Если замкнуть ключ (рис. 26.1), то лампа при постоянном токе гореть не будет: емкость C — разывает цепь постоянного тока. Но вот в моменты включения лампа будет вспыхивать.

При переменном токе лампа горит, но в то же время нам ясно, что электроны из одной обкладки в другую не переходят — между ними изолятор (или вакуум). Во всей цепи, кроме зазора между пластинами конденсатора, протекает обычный ток I , который мы будем в дальнейшем называть током проводимости. В зазоре движение зарядов невозможно и ток проводимости отсутствует. Однако здесь возникает переменное электрическое поле. Это утверждение позволяет (на базе с конденсатором) найти величину тока смещения. Максвелл предположил, что ток проводимости переходит на границе зазора в ток смещения $I_{\text{см}}$, отождествляемый с переменным электрическим полем. Таким образом, между пластинами конденсатора существует ток смещения. В результате ток во всей замкнутой цепи нигде не прерывается, то есть $I = I_{\text{см}}$. Выразим плотность $j_{\text{см}}$ тока смещения через характеристики электрического поля. Для этого найдем плотность $j_{\text{пр}}$ тока проводимости в сечении пластин: $j_{\text{пр}} = d/dt(q/S) = d\sigma/dt$, где S — площадь пластин, q — их заряд, σ — поверхностная плотность заряда. Из постулированной непрерывности тока во всей цепи следует, что $j_{\text{см}} = j_{\text{пр}}$, то есть

$$j_{\text{см}} = d\sigma/dt.$$

Плотность заряда σ связана с напряженностью поля в плоском конденсаторе формулой $\sigma = E/\epsilon_0$. Удобнее характеризовать электрическое поле не вектором напряженности \mathbf{E} , а вектором электрической индукции \mathbf{D} . Для вакуума $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$, поэтому $\sigma = D$. Тогда получаем $j_{\text{см}} = dD/dt$.

В общем случае электрическое поле является функцией координат и времени, поэтому в последнем выражении следует использовать символ $\partial \mathbf{D} / \partial t$ частной производной по времени: $j_{\text{см}} = \partial \mathbf{D} / \partial t$.

Таким образом, плотность тока смещения равна скорости изменения электрической индукции. Для различия тока проводимости и тока смещения будем обозначать их разными символами — i и j . Плотность полного тока: $J_{\Sigma} = i + j_{\text{см}}$. Ток смещения, естественно, не переносит зарядов. Из всех физических свойств электрического тока Максвелл приписал току смещения лишь одно свойство — способность создавать в окружающем пространстве магнитное поле. *Ток проводимости (направленное движение заряженных частиц) и ток смещения (связан с переменным электрическим полем) имеют разную физическую природу, но они сходны по их способности создавать магнитное поле.* Например, магнитное поле внутри конденсатора можно рассматривать как магнитное поле тока проводимости, текущего по проводнику конечных размеров с плотностью тока, равной плотности тока смещения. Это позволяет применять формулы магнитостатики для расчета магнитного поля тока смещения. При этом линии вектора тока смещения будут такими же, как и для тока проводимости (рис. 26.3). Понятие тока смещения введено Максвеллом для установления количественных соотношений между изменяющимся электрическим полем и вызываемым им магнитным полем. Максвелл сделал вывод: всякое переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле. Переменное электрическое поле в конденсаторе создает такое же магнитное поле, как если бы между обкладками существовал ток проводимости, имеющий величину, равную току в металлическом проводнике.

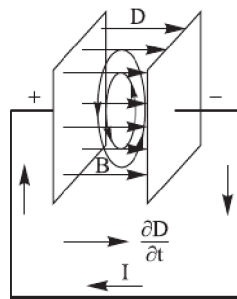


Рис. 26.2

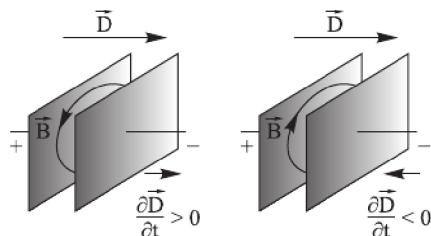


Рис. 26.3. Электрическая индукция порождает магнитное поле между обкладками конденсатора

Вихревое магнитное поле (\mathbf{B}), образующееся при протекании тока смещения, связано с направлением вектора $d\mathbf{D}/dt$ правилом правого винта. Трактовка Максвелла выявляет тесную связь электрического и магнитного полей: всякое изменение магнитного поля порождает вихревое электрическое поле. (Подробнее см. «Уравнения Максвелла для электромагнитного поля», dl2kq.de/ant/3-74.htm.)

Уравнения Максвелла. Изложенная идея Максвелла является обобщением или новой трактовкой закона Фарадея. Трактовка Максвелла выявляет тесную связь электрического и магнитного полей: всякое изменение магнитного поля порождает вихревое электрическое поле. Было обнаружено еще одно фундаментальное свойство электромагнитного поля, не подлежащее разложению на более

элементарные. Переменное электрическое поле порождает в пустом пространстве магнитное поле с замкнутыми силовыми линиями (вихревое поле).

Работы Максвелла были основаны на ряде важных экспериментальных открытий, которые были сделаны в начале XIX века, в первую очередь на открытиях Эрстеда и Фарадея. Максвелл высоко оценил идеи Фарадея за скрытый в них глубокий математический смысл, за точность и логичность его определений. Максвелл говорил: «Когда я стал углубляться в изучение работ Фарадея, я заметил, что метод его понимания тоже математичен, хотя и представлен в условной форме математических символов. Я также нашел, что метод может быть выражен в обычной математической форме и таким образом может быть сопоставлен с методами признанных математиков». Заменяя фарадеевский термин «поле сил» на понятие «напряженность поля», Максвелл сделал его ключевым объектом своей теории. Анализируя известные эксперименты, Максвелл получил систему уравнений для электрического и магнитного полей. Вспомним, что законы Ньютона дают нам возможность по известным силам найти кинетические параметры (скорость, ускорение), а по известным кинетическим параметрам, путем интегрирования, — найти зависимость пути от времени. А уравнения Максвелла позволяют по известному полю найти токи и заряды (достаточно просто), а также по известным токам и зарядам найти поле (что сложнее). Эти уравнения представляют собой стройную систему, состоящую из четырех уравнений и исчерпывающим образом описывающую все измеримые характеристики электромагнитных полей и электрических токов, которая названа его именем. Но такой вид первоначальная система уравнений Максвелла получила после трудов Хевисайда

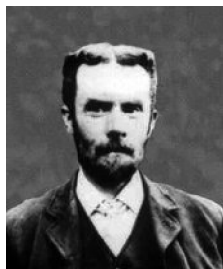


Рис. 26.4. Оливер Хевисайд

(1850–1925). Изучив трактат Максвелла и отложив его в сторону, Хевисайд, как он пишет в письме к Бетено, «пошел своим собственным путем». Хевисайд продолжил развитие электродинамики Максвелла с того места, на котором Максвелл оставил свою теорию. В течение ряда лет в журнале «Electrician» из номера в номер публиковались подробные статьи Хевисайда, посвященные систематическому развитию теории электромагнитного поля. Та теория электрических и магнитных явлений, которую мы теперь широко используем, имеет во многом тот вид, который ей был придан Хевисайдом. Он сделал еще так много, чтобы его имя не было забыто в физике.

Следствия из уравнений Максвелла. Из уравнений Максвелла следует, что электромагнитное поле сохраняет само себя и не может исчезнуть. Допустим, мы имеем магнитное поле, а затем выключаем его. То есть меняем его скачком. По закону Фарадея, за счет изменения магнитного поля вокруг него (то есть чуть дальше) появляется электрическое поле. Причем тоже изменяющееся, так как его прародитель — магнитное поле — было изменяющимся. Это электрическое поле создаст вокруг себя (то есть еще дальше от исходного) новое магнитное поле (также изменяющееся). И так до бесконечности: магнитное и электрическое поле, перекачиваясь одно в другое, распространяются в пространстве до бесконечности. Электричество и магнетизм как будто совершают крошечные стремительные скачки, перекувыркиваясь друг через друга, пребывая, по словам Максвелла, «во взаимных объятиях». Появляется электромагнитная волна.

Далее из системы уравнений Максвелла вытекает, что распространяющееся в пространстве электромагнитное поле может делать это только со скоростью света c . Этот факт произвел революцию в физике. Ведь когда Максвелл писал свои уравнения, еще не было известно, что коэффициент c — это скорость света (мы ее сразу называли так, потому что знали ответ, но Максвелл-то его вначале не знал). Тогда это была просто некая константа. Точнее говоря, «электромагнитной константой» называли величину c^2 , получая ее из экспериментов, со светом никак не связанных. Потрясенный полученным результатом, Максвелл пишет Уильяму Томсону (лорду Кельвину): «Скорость поперечных волновых колебаний в нашей гипотетической среде, вычисленная из электромагнитных опытов Кольрауша и Вебера, столь точно совпадает со скоростью света, вычисленной из оптических опытов Физо, что мы едва ли можем отказаться от вывода, что *свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений*». И далее в письме: «Я получил свои уравнения, живя в провинции и не подозревая о близости найденной мной скорости распространения магнитных эффектов к скорости света, поэтому я думаю, что у меня есть все основания считать магнитную и световую среды как одну и ту же среду...» Таким образом, прямо из экспериментов с зарядами и токами нашли значение константы c^2 . А из уравнений Максвелла оказалось, что электромагнитное поле обязано распространяться со скоростью c . Для вакуума $c = \sqrt{1/(\epsilon_0\mu_0)} \approx 3 \cdot 10^8$ м/с. Уравнения Максвелла красивы и лаконичны. Эти уравнения демонстрируют пример того, как физика объединила, казалось бы, абсолютно различные свойства — электричество и магнетизм, — обнаружив в них различные стороны одного и того же физического явления — электромагнитного взаимодействия.

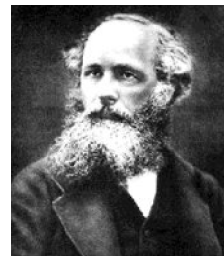


Рис. 26.5. Джеймс-Клерк Максвелл (1831–1879)

Электромагнитные волны. После Максвелла свет стал электромагнитными колебаниями и появились электромагнитные волны. Взгляды Максвелла опровергали все известные на то время представления о распространении поперечных волн и о волнах вообще. Но многие физики понимали, что совпадение скорости света и электромагнитных волн — фундаментальный результат, который говорит, что именно здесь физике ожидает много новых открытий.

Однако часть физиков выступила против теории Максвелла (особенно много возражений вызвала концепция тока смещения). Гельмгольц предложил свою теорию, компромиссную по отношению к моделям Максвелла, и поручил своему ученику Генриху Герцу (1857–1894) провести ее экспериментальную проверку. Однако опыты Герца однозначно подтвердили правоту Максвелла. Об этом мы расскажем ниже.

Электромагнитная волна — процесс распространения электромагнитного поля в пространстве. Электромагнитная волна представляет собой процесс последовательного, взаимосвязанного изменения векторов напряженности электрического и магнитного полей, при котором изменение электрического поля вызывает изменения магнитного поля, которые, в свою очередь, вызывают изменения электрического поля. В результате образуются сцепленные между собой электрическое и магнитное поля, составляющие электромагнитную волну. Она «от-

рывается» от зарядов и токов, которые ее породили. Способ существования электромагнитной волны делает невозможным ее неподвижность в пространстве и постоянство напряженности во времени.

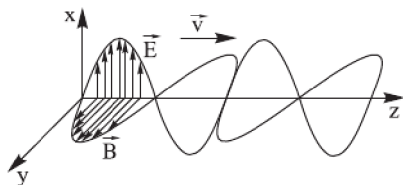


Рис. 26.6. Электромагнитная волна в свободном пространстве

Из решений уравнений Максвелла вытекает положение векторов электрического и магнитного поля относительно направления движения электромагнитной волны:

- **B** перпендикулярно направлению распространения волны;
- **E** также перпендикулярно направлению распространения;
- **B** и **E** перпендикулярны между собой.

В нашем трехмерном мире это возможно, только если **B**, **E** и направление движения волны расположены по трем координатным осям.

Из опыта следует утверждение, что электромагнитные волны, создаваемые источником, всегда бегут только от него, хотя решение волнового уравнения, следующего из уравнений Максвелла, дает два решения. При этом решение уравнений Максвелла дает обеим волнам равные права. Но физический смысл имеет только одна из этих волн — та, которая уходит от источника. Из-за этого добавочного правила мы теряем симметрию по времени, которая есть в уравнениях Максвелла.

К сожалению, Максвелл умер рано и не дожид до надежного экспериментального подтверждения своих расчетов. Международное научное мнение изменилось в результате опытов Генриха Герца, который через 20 лет (1861–1889) в серии экспериментов продемонстрировал генерацию и прием электромагнитных волн.

Герц поставил перед собой широкую задачу: он хотел выяснить, существуют ли в действительности электромагнитные волны, предсказанные теорией Максвелла. За несколько дней он изготовил необходимые приборы и начал планомерно экспериментировать.

Для своих опытов Герц создал источник электромагнитных волн, названный им вибратором. Вибратор состоял из двух проводящих сфер (в ряде опытов цилиндров) диаметром 10–30 см, укрепленных на концах проволочного разрезанного посередине стержня. Концы половин стержня в месте разреза оканчивались небольшими полированными шариками, образуя искровой промежуток в несколько миллиметров.

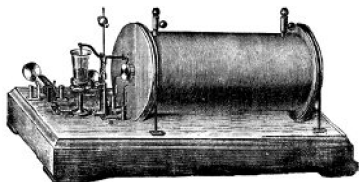


Рис. 26.7. Индукционная катушка Румкорфа

Сферы подсоединялись ко вторичной обмотке катушки Румкорфа (1803–1877), являвшейся источником высокого напряжения.

Суть происходящих в вибраторе явлений коротко заключается в следующем. Индуктор Румкорфа (преобразователя постоянного тока низкого напряжения в переменный ток высокого напряжения) создает на концах своей вторичной обмотки очень высокое, порядка десятков киловольт, напряжение, заряжающее сферы зарядами противоположных знаков. В определенный момент в искровом промежутке вибратора возникает электрическая

искра, делающая сопротивление его воздушного промежутка столь малым, что в вибраторе возникают высокочастотные затухающие колебания, длящиеся во все время существования искры. Поскольку вибратор представляет собой открытый колебательный контур, происходит излучение электромагнитных волн.

Наименьший из применявшихся Герцем вибраторов (26 см) позволял получить колебания с частотой порядка 5×10^8 герц, что соответствует длине волны в 60 сантиметров. Чтобы улавливать излучаемые волны, Герц придумал простейший резонатор — проволочное незамкнутое кольцо или прямоугольную незамкнутую рамку с такими же, как у «передатчика», латунными шариками на концах и регулируемым искровым промежутком.

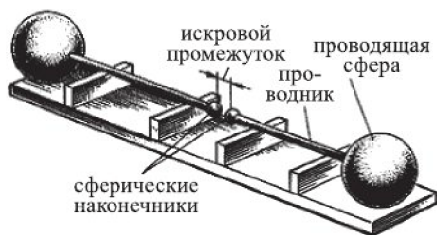


Рис. 26.8. Вибратор Герца

В результате проведенных опытов Герц обнаружил, что если в генераторе будут происходить высокочастотные колебания (в его разрядном промежутке проскакивает искра), то в разрядном промежутке резонатора, удаленном от генератора даже на 3 м, тоже будут проскакивать маленькие искры. Таким образом, искра во второй цепи возникала без всякого непосредственного контакта с первой цепью. Проведя многочисленные опыты при различных взаимных положениях генератора и приемника, Герц приходит к выводу о существовании электромагнитных волн, распространяющихся с конечной скоростью. Будут ли они вести себя как свет? Герц проводит тщательную проверку этого предположения. В конечном итоге ему удалось произвести и показать на прямолинейных проводах и в свободном пространстве постоянные электрические волны. Эти были нередко крохотные искорки, которые он должен был с лупой отыскивать в затемненной аудитории, убедительно показывали узлы и выпуклости электрических волн. Герц так объяснял свои наблюдения: «Волнообразно распространяющееся индукционное действие отражается от стен, причем отраженные волны в некоторых местах усиливают падающие, в других — ослабляют, в результате чего, благодаря интерференции обеих волн, в воздухе образуются стоячие волны». «Я считаю, — писал Герц Гельмгольцу в марте 1888 года, — что волновую природу звука в свободном пространстве нельзя представить так же ясно и наглядно, как волновую природу электродинамического распространения». При этом важно, что эксперименты Герца производились простыми средствами — их можно было повторить и проверить в любом физическом институте. Скептики могли в этом убедиться собственноручно.

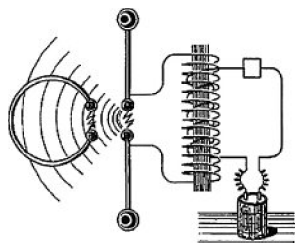


Рис. 26.9. Схема опыта Герца

После изучения законов отражения и преломления, после установления поляризации и измерения скорости электромагнитных волн он доказал их полную аналогию со световыми. Все это было изложено им в работе «О лучах электрической силы», вышедшей в декабре 1888 года.

Этот год считается годом открытия электромагнитных волн и экспериментального подтверждения теории Максвелла.

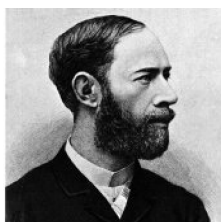


Рис. 26.10. Генрих Герц

В 1889 году, выступая на съезде немецких естествоиспытателей, Герц говорил: «Все эти опыты очень просты в принципе, тем не менее они влекут за собой важнейшие исследования. Они рушат всякую теорию, которая считает, что электрические силы перепрыгивают пространство мгновенно. Они означают блестящую победу теории Максвелла. Насколько маловероятным казалось ранее ее воззрение на сущность света, настолько трудно теперь не разделить это воззрение». Генрих Герц так подытожил результаты своих экспериментов: «Описанные эксперименты, как,

по крайней мере, кажется мне, устраняют сомнения в тождественности света, теплового излучения и электродинамического волнового движения». Это был чрезвычайно важный вывод.

Периодические изменения E и B , происходящие при распространении электромагнитной волны со скоростью c вдоль оси z , можно описать следующим образом, если считать, что в каждой точке пространства эти изменения со временем t являются гармоническими колебаниями постоянной амплитуды E_0 и B_0 соответственно. Пусть изменения E_y и B_x в точке $z = 0$ происходят по формулам $E_y = E_0 \sin(\omega t)$, $B_x = -B_0 \sin(\omega t)$. Эти изменения E_y и B_x , передаваясь от слоя к слою, образуют электромагнитную волну, распространяющуюся вдоль оси z . В точке, находящейся на расстоянии z от начала координат, изменения E_y и B_x тоже будут гармоническими, отставая на время t , необходимое для прохождения волной расстояния z : $t = z/c$, где c — скорость распространения волны, равная в вакууме скорости света. Поэтому изменения E_y и B_x в точке z можно получить из выражений $E_y = E_0 \sin(\omega(t - z/c))$ и $B_x = -B_0 \sin(\omega(t - z/c))$.

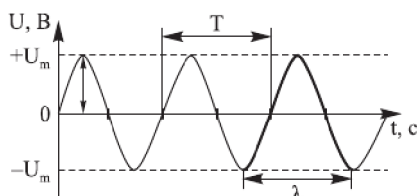


Рис. 26.11. Синусоидальная электромагнитная волна

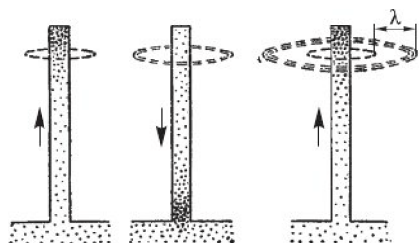


Рис. 26.12. Движение электронов в антенне и образование волн

Если одновременно измерить E_y и B_x в различных точках вдоль оси z и построить соответствующий график, то он окажется синусоидой, и через расстояние, равное $\lambda = 2\pi c/\omega$, значения E_y и B_x будут повторяться. Расстояние λ между двумя ближайшими точками волны, колеблющимися в одинаковой фазе, называют длиной волны, которую также можно вычислить по формуле $\lambda = cT$, где T — период электромагнитных колебаний. Мы рассмотрели синусоидальную электромагнитную волну лишь для наглядности. Рассмотрим в качестве примера радиоволны. Если говорить о длине волны, то нам следует упомянуть об условии возникновения радиоволны. Радиоволна — это ток высокой частоты. Токами высокой частоты называют токи, частота которых выше 10 000 Гц. Когда такие токи циркулируют в проводнике, они производят электромагнитные волны. Отделяясь от проводника, волны распростра-

няются в виде колец (см. рис. 26.12), радиус которых увеличивается со скоростью 300 000 000 м/с. Длина волны есть расстояние, проходимое волной за один период, т. е. за время одного колебания. Зная скорость распространения радиоволн и частоту, можно определить длину волны. Пусть, например, частота тока в антенне радиопередатчика составляет 1 000 000 Гц. Тогда период колебания равен $T = 0,000001$ с. За одну секунду радиоволна проходит 300 000 000 м, а за 0,000001 с она пройдет расстояние 300 м. Это и есть длина волны. Если частота тока станет вдвое меньше и будет составлять 500 000 Гц, то период колебания станет равным 0,000002 с. За это время радиоволна пройдет путь в 600 м. Чем меньше частота, тем больше длина волны, и наоборот.

Шкала электромагнитных волн. Энергия электромагнитной волны зависит от ее длины — расстояния между двумя соседними «пиками». В зависимости от длины волны электромагнитные волны разделены на диапазоны: радиоволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение (рис. 26.13). Длина волны гамма-излучения не достигает и одной стомиллиардной метра, в то время как радиоволны могут иметь длину, выражающуюся в километрах. Эта шкала электромагнитных волн весьма условна, поскольку соседние диапазоны часто перекрывают друг друга. Как вы можете видеть, в этом ряду присутствуют колебания с совершенно различными свойствами, поэтому их изучают в отдельных разделах физики и других наук. Также и применение на практике электромагнитных колебаний из различных диапазонов совершенно различно.

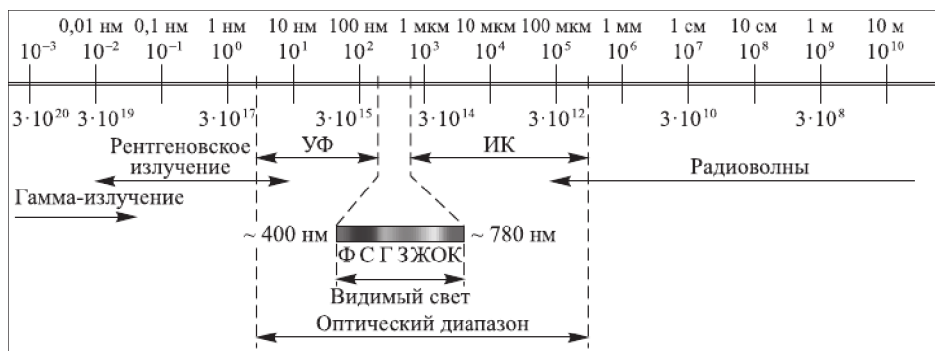
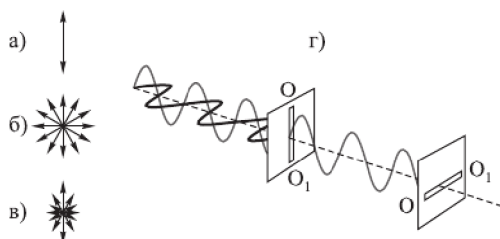


Рис. 26.13. Шкала электромагнитных волн

Свет как электромагнитная волна. Под светом в оптике понимают электромагнитные волны достаточно узкого диапазона. Нередко под светом понимают не только видимый свет, но и примыкающие к нему широкие области спектра. Исторически появился термин «невидимый свет» — ультрафиолетовый свет, инфракрасный свет, радиоволны. Длины волн видимого света лежат в диапазоне от 380 до 760 нанометров. Одной из характеристик света является его цвет, который определяется частотой световой волны. Белый свет представляет собой смесь волн различных частот. Как мы знаем, он может быть разложен на цветные волны, каждая из которых характеризуется определенной частотой. Такие волны называются монохроматическими.

Цвет	Диапазон длин волн, нм	Диапазон частот, ТГц	Диапазон энергии фотонов, эВ
Фиолетовый	380–440	790–680	3,26–2,82
Синий	440–485	680–620	2,82–2,56
Голубой	485–500	620–600	2,56–2,48
Зеленый	500–565	600–530	2,48–2,19
Желтый	565–590	530–510	2,19–2,10
Оранжевый	590–625	510–480	2,10–1,98
Красный	625–740	480–405	1,98–1,68

Свет, как электромагнитная волна, проявляет рассмотренные ранее свойства интерференции и дифракции. Ранее при рассмотрении поляризации света мы говорили о том, что свет — это поперечная волна. Теперь остановимся на этом вопросе уже на основе теории света как электромагнитной волны. Основное свойство электромагнитных волн — поперечность колебаний векторов напряженности электрического и магнитного полей по отношению к направлению распространения волны. В природе существует обширный класс электромагнитных волн, в которых колебания электрического и магнитного полей совершаются в строго определенных направлениях. Такое свойство определяет состояние поляризации электромагнитной волны.



Если вектор напряженности электрического поля электромагнитной волны колеблется вдоль некоторого направления в пространстве, говорят о линейной поляризации рассматриваемой электромагнитной волны (рис. 26.14).

Рис. 26.14. (а) ориентации светового вектора в плоскости, перпендикулярной световому лучу при линейно-поляризованном свете; (б) то же для естественного света; (в) то же для частично поляризованного света; (г) прохождение луча, состоящего из двух линейно-поляризованных световых волн, через два скрещенных поляризатора с оптической осью OO_1

Из уравнений Максвелла следует существование полностью поляризованных электромагнитных волн, у которых по мере распространения волны векторы напряженности электрического и магнитного полей изменяются таким образом, что траектория их движения в плоскости, поперечной направлению распространения волны, представляет собой эллипс или окружность. В этом случае говорят соответственно об эллиптической или круговой поляризации электромагнитной волны.

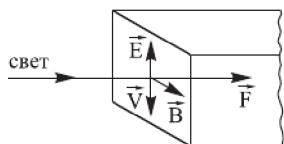


Рис. 26.15

Энергия электромагнитной волны. Возможность обнаружения электромагнитных волн указывает на то, что они переносят энергию. Объемная плотность ω энергии электромагнитной волны в месте ее нахождения (см. с. 339):

$$\omega = \omega_э + \omega_м = 1/2\epsilon_0 E^2 + 1/2B^2/\mu_0.$$

Среднее значение плотности этой энергии:

$$\langle S \rangle = E_0 B_0 / 2\mu_0$$

(E_0 и B_0 — амплитудные значения полей). Величина $\langle S \rangle$ называется средним значением вектора Пойнтинга. Вектор S направлен в сторону распространения электромагнитной волны, а его модуль равен энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны. Вектор Пойнтинга можно записать с помощью векторного произведения: $S = E \times H$.

Если электромагнитные волны поглощаются или отражаются телами (эти явления подтверждены опытами Г. Герца), то из теории Максвелла следует, что электромагнитные волны должны оказывать на тела давление. Давление электромагнитных волн объясняется тем, что под действием электрического поля волны, заряженные частицы вещества, начинают упорядоченно двигаться и подвергаются со стороны магнитного поля волны действию сил Лоренца. Однако значение этого давления ничтожно. Можно оценить, что при средней мощности солнечного излучения, приходящего на Землю, давление для абсолютно поглощающей поверхности составляет примерно 5 мкПа.

Идеи о том, что свет оказывает давление, высказывались задолго до того, как была установлена электромагнитная природа света. Ее выдвигал еще И. Кеплер в 1619 году для объяснения поведения хвостов комет при пролете их вблизи Солнца. Теоретически величину светового давления определил в 1873 году Дж. Максвелл. Экспериментально световое давление впервые исследовал П. Н. Лебедев в 1899 году. В его опытах в вакуумированном сосуде на тонкой серебряной нити подвешивались крутильные весы, к коромыслам которых были прикреплены тонкие диски из слюды и различных металлов. Главная сложностью эксперимента заключалась в необходимости выделить световое давление на фоне радиометрических и конвективных сил (сил, обусловленных разностью температуры окружающего газа с освещенной и неосвещенной стороны). Кроме того, поскольку в то время не были разработаны вакуумные насосы, отличные от простых механических, Лебедев не имел возможности проводить свои опыты в условиях даже среднего, по современной классификации, вакуума. Путем попеременного облучения разных сторон крылышек Лебедев нивелировал радиометрические силы и получил удовлетворительное ($\pm 20\%$) совпадение с теорией Максвелла.

Позднее, в 1907–1910 гг., Лебедев провел более точные опыты по изучению давления света в газах и также получил приемлемый результат.

В книге «Давление света» английский физик Дж. Пойнтинг писал: «Когда мы наблюдаем, как плотина размывается во время шторма, нам легко верится, что морские волны производят давление на берег, о который они ударяются, но труд-

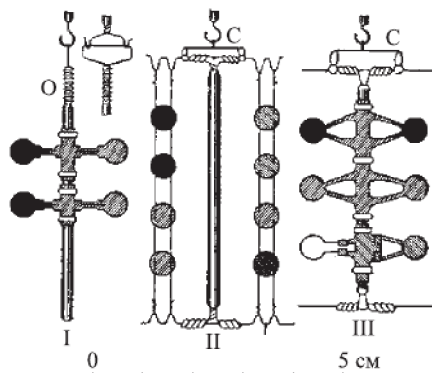


Рис. 26.16. Различные системы (I, II, III) крылышек в опыте Лебедева; О — платиновая петля, С — карданный подвес

но поверить, что микроскопические световые волны давят на всякий предмет, на который они падают, что зажженная лампа, например, посылает волны, производящие давление на сам источник света и на поверхность, которую они освещают. А между тем нам теперь достоверно известно, что свет производит подобного рода давление».

Опыты Лебедева окончательно подтвердили электромагнитную природу света и убедили всех ученых планеты в справедливости теории Максвелла. Эти опыты принесли Петру Николаевичу всемирную известность и славу выдающегося экспериментатора. Одному из видных физиков того времени Уильяму Томсону принадлежат слова: «Я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот Лебедев заставил меня сдаться перед его опытами».

В нашем путешествии по электричеству мы узнали очень много. Кажется, можно было бы и завершить этим наше путешествие. Но в действительности мы ничего не сказали о природе электричества — что собой представляет электрический ток. И именно здесь, в исследовании микроскопических явлений при прохождении тока через вещество, нас ждут удивительные открытия. Исследование прохождения тока через газы в новом свете представило старую идею о строении атома. К концу XIX столетия набралось много доказательств того, что атомы имеют более или менее сложное строение. К ним относятся результаты исследования электролиза, открытие электрона, наличие химического сродства — все они имели под собой какую-то глубокую основу. Настоящий прорыв в изучении атомов пришел со стороны изучения электрических явлений в газах. На протяжении всей второй половины XIX века физики активно изучали феномен так называемых катодных лучей. К концу 1880-х годов дискуссия о природе катодных лучей приняла острый полемический характер.

Невидимый мир физики

Вторжение в невидимый мир. Первые сомнения. На краю катастрофы. Внутренний мир атомов. По ту сторону кванта. Реализованная мечта алхимиков. В роe элементарных частиц. Ядерный синтез — путь к «энергетическому Эльдorado».

27. *Электрические явления в газах: катодные лучи. Элементарный электрический заряд. Опыты Фарадея. Открытие электрона. Опыты Дж. Дж. Томсона. Открытие рентгеновских лучей. Радиоактивность. Первые модели атома. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома.*

Примерно в середине XIX века Юлиус Плюккер (1801–1868), математик, работавший в области аналитической геометрии, неожиданно начинает с увлечением заниматься опытной физикой. Именно Плюккеру мы обязаны зрелищем игры цвета световых реклам. Это он изобрел в 1858 году светящиеся трубки, которые называли гейслеровыми, по имени знаменитого стеклодува Генриха Гейслера, который был техническим ассистентом Плюккера и научился особенно искусно их изготавливать.

Гейслеровы трубки — стеклянные трубки разнообразной формы, содержащие разреженные газы и служащие для изучения световых явлений, сопровождающих электрические разряды в разреженных средах. В противоположные концы трубок впаяны короткие платиновые проволоки, между внутренними концами которых и происходит разряд; наружные концы соединяются обычно с индукционной катушкой. Трубки бывают расширенные по концам и волосные посредине или имеют несколько широких и узких частей, перемежающихся между собой или же широких по всей длине, смотря по назначению.

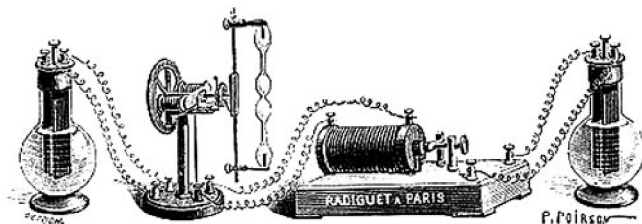


Рис. 27.1. Гейслеровы трубки

Затем, полвека спустя, их повсеместно называли трубками Крукса. Но не этим интересен Плюккер для физики. Плюккеру принадлежит открытие лучей, названных в дальнейшем катодными. Эти лучи исследователь обнаружил по зе-



Уильям Крукс
(1832–1919)

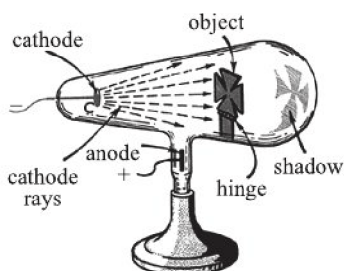


Рис. 27.2

чения принадлежат Иоганну Вильгельму Гитторфу (1824–1914). Он в 1869 году, получив в разрядной трубке вакуум со степенью разрежения ниже одного миллиметра, заметил, что темное катодное пространство быстро распространяется по всей поверхности трубки, вследствие чего стенки трубки начинают сильно флуоресцировать (светиться). Он также подметил, что свечения трубки смещаются под действием магнита. От катода к противоположному торцу трубки как будто шли какие-то лучи. Гитторф в 1876 году дал название открытому явлению *катодные лучи* (cathode rays) (возможно, название принадлежит ученику Плюккера Евгению (Ойгену) Гольдштейну (1850–1930)).

Природа катодных лучей вызывала много споров. Английский физик и химик Уильям Крукс (1832–1919) с помощью усовершенствованного вакуумного насоса достиг еще большего разрежения и обнаружил, что свечение исчезло, а стенки стеклянной трубки флуоресцируют зеленоватым светом. Крукс показал, что лучи испускает отрицательный электрод — катод (помещенный внутри трубки крестообразный предмет (hinge на рис. 27.2) отбрасывал тень на противоположную стенку) — и что лучи состоят из некоторой субстанции и несут отрицательный электрический заряд (ударяясь о лопасти легкого колесика, лучи приводили его во вращение, а пучок лучей отклонялся магнитом в сторону, соответствующую отрицательному заряду).

В 1878 году Крукс высказал гипотезу о том, что флуоресценцию вызывают лучи, когда ударяются о стеклянные стенки. Превосходный экспериментатор, он сконструировал несколько типов разрядных трубок. Это в значительной степени способствовало дальнейшему изучению свойств катодных лучей. Крукс ошибочно полагал, что наблюдаемые лучи могут быть «потокотом молекул», и даже предпочитал говорить о них как о «четвертом состоянии вещества». Несмотря на ошибочность таких взглядов, исследования Крукса послужили основой для всей последующей работы по изучению плазмы.

Подавляющее большинство видных ученых немецкой школы придерживались мнения, что катодные лучи представляют собой, подобно свету, волновые возмущения невидимого эфира. В Англии же придерживались мнения, что катодные лучи состоят из ионизированных молекул или атомов самого газа. У каждой из сторон имелись веские доказательства в пользу своей гипотезы. Сторонники молекулярной гипотезы справедливо указывали на тот факт, что катодные лучи отклоняются под воздействием магнитного поля, в то время как на световые лучи магнитное поле никак не воздействует. Следовательно, они состоят из заряженных частиц. С другой стороны, сторонники корпускулярной гипотезы ни-

леноватому свечению стекла части трубки, расположенной напротив катода (cathode) (электрод некоторого прибора, присоединенный к отрицательному полюсу источника тока). На самом деле Плюккер только заметил это свечение и обнаружил, что светящаяся область перемещается под влиянием магнитного поля. Дальнейшие успехи в исследовании обнаруженного све-

как не могли объяснить ряда явлений, в частности обнаруженного в 1892 году эффекта практически беспрепятственного прохождения катодных лучей через тонкую алюминиевую фольгу. Наконец, в 1897 году молодой английский физик Дж. Дж. Томсон положил конец этим спорам раз и навсегда, а заодно прославился в веках как первооткрыватель электрона. Но здесь нам придется вернуться немного назад во времени.

Гипотеза о существовании элементарного электрического заряда.

Еще на заре изучения электрических явлений ученые заметили, что ток могут проводить не только металлы, но и растворы. Но не всякие. Так, водные растворы поваренной соли и других солей, растворы сильных кислот и щелочей хорошо проводят ток. Растворы уксусной кислоты, углекислого и сернистого газа проводят его намного хуже. А вот растворы спирта, сахара и большинства других органических соединений вообще не проводят электрический ток. Майкл Фарадей в 30-е годы XIX века, изучая закономерности прохождения электрического тока через растворы, ввел термины «электролит», «электролиз», «ион», «катион», «анион». Электролит — вещество, раствор которого проводит электрический ток. Происходит это в результате движения в растворе заряженных частиц — ионов.

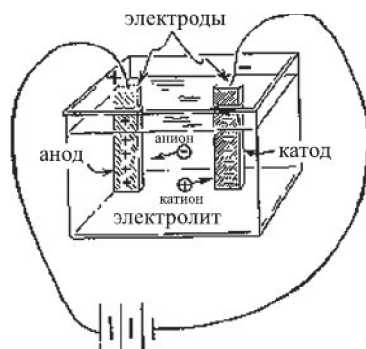


Рис. 27.3. Схема, с помощью которой Фарадей объяснял электролитический процесс

Опыты Фарадея показали, что для разных электролитов электрохимический эквивалент k вещества — количество вещества, которое должно выделиться на электроде, при прохождении через электролит единицы количества электричества — оказывается различным, но, чтобы выделить на электроде один моль любого одновалентного вещества, требуется пропустить один и тот же заряд F , равный примерно $9,6 \cdot 10^4$ Кл. Более точное значение этой величины, называемой постоянной Фарадея, равно $F = 96\,485$ Кл \cdot моль $^{-1}$. Если 1 моль ионов при пропускании электрического тока через раствор электролита переносит электрический заряд, равный постоянной Фарадея F , то на долю каждого иона приходится электрический заряд, равный $e = F/N_A = 96\,000$ Кл \cdot моль $^{-1}/6 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1} \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

На основании такого расчета ирландский физик Д. Стоней (иногда пишут «Стони») (1826–1911) высказал предположение о существовании внутри атомов элементарных электрических зарядов. В 1874 году на заседании Британской ассоциации он обратил внимание на существование в природе трех «естественных единиц»: скорости света, постоянной тяготения и заряда «электрического атома». По поводу этой последней единицы Стоней сказал: «Наконец природа одарила нас в явлениях электролиза вполне определенным количеством электричества, не зависимым от тел, с которыми оно связано».



Рис. 27.4. Джордж Джонстон Стоней

Стоней дал оценку этого заряда, разделив количество электричества, выделяемое при разложении кубического сантиметра водорода, на число его атомов по тогдашним данным, и получил значение порядка 10^{-20} электромагнитных единиц (В настоящее время величина заряда электрона принимается равной $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Этот электрический атом Стоней в 1891 году предложил назвать электроном.

Еще в годы работы с электролитами (в 1834 году) Фарадей сделал первый шаг к абсолютным измерениям. В седьмой серии «Экспериментальных исследований по электричеству» он описывает «новый прибор для измерения гальванического электричества». Он называет его вольт-электрометром (название это сохранилось до наших дней в сокращении — вольтметр). Это стеклянная трубка с электродами, наполненная подкисленной водой. При прохождении тока на электродах выделяются водород и кислород. Множеством опытов Фарадей установил, что «одно и то же количество электричества во всех растворах разлагает в точности одно и то же количество воды». Отсюда идея абсолютных измерений: заряд, прошедший по цепи, определяется массой выделившихся газов. Прибор легко проградуйровать. Фарадей предложил абсолютную единицу измерения — градус электричества. Это количество электричества, при прохождении которого через вольтметр выделяется $0,164 \text{ см}^3$ водорода (это около 0,7 Кл). Интересна причина введения термина: «Я, не колеблясь, ввел термин «градус» по аналогии с применением его по отношению к другому весьма важному невесомому агенту, а именно к теплу; и подобно тому, как там использовано определение расширения воздуха, воды, ртути и т. п. для измерения тепла, так и здесь столь же деление газов служит для той же цели в отношении электричества».

Установление закона электролиза еще не доказало строго, что в природе существуют элементарные электрические заряды. Можно, например, предположить, что все одновалентные ионы имеют различные электрические заряды, но их среднее значение равно элементарному заряду e .

На огромную важность понимания природы электрона указывал Уильям Томсон: «Скажите мне, что такое электричество, и я объясню вам все остальное». Для того чтобы выяснить, существует ли в природе элементарный заряд, необходимо было измерить не суммарное количество электричества, переносимое большим числом ионов, а заряды отдельных ионов. Неясным был и вопрос о том, обязательно ли заряд связан с частицами вещества и, если связан, с какими именно.

Открытие электрона. Электрон своим открытием обязан исследованию катодных лучей. Простейший аппарат, в котором они наблюдались, представлял собой герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом, в которую с двух сторон было впаяно по электроду: с одной стороны — катод, подключающийся к отрицательному полюсу электрической батареи; с другой — анод, подключающийся к положительному полюсу. В 1895 году французский физик Жан Перрен экспериментально доказал: заряд катодных лучей отрицателен, они движутся прямолинейно, но могут отклоняться магнитным полем. С 1895 года Джозеф Джон Томсон (1856–1940) в Кавендишской лаборатории начинает методическое количественное изучение отклонения катодных лучей в электрических и магнитных полях. 29 апреля 1897 года он сделал свое знаме-

нитое сообщение на заседании Лондонского королевского общества. Итоги своей работы были опубликованы им в октябре того же года в октябрьском номере журнала «Philosophical Magazine».

Опыт Томсона заключался в изучении пучков катодных лучей, проходящих через систему параллельных металлических пластин, создававших электрическое поле, и систему катушек, создававших магнитное поле. В своем опыте Томсон использовал усовершенствованную катодно-лучевую трубку, конструкция которой была дополнена электрическими катушками, создававшими (согласно закону Ампера) внутри трубки магнитное поле, и набором параллельных электрических конденсаторных пластин, создававших внутри трубки электрическое поле (рис. 27.5).

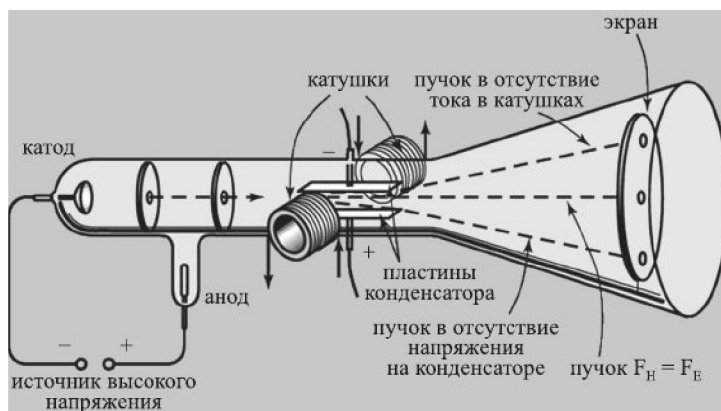


Рис. 27.5. Схема экспериментальной установки

Благодаря этому появилась возможность исследовать поведение катодных лучей под воздействием и магнитного, и электрического полей. Эти лучи отклонялись при действии отдельно обоих полей, а при определенном соотношении между ними пучки не изменяли прямой траектории. Это соотношение полей зависело от скорости частиц. Проведя ряд измерений, Томсон выяснил, что скорость движения частиц гораздо ниже скорости света; таким образом, было показано, что частицы должны обладать массой. Томсон измерил удельный заряд e/m (т. е. отношение заряда к массе) катодно-лучевых частиц — «корпускул», как он их называл, — по отклонению катодных лучей в электрическом и магнитном полях.

Метод, предложенный Томсоном, был весьма прост. Сначала пучок катодных лучей отклонялся с помощью электрического поля, а затем с помощью магнитного поля он отклонялся на равную величину в противоположную сторону, так что в итоге пучок вновь выпрямлялся. При использовании такой экспериментальной методики стало возможным вывести простые уравнения, из которых, зная напряженности двух полей, легко определить как скорость v , так и отношение e/m . Электроны вылетали из катода под действием высоковольтного разряда в трубке. Через диафрагмы D и E проходили только те из них, что летели вдоль оси трубки. Электрическая сила F_E , действующая на заряд e со стороны электрического поля E , дается выражением $F_E = eE$.

Сила F_H , действующая со стороны магнитного поля H , пропорциональна напряженности поля, скорости частицы v и ее заряду e и скорости частицы v ($F_H = Hev$). Томсон установил, что эта скорость зависит от напряжения на трубке V и что кинетическая энергия электронов $mv^2/2$ прямо пропорциональна этому напряжению, т. е. $mv^2/2 = eV$. (Отсюда термин «электрон-вольт» для энергии, приобретаемой частицей с зарядом, равным заряду электрона при ускорении разностью потенциалов 1 В.) Комбинируя это уравнение с выражением для скорости электрона, он нашел отношение заряда к массе: $e/m = 1/2(E/H)^2(1/v)$.

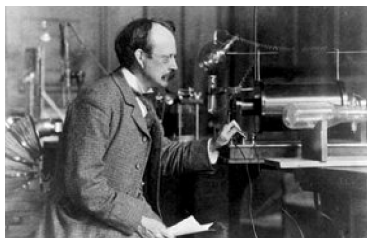


Рис. 27.6. Дж. Дж. Томсон в 1890 году в своей лаборатории (фотография из архива Кавендишской лаборатории, опубликованная в *European Journal of Physics*, V. 18, P. 131)

Из сопоставления полученного числа с известным в то время удельным зарядом одновалентного иона водорода, путем косвенных рассуждений, он пришел к выводу, что масса этих частиц значительно меньше (более чем в тысячу раз) массы самого легкого иона водорода. В том же 1897 году он выдвинул гипотезу, что электроны являются составной частью атомов, а катодные лучи — это не атомы или не электромагнитное излучение, как считали некоторые исследователи свойств лучей. Результатом опытов Томсон явилась гипотеза о существовании материи в состоянии еще более тонкого дробления, чем атомы.

Мысль Томсона о катодно-лучевых корpusкулах как об основных компонентах атома не была встречена с большим энтузиазмом. Истинная роль томсоновских корpusкул в структуре атома могла быть понята в сочетании с результатами других исследований, в частности с результатами анализа спектров и изучения радиоактивности (об этом будет рассказано далее).

В течение последующих двух лет выяснили: скорость корpusкул Томсона равна примерно одной десятой скорости света, то есть примерно в 10 000 раз больше скорости ружейной пули и скорости теплового движения атомов. Кроме того, эти и все остальные свойства лучей не зависят от состава газа в трубке. А это означало, что катодные частицы — неременная составная часть всех атомов. В итоге физики пришли к выводу: *катодные лучи — поток электронов, излучаемых катодом*. Первые оценки заряда частиц в катодных лучах были сделаны позже Дж. Дж. Томсоном.

Эксперименты Томсона показали, что электроны в электрических разрядах могут возникать из любого вещества. Поскольку все электроны одинаковы, элементы должны различаться лишь числом электронов. Кроме того, малая величина массы электронов указывала на то, что масса атома сосредоточена не в них. Стало ясно, что электроны обязаны существовать в составе атомов. Иначе откуда бы они взялись? Томсон полагал, что все частицы, образующие катодные лучи, тождественны друг другу и входят в состав вещества.

30 апреля 1897 года — дата доклада Томсоном полученных им результатов на заседании Лондонского королевского общества — считается днем рождения электрона. И в этот день отошло в прошлое представление о «неделимости» атомов: открытие электрона заложило основу современной модели атома.

После открытия электрона ученые прекрасно осознали, что эта частица является фундаментальной составляющей всего материального мира.

Итак, существование электрона было установлено. Однако не было ни одного опыта, в котором участвовали бы отдельные электроны. А некоторые ученые вообще относились к существованию электрона весьма скептически. Так, В. Рентген до 1906–1907 гг. требовал, чтобы слово «электрон» не произносилось в физическом институте Мюнхенского университета. Рентген считал его недоказанной гипотезой, применяемой часто без достаточных оснований и без нужды (из воспоминаний А. Ф. Иоффе). Соответственно, встал вопрос об изучении и измерении свойств отдельного электрона. Первое прецизионное измерение электрического заряда электрона — заслуга Роберта Милликена (1868–1953). В опыте Милликена крошечные капли масла, несущие электрический заряд, опускались под действием силы тяжести в пространстве между двумя параллельными горизонтальными пластинами, подключенными к мощной электрической батарее. Напряженность электрического поля E между пластинами подбиралась такой, чтобы капля зависала в воздухе; сила тяжести mg , направленная вниз, компенсируется направленной вверх силой со стороны электрического поля. Масса капли определялась путем измерения установившейся скорости падения капли V в воздухе в отсутствие поля с помощью формулы Стокса:

$$F_{ct} = -bv,$$

где b — подвижность, изменяющаяся с радиусом капли линейно ($b = 6\pi \cdot \eta \cdot r$) и определяющаяся вязкостью (η) воздуха и радиусом капли (r).

После этого он распылил аэрозоль в присутствии электростатического поля, то есть при подключенной батарее. В этом случае масляные капли электризовались и оставались в подвешенном состоянии достаточно долго, поскольку силы гравитационного притяжения Земли уравнивались силами электростатического отталкивания между каплями аэрозоля. Из-за микроскопического размера масляных капель в камере они не могут получить большого заряда, а величина заряда капель будет кратна единичному заряду электрона. Значит, постепенно понижая внешнее напряжение, мы будем наблюдать, как капли масла периодически «выпадают в осадок», и по градациям шкалы напряжения, при которых осаждается очередная порция аэрозоля, мы можем судить об абсолютной величине единичного заряда, поскольку дробного заряда наэлектризованные капли нести на себе не могут. Кроме того, Милликен облучал масляную взвесь рентгеновскими лучами и дополнительно ионизировал ее органические молекулы, чтобы

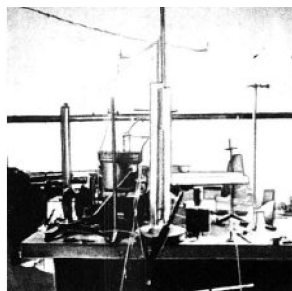


Рис. 27.7. Установка Милликена для измерения заряда электрона (Митчел Уилсон. «Американские ученые и изобретатели»)

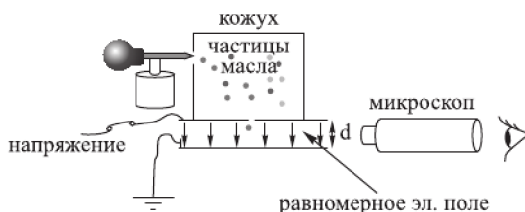


Рис. 27.8. Схема опыта Р. Милликена (Википедия)

повысить их электризацию и продлить время экспериментального наблюдения, одновременно повышая напряжение в камере, и делал так многократно для уточнения полученных данных. «Я наблюдал при помощи моего короткофокусного телескопа за поведением этих находящихся в равновесии капелек в электрическом поле. Некоторые из них начинали медленно двигаться вниз, а затем, постепенно теряя вес в результате испарения, останавливались... поворачивались... и медленно начинали двигаться вверх, так как сила тяжести все уменьшалась вследствие испарения... Если электрическое поле внезапно исчезало, все находящиеся в равновесии капельки, похожие на звездочки на темном поле, начинали падать — одни медленно, другие гораздо быстрее. Эти последние капельки оказались во взвешенном состоянии потому, что они несли на себе два, три, четыре, пять и больше электронов вместо одного... Это было наконец первое отчетливое, ясное и недвусмысленное доказательство того, что электричество определенно едино по структуре».

Наконец, накопив достаточно экспериментальных данных для статистической обработки, Милликен вычислил величину единичного заряда и опубликовал полученные результаты, которые содержали максимально точно для тех лет рассчитанный заряд электрона. Им была получена величина единичного электрического заряда: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ К. Опыт Милликена был крайне трудоемок, потому что необходимо было учитывать различные дополнительные факторы, в частности, постоянно измерять и учитывать влажность воздуха и атмосферное давление — и так на протяжении всех пяти лет непрерывного наблюдения за своей установкой. Наградой за титанический труд стала Нобелевская премия по физике за 1923 год, присужденная Милликену за публикацию 1913 года. Но в нашем путешествии мы зашли немного вперед, опередив события. Но сделали это для того, чтобы завершить тему электрона в одном месте.

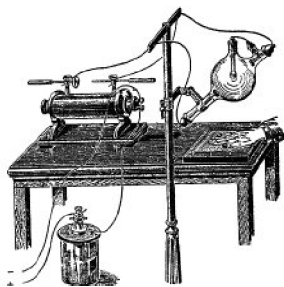


Рис. 27.9. Аппаратура В. К. Рентгена, с помощью которой он в 1895 году сделал первый снимок руки в икс-лучах (из статьи В. З. Азерникова «Физика. Великие открытия», coollib.com)

Рентгеновские лучи. Конец девятнадцатого века был богат на открытия разного рода излучений. Для понимания строения атома большое значение имело открытие Рентгеном так называемых X-лучей. Открытие В. Рентгеном лучей, названных впоследствии его именем, произошло в 1895 году. Он был первым, кто опубликовал статью о рентгеновских лучах, которые он назвал икс-лучами (X-ray). Статья Рентгена под названием «О новом типе лучей» была опубликована 28-го декабря 1895 года в журнале Вюцбургского физико-медицинского общества. В ней, в частности, говорилось: «Вскоре мы обнаружили, что все тела прозрачны для этих лучей, хотя и в весьма различной степени». Для своего эксперимента Рентген использовал приборы, которыми пользовались физики того времени в своих лабораториях: искровой индуктор с прерывателем, газоразрядную трубку и флуоресцирующий экран. Вечером 8 ноября 1895 года физик обернул вакуумную трубку светонепроницаемой черной бумагой, которая задерживала все видимые и ультрафиолетовые лучи. Когда он включил ток высокого напряжения

в затемненном помещении, то заметил странную вспышку маленьких флуоресцирующих кристаллов, лежавших на лабораторном столе. Бумажная ширма, которая была покрыта платиносинеродистым барием, также засияла бледно-зеленым светом. Когда Рентген поместил между трубкой и ширмой несколько предметов, оказавшихся под рукой (книгу, кусок листового алюминия, разновесы в деревянном ящике и другие вещи), он с удивлением установил, что все эти вещества пронизываются лучами более или менее сильно. Теневые изображения различных вещей обозначались на экране. Но самые волнующие минуты этой памятной ноябрьской ночи, возможно, наступили тогда, когда физик увидел скелет своей руки, которую он держал между разрядным аппаратом и световым экраном.

Брошюра с сообщением в Вюрцбургском физико-медицинском обществе под заголовком «Новый род лучей» за несколько недель была издана пять раз. Она была переведена также на английский, французский, итальянский и русский языки.

Катодная трубка, благодаря которой Рентген открыл свои X-лучи, в сущности, была достаточно простым устройством. Это стеклянный (или металлический с окошком) баллон, из которого откачан воздух (рис. 27.10). Внутри откачанного объема расположены два электрода (анод и катод), на которые подается высокое напряжение. Катод служит источником электронов, а анод (его часто называют антикатодом) является источником рентгеновских лучей.

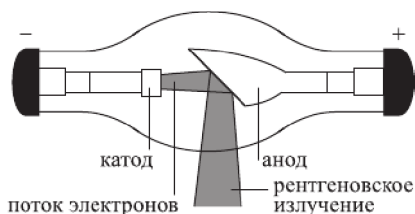


Рис. 27.10. Схематическое изображение рентгеновской трубки

Антикатод срезается под углом примерно в 45° к оси трубки, поэтому рентгеновское излучение распространяется в направлении нормали к оси трубки.

Электрическое поле, создаваемое высоким напряжением, разгоняет электроны. Для получения электронов столь высоких энергий в трубке создается вакуум на уровне 10^{-6} мм рт. ст.

Физика газового разряда тогда не была еще разработана, и природа новых лучей по-прежнему оставалась загадочной. Но природа X-лучей, открытых Рентгеном, была объяснена еще при его жизни. Это произошло в 1912 году, когда Лауэ, Фридрих и Книппинг раскрыли тайну их природы. Лучи оказались электромагнитными колебаниями, как и видимый свет, но с частотой колебаний во много тысяч раз большей и с соответственно меньшей длиной волны: от $3 \cdot 10^{16}$ до $6 \cdot 10^{19}$ Гц и длиной волны 0,005–10 нм (общепризнанного определения нижней границы диапазона рентгеновских лучей в шкале длин волн не существует). Рентгеновские лучи образуются путем преобразования энергии при столкновении катодных лучей со стенкой трубки, причем безразлично, состоит ли она из стекла или металла, и распространяются во все стороны со скоростью света.



Рис. 27.11. Вильгельм Конрад Рентген (1845–1923)

Распространение публикации Рентгена и его фотографий вызвало огромную сенсацию, которой не случалось в истории естествознания со времени сообщения

Галилея об открытии спутников Юпитера. Опыты Рентгена проверялись во многих лабораториях мира, а сам открыватель лучей приобрел небывалую популярность. В 1896 году вышло более 50 книг и 1000 статей, посвященных открытию Рентгена. Повсюду говорили о новых лучах. При этом было и много курьезов: газеты сообщали о чудесах превращения с помощью таинственных лучей свинца в золото, о возможности узнать чужие мысли, подсмотреть, что скрывается за стенами, в сейфах и под платьем ничего не подозревающей собеседницы, о вложении в мозг студентов без особого труда знаний, если страницу учебника спроецировать на голову учащегося и т. д. и т. п.



Рис. 27.12. Рентгеновский снимок руки Джеймса Франка с пометками лечащего врача, 7 апреля 1896 г.



Рис. 27.13. На фотографии 1897 года французский таможенник просматривает содержимое чемодана, помещенного между источником рентгеновского излучения и прибором, который он держит в руках и внутри которого экран, светящийся под действием рентгеновских лучей (фото из книги И. А. Леенсона «Удивительная химия»)

Весной 1896 года Джеймс, играя со старшим братом, сломал руку. Его лечили врачи, но полное выздоровление не наступало. Незадолго до этого Джеймс узнал из газет, что вюрцбургский профессор Вильгельм Конрад Рентген открыл в 1895 году лучи, позволяющие просвечивать человеческое тело и делать снимки, на которых видны кости. Ничего не сказав своим родителям, тринадцатилетний Джеймс пошел в Государственную физическую лабораторию, в которой, как он слышал, проводятся разные научные эксперименты. В это время физик Б. Вальтер как раз собрал установку, чтобы повторить классический опыт профессора Рентгена. Все было готово, и Джеймсу только оставалось положить руку на толстую фотопластинку и на секунду задержать дыхание. На снимке отчетливо видно, что кость предплечья сломалась неправильно, врачи должны были снова ее сломать, после чего лечение закончилось без осложнений. В этой истории поражает не только скорость внедрения научного открытия в медицинскую практику — от научного эксперимента Рентгена до рентгеновского снимка в медицинских целях прошел всего год, но и решительность мальчика, готового на себе испытать достижения научно-технического прогресса. Этим мальчиком был будущий физик Джеймс Франк, ровесник Борна (Журнал «Семь искусств». 12 (48). Декабрь, 2013).

Новые лучи не просто ознаменовали еще один новый этап в развитии физики, они существенным образом повлияли на психологию людей: стало доступным то, что извечно было недостижимо — возможность видеть человека насквозь.

Открытие Рентгена произвело переворот в физической науке.

Правда, печальны были последние годы открывателя X-лучей. В конце жизни самым близким другом семьи Рентгенов был его ученик, русский физик А. Иоффе, который, не взирая ни на какую смуту вокруг имени Рентгена, всячески помогал своему учителю. В это время Рентгену было уже 74 года. А. Ф. Иоффе, работавший с Рентгеном, вспоминает, что Рентген сильно похудел. Именно Иоффе нашел деньги на визит к врачу. Был обнаружен рак толстой кишки. Больного можно было спасти, но по иронии судь-

бы он ожидал две недели в очереди на... рентгеновское исследование в одной из поликлиник. Когда он наконец добрался до кабинета, врач, проводивший исследование, решил проявить осведомленность и спросил: «А вы знаете, что вы однофамилец того самого человека, который изобрел этот чудесный прибор?» На что Рентген пожал плечами: «Быть однофамильцем самому себе? Это что-то новенькое...» Врач был просто ошарашен. Денег за снимок он, естественно, не взял. Он просто не узнал больного, хотя и посещал когда-то его лекции. И не мудрено — только за две недели из-за рака толстой кишки знаменитый Рентген потерял в весе порядка 20 кг!

Умер Рентген десятого февраля 1923 года в Мюнхене.

Наряду со своим воздействием на технику и медицину рентгеновское излучение имело глубочайшие теоретические последствия. Несмотря на огромный интерес к открытию Рентгена, прошло почти десять лет, чтобы в знаниях об X-лучах добавилось что-то новое. Только в 1906 году английский физик Чарльз Гловер Баркла (1877–1944), работавший вместе с Дж. Дж. Томсоном в Кавендишской лаборатории, осуществивший поляризацию рентгеновских лучей (1906 г.), обнаружил, что при воздействии потока рентгеновского излучения высокой энергии на вещество возникает вторичное флуоресцентное рентгеновское излучение. Это излучение характерно для исследуемого элемента, оно получило название «характеристическое излучение». После открытия характеристического излучения Г. Мозли в серии своих экспериментов (1913) измерил длины волн первичного характеристического излучения, полученных электронной бомбардировкой различных элементов, и вывел соотношение между длиной волны и атомным номером.

В 1912 году Макс Лауэ и П. Книппинг открыли явление дифракции рентгеновских лучей при прохождении через кристаллы, что окончательно подтвердило их электромагнитную природу. Эти эксперименты, а также изобретение в 1913 году Г. Брэггом рентгеновского спектрометра заложили основу для спектроскопического рентгеновского анализа: рентгеновская спектроскопия оказалась весьма важным инструментом для понимания структуры атома. Эйнштейн писал: «Лауэ прислал мне фотографию его явления дифракции рентгеновских лучей. Это самое удивительное, что я когда-либо видел. Дифракция на отдельных молекулах, позволяющая обнаружить их расположение».

Каждое пятно представляет собой след рентгеновского дифракционного отражения. Диффузные радиальные пятна в центре вызваны рассеянием рентгеновских лучей на тепловых колебаниях кристаллической решетки.

Вскоре началось интенсивное изучение разнообразных кристаллических структур. На основе дифракционных картин, снятых под различными углами и дополненных расчетом, удалось установить форму элементарных ячеек, которые заполняют пространство кристалла. Накопленные результаты позволили создать общую картину, описывающую строение кристаллов.

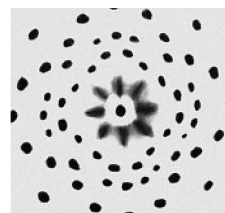


Рис. 27.14. Лауэ-грамма монокристалла NaCl

Радиоактивность. После открытия Рентгеном X-лучей началась повальная лихорадка «открывательства» лучей. Большинство этих «открытий» оказались самообманом, а то и преднамеренным обманом (см. «На кого упало яблоко»).

Еще в январе 1896 года известный математик и физик Анри Пуанкаре на заседании Парижской академии наук сообщил о рентгеновских лучах. При этом он показал фотографии, полученные от Рентгена. В своем докладе Пуанкаре поставил вопрос, который занимал и других физиков: не испускают ли почти все флуоресцирующие (нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии возбуждения) вещества под воздействием солнечного света определенные лучи, подобные рентгеновским? Среди участников заседания был Анри Беккерель, профессор Высшей технической школы в Париже, который взялся за проверку высказанной А. Пуанкаре гипотезы. И уже 1 марта 1896 года



Рис. 27.15. Антуан Анри Беккерель

Антуан Анри Беккерель (1852–1908) сделал важное открытие. В Музее естественной истории, где работал Беккерель, были все условия для проверки этого предположения. Среди ряда фосфоресцирующих веществ (фосфоресценция — один из видов фотолуминесценции) он использовал гидратированный сульфат уранила и калия $K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$. При облучении этой соли солнечным светом А. А. Беккерель ожидал появления Х-лучей. Для их регистрации он размещал кристаллы урановой соли на фотопластинках, завернутых для защиты от света в плотную черную бумагу. Было установлено, что пластинки подвергались засвечиванию.

Казалось, что подтверждается гипотеза о том, что фосфоресценция, вызванная солнечным светом, сопровождается Х-излучением. Однако, проявив пластинки, на которых лежали кристаллы урановой соли, не подвергавшиеся действию света, он получил тот же самый результат. Исследователь не сразу понял, что проникающая радиация связана с природой урана. Однако вскоре укрепился в этом мнении. Беккерель установил, что интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит. То есть это свойство присуще не соединениям, а химическому элементу — урану.

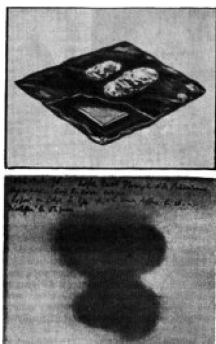


Рис. 27.16. Опыт Беккереля

Открытие первоначально, как это нередко бывает, не произвело на физиков должного впечатления. Но благодаря исследованиям супругов Кюри, с которыми Беккерель сотрудничал, и вниманию к его работам Э. Резерфорда интерес к этому открытию значительно вырос. Так, открытием Беккереля заинтересовался ряд выдающихся ученых, в том числе Анри Пуанкаре, а Д. И. Менделеев специально приехал в Париж, чтобы познакомиться с работами и автором этого открытия. В 1898 году Мари Кюри и Пьер Кюри обнаружили радиоактивность тория, позднее ими были открыты радиоактивные элементы полоний и радий. Новое явление по предложению супругов Кюри получило название *радиоактивность* (что означает «способные испускать лучи»), а вещества, испускающие эти лучи, — радиоактивными.

Активность нового элемента — полония — оказалась в 400 раз выше активности урана. Открытием полония и радия начинается новый этап в истории радиоактивности. Правда, Беккерелю пришлось «поплатиться» за свое открытие. Как-то для публичной лекции Беккерелю понадобилось радиоактивное вещество,

он взял его у супругов Кюри и пробирку положил в жилетный карман. Прочтя лекцию, он вернул владельцам радиоактивный препарат, а на следующий день обнаружил на теле под жилетным карманом покраснение кожи в форме пробирки. Беккерель рассказывает об этом Пьеру Кюри, тот ставит на себе опыт: в течение десяти часов носит привязанную к предплечью пробирку с радием. Через несколько дней у него тоже наблюдается покраснение, перешедшее затем в тяжелейшую язву, от которой он страдал в течение двух месяцев. Так впервые было открыто биологическое действие радиоактивности. Но больше всего пострадала от радиоактивности Мария Склодовская-Кюри. Вся ее жизнь — это подвиг, беззаветный труд во имя науки. Не имея никакой лаборатории и работая в сарае во дворе школы на улице Ломон в Париже, с 1898 по 1902 годы Мария и Пьер Кюри переработали восемь тонн руды урана и выделили одну сотую грамма нового вещества — радия.

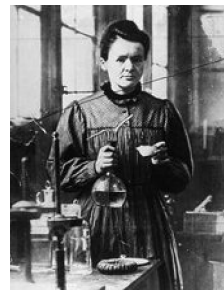


Рис. 27.17. Мария Склодовская-Кюри

Позже был открыт упомянутый выше полоний — элемент, названный в честь родины Марии Кюри. Научный мир с нетерпением ожидал каждую новую статью о радиоактивности, подписанную М. и П. Кюри, каждая из них несла крупицу новой истины.

Анализируя проникающую способность радиоактивного излучения урана, Э. Резерфорд в 1899 году экспериментально установил, что соли урана испускают лучи двух типов, которые по-разному отклоняются в магнитном поле: менее проникающую, названную α -излучением, и более проникающую, названную β -излучением. Лучи первого типа отклоняются так же, как поток положительно заряженных частиц; их назвали альфа-лучами; лучи второго типа обычно отклоняются в магнитном поле так же, как поток отрицательно заряженных частиц, их назвали бета-лучами.

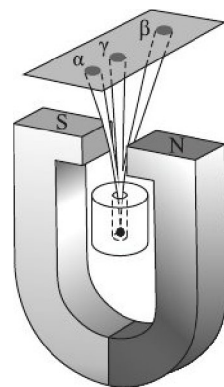


Рис. 27.18. Три составляющие радиоактивного распада

Третья составляющая урановой радиации, самая проникающая из всех (не отклонялась магнитным полем), была открыта позже, в 1900 году, Полем Виллардом (1860–1934) и названа по аналогии с резерфордовским рядом γ -излучением. Резерфорд и его сотрудники показали, что радиоактивность связана с распадом атомов (значительно позже стало ясно, что речь идет о распаде атомных ядер), сопровождающимся выбросом из них определенного типа излучений. Этот вывод нанес сокрушительный удар по господствовавшей в физике и химии концепции неделимости атомов.

В 1903 году два английских ученых, У. Рамзай и Ф. Содди, доказывают, что радий непрерывно выделяет небольшое количество газа — гелия. Это был первый пример ядерного превращения. Немного позже, и опять в Англии, Резерфорд и Содди, исходя из гипотезы, высказанной Склодовской-Кюри, публикуют замечательную статью «Теорию радиоактивных превращений». Они утверждают, что радиоактивные элементы, даже когда они кажутся неизменными, находятся в состоянии самопроизвольного распада: чем быстрее процесс их превращения, тем больше их активность. В своих работах исследователи пришли к выводу

о возможности превращения одних химических элементов в другие. Открытие эманации радия окончательно подтверждало теорию радиоактивного распада. Подробнее об этом мы поговорим в дальнейшем.

Модели атома. Атомные спектры. То, что атом имеет сложное строение и в его составе есть частицы, имеющие положительный и отрицательный заряд, к концу XIX века было уже известно. Но внутреннее строение атома по-прежнему оставалось загадкой.

Вначале загадку пытались разгадать путем построения моделей на основе представлений классической электродинамики и механики. В 1904 году появились публикации о строении атома, одна из которых принадлежала английскому физику Дж. Томсону, другая — японскому физику Хантаро Нагаока.

Дж. Томсон стремился найти модель, которая позволила бы объяснить все его известные свойства. В атоме Томсона положительное электричество «размазано» по сфере, в которую вкраплены, как изюм в пудинг, электроны. Так, в простейшем атоме водорода электрон находится в центре положительно заряженной сферы. При смещении из центра на электрон действует квазиупругая сила электростатического притяжения, под действием которой электрон совершает колебания (как и в аналоге — гармоническом осцилляторе). Частота этих колебаний определяется радиусом сферы, зарядом и массой электрона, и если радиус сферы имеет порядок радиуса атома, частота этих колебаний совпадает с частотой колебания спектральной линии атома. Согласно максвелловской электродинамике ускоренно движущийся заряд излучает энергию. В многоэлектронных атомах электроны располагаются по устойчивым конфигурациям, рассчитанным Томсоном.

Электроны удерживаются внутри положительно заряженной сферы упругими силами. Те из них, которые находятся на поверхности, могут довольно легко «выбиваться», оставляя ионизованный атом. Как видим, всё в рамках ньютоновской механики плюс максвелловская электродинамика.

Томсон считал каждую такую конфигурацию определяющей химические свойства атомов. *«Мы предполагаем, что атом состоит из некоторого числа [отрицательных] корпускул, движущихся внутри сферы с однородной положительной электризацией... Корпускулы располагаются по ряду concentрических оболочек. Постепенное изменение свойств, которое имеет место при перемещении вдоль горизонтальных рядов [периодической] системы элементов, иллюстрируется свойствами, которыми обладают эти группы корпускул.»*



Рис. 27.19. Атом согласно модели Томсона («пудинговая» модель)

Он предпринял попытку теоретически объяснить периодическую систему элементов Д. И. Менделеева. Эту попытку Бор позднее назвал «знаменитой» и указал, что со времени этой попытки «идея о разделении электронов в атоме на группы сделалась исходным пунктом и более новых воззрений». И хотя теория Томсона оказалась несовместимой с опытными фактами, Бор тем не менее считал, что эта теория «содержит много оригинальных мыслей и оказала большое влияние на развитие атомной теории».

В модели Томсона используется сфера, так что мировоззрения пифагорейцев по-прежнему, может быть и неосознанно, но продолжало оказывать влияние на умы ученых.

Японский физик Хентаро Нагаока (1865–1950) в 1904 году выдвинул гипотезу о том, что атом состоит из тяжелого положительно заряженного ядра, окруженного кольцами из большого числа электронов, колебания которых и являются причиной испускания атомных спектров. Нагаока исходил из исследований Максвелла об устойчивости колец Сатурна и представил строение атома аналогичным строению Солнечной системы: роль Солнца играет положительно заряженная центральная часть атома, вокруг которой по установленным кольцеобразным орбитам движутся «планеты» — электроны. При незначительных смещениях электроны возбуждают электромагнитные волны, периоды которых, по расчетам Нагаоки, того же порядка, что и частоты спектральных линий некоторых элементов. Отчетливо видно, как эта модель созвучна с картиной мироздания, восходящей еще ко временам Античности (ср. модель Солнечной системы Аристарха Самосского).

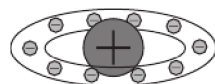


Рис. 27.20. Модель атома Х. Нагаока

Однако новые опытные факты опровергли модели Нагаоки и Томсона.

Атомные спектры. Нагретые тела испускают свет, потому что это позволяет им избавиться от избытка энергии. Привычный нам дневной свет испускается поверхностью Солнца, разогретой до $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точно так же другие элементы в сильно разогретом состоянии могут испускать свет, который можно разложить на составляющие его волны с помощью спектрометра.

Изолированные атомы в виде разреженного газа или паров металлов испускают спектр, состоящий из отдельных спектральных линий. *Атомные спектры* — это оптические спектры, получающиеся при испускании или поглощении света (электромагнитных волн) свободными или слабо связанными атомами; такими спектрами обладают, в частности, одноатомные газы и пары. Атомные спектры являются линейчатыми, они состоят из отдельных спектральных линий, которые характеризуются определенной длиной волны и для простых атомов группируются в спектральные серии. Атомные спектры наблюдаются в виде ярких цветных линий при свечении газов или паров в электрической дуге или разряде (спектры испускания) и в виде темных линий (спектров поглощения). Изучение атомных спектров послужило ключом к познанию строения атомов. Подробное изучение атомных спектров началось с водорода.

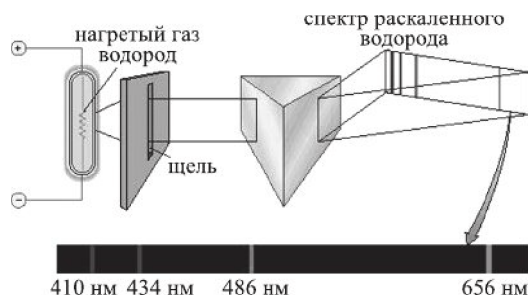


Рис. 27.21. Спектр испускания раскаленного атомарного водорода

Водород в так называемой водородной лампе разогревается сильным электрическим разрядом. Свет лампы, пройдя через призму, дает спектр, состоящий из отдельных линий. На рис. 27.21 показана только видимая область спектра с низким разрешением (отдельные тонкие линии слились). Спектр испускания водорода оказался *не сплошным*, как у солнечного света, а *линейчатым*. Прежде всего в экспериментах было замечено, что линии в спектрах расположены не беспорядочно, а сериями. Расстояние между линиями в серии закономерно уменьшается по мере перехода от длинных волн к коротким.

Швейцарский физик Й. Бальмер был отцом многодетного семейства, посвятивший всю свою жизнь одному и тому же базельскому пансионату для девиц, где преподавал математику. Однако это не помешало ему сделать важное открытие в спектроскопии. В 1885 году установил, что длины волн серии в видимой части спектра водорода могут быть представлены формулой

$$\lambda = \lambda_0(n^2/(n^2 - 4)),$$

где $\lambda_0 = \text{const}$, $n = 3, 4, 5, \dots$, $\lambda_0 = 3645,6 \cdot 10^{-8}$ см.

Возможно, на открытие Бальмера натолкнула его вера в то, что тайну всех наблюдаемых явлений следует искать в различных комбинациях целых чисел.

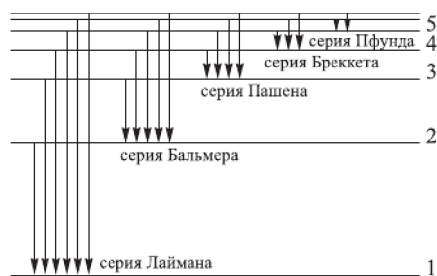


Рис. 27.22. Линии спектра атома водорода

Он с юношеских лет находился под влиянием пифагорейцев с их учением о гармонии и мистической роли целых чисел в природе. Поэтому, когда его внимание привлек набор четко ограниченных спектральных линий, он подошел к объяснению их последовательности с точки зрения своих представлений. Так он и получил простое соотношение между спектральными линиями, приведенное выше.

Стало ясно, что атом — сложная система, имеющая сложные атомные спектры (рис. 27.22).

Позже, с совершенствованием спектрометров, были открыты серии линий в ультрафиолетовой и в инфракрасной области.

Обнаруженное явление требовало объяснения, которое долгое время не могли найти. Предполагалось, что свет возникает в результате колебаний групп атомов и частота этих колебаний как-то связана с частотой волны испускаемого света. Но как устроен атом и почему его колебания приводят к излучению? Эти (и не только эти) вопросы заставляли исследователей предлагать различные гипотезы строения атома. О двух из них рассказано в начале этого раздела.

Планетарная модель атома. Однако новые опытные факты опровергли модели Нагаоки и Томсона. Эти новые факты появились в знаменитых опытах Резерфорда по рассеянию альфа-частиц, начатые всё в том же 1904 году. При условии, что модель атома Томсона правильна, а тогда не было никаких причин сомневаться в этом, опыт должен был показать, что α -частицы свободно проходят через металлические преграды. Э. Резерфорд решил проверить это экспериментально.

Э. Резерфорд и Дж. Ройдс в лаборатории в Манчестере доказали, что альфа-частицы являются дважды ионизованными (т. е. потерявшими по два электрона) атомами гелия. Резерфорд получил этот результат еще ранее, работая в Канаде. Но физики поверили в существование этих частиц именно после опытов в Манчестере.

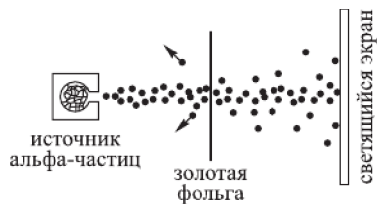


Рис. 27.23. Эксперимент Резерфорда

В 1909–1910 гг. физики Гейгер и Марсен по заданию Резерфорда проводили опыты, бомбардируя альфа-частицами тонкую золотую фольгу. Марсен спроектировал экспериментальную установку и сам же ее изготовил. Это была герметичная свинцовая камера, внутри которой лежал кусочек радия. Испускаемые радием альфа-частицы проходили через узкое отверстие в свинцовой пластине, вырезавшее из них хорошо коллимированный пучок, который падал на мишень из тончайшей золотой фольги. Перед началом очередной серии наблюдений из камеры выкачивали воздух. В ней имелся покрытый сернистым цинком передвижной экран, испускавший под ударами альфа-частиц очень слабые вспышки света. Изменяя положение экрана, можно было регистрировать частицы, отразившиеся от мишени под любым углом. Вспышки наблюдали через окошко в стенке камеры с помощью 50-кратного микроскопа.



Рис. 27.24.
Э. Резерфорд
(1871–1937)

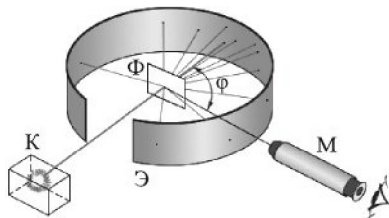


Рис. 27.25. Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц:

К — свинцовый контейнер с радиоактивным веществом;
Э — экран, покрытый сернистым цинком; Ф — золотая фольга; М — микроскоп

Резерфорд писал тогда, что наблюдение сцинтилляций (вспышек) на экране из сернистого цинка представляет собой очень удобный способ счета частиц, если каждая частица вызывает вспышку. Следовательно, если каждая вспышка вызвана одной альфа-частицей, то перед физиками открывается возможность наблюдать за поведением отдельных атомов.

Резерфорд и Гейгер визуально подсчитали, что в продолжение секунды из излучателя в один грамм радия вылетает 130 тысяч альфа-частиц. Точность подсчета была безукоризненна. Оба ученых, к которым присоединился позднее Марсен, по многу часов проводили в затемненной лаборатории за утомительным счетом сцинтилляций. Гейгер рассказывал, что ему одному пришлось подсчитать в общей сложности миллион вспышек.

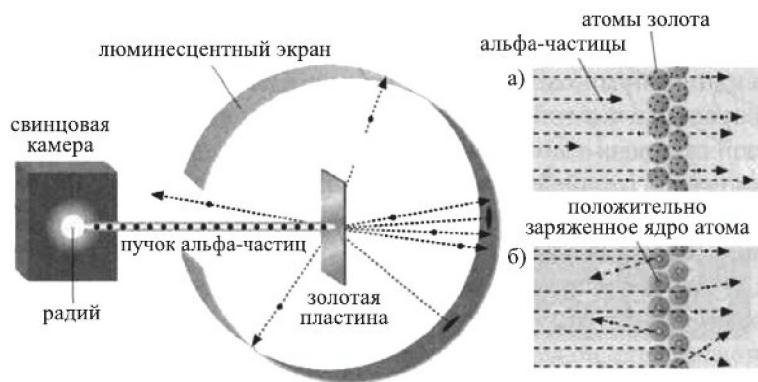


Рис. 27.26. а) То, что ожидается, если модель атома Томсона правильная;
б) то, что наблюдаем в действительности

Фольга отражала альфа-частицы, и они отклонялись в среднем на 2–3 градуса. Но некоторые частицы вели себя странно. Они отклонялись на 90° , а иногда и больше, даже отскакивали назад (в среднем 1 из 50 000), словно атомы тонкой фольги служили для них преградой.

Как образно выразился один из сотрудников Резерфорда, принимавший участие в экспериментах, это напоминало рикошет снаряда, выпущенного из пушки, от листа бумаги. Рис. 27.27 иллюстрирует сказанное. Шарики, летящие точно в направлении на горку, отклоняются на большие углы. Остальные шарики почти не изменяют своего направления: атом практически пуст!

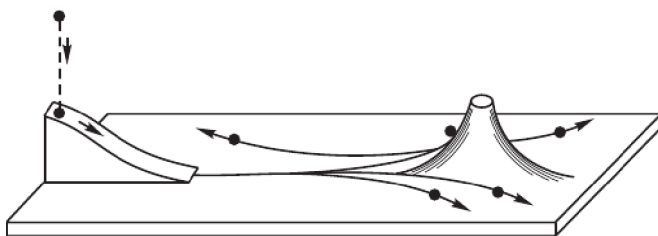


Рис. 27.27. Механическая модель рассеяния α -частиц атомным ядром

Однако не считаться с такими экспериментальными фактами было нельзя — их надо было как-то объяснить, что и было сделано в предложенной модели атома.

Резерфорд уже высказал мысль о том, что рассеяние альфа-частиц на большие углы можно объяснить существованием в атомах массивной части. Э. Резерфорд: «...Основная масса атома сосредоточена в маленьком и очень тяжелом ядре». Он назвал ее ядром (*nucleus*), используя по аналогии термин, принятый в биологии и обозначающий центральную часть живой клетки. Отныне модель атома Томсона должна была уйти в историю. Резерфорд предложил более достоверную и принципиально новую ядерную модель. Поскольку атом электрически нейтрален, то отрицательно заряженные электроны по такой модели долж-

ны были вращаться вокруг положительно заряженного ядра в объеме с радиусом порядка 10^{-10} м. Модель атома, предложенная Резерфордом, получила название планетарной из-за своего сходства со строением планетных систем.

Опыты Резерфорда, о которых подробно было рассказано, произвели сильное впечатление на физиков того времени. Но если модель Томсона отвергалась в пользу модели Резерфорда, то возникал неразрешимый вопрос: почему электроны не падают на ядро? Если допустить, что в электронном облаке их удерживает центробежная сила, возникающая при быстром вращении вокруг ядра, то тогда возникает другое затруднение: электрический заряд, движущийся в магнитном поле ядра, неизбежно должен излучать энергию. Это следовало из уже проверенной теории Максвелла. Если бы атом постоянно излучал энергию, он бы не мог существовать. Классическая физика оказалась бессильной перед этой проблемой.

Об этом, в частности, говорил Вильгельм Вин (1864–1928). Указывая на трудность объяснения линейчатых спектров атомов с точки зрения электронной теории, он отмечал: «Проще всего было бы понимать каждый атом как планетную систему, которая состоит из положительно заряженного центра, вокруг которого обращаются электроны как планеты. Но такая система не может быть устойчивой вследствие излучаемой электронами энергии. Поэтому мы вынуждены обратиться к системе, в которой электроны находятся в относительном покое или обладают ничтожными скоростями, хотя такое представление содержит много сомнительного».

Единственный, кто задумался о планетарной модели серьезно, был Нильс Бор (1885–1962), тогда еще молодой и ничем не знаменитый. В 1912 году Бор несколько месяцев работал в лаборатории Резерфорда. Но прежде чем рассказывать о работах Бора, необходимо остановиться на одном экспериментальном факте, не получившем объяснения и не дававшем покоя некоторым физикам в конце XIX века. Таким фактом был спектр излучения нагретого тела.

Новые пути физики

Истину нельзя объяснить так, чтобы ее
поняли; надо, чтобы в нее поверили.
Уильям Блейк

- 28.** Факт, не дававший покоя физикам. Спектр излучения абсолютно черного тела. «Ультрафиолетовая катастрофа». Угаданный закон. Атом Бора. Эксперименты Франка–Герца. «Сумасшедшая теория». Квантовые числа. Фотоэффект. Эффект Комптона. Фотонная теория света.

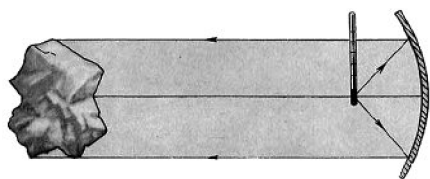


Рис. 28.1

Но еще ранее того времени, когда ученые стали разбираться в спектрах, немецкий ученый Ламберт (1728–1777) проделал следующий эксперимент. Он установил два вогнутых зеркала одно против другого на расстоянии 20 футов (5,1 м). В фокусе одного из них он поместил раскаленные угли, а в фокусе другого — лег-

ко воспламеняющиеся тела. И они зажигались. «Лучи огня», — писал Ламберт в своем сочинении «Пирометрия, или измерение огня и теплоты», изданном посмертно в 1779 году, — подчиняются тем же законам, что и световые лучи». Пикте и Соссюр проделали такой же опыт, но воспламеняющееся тело заменили термометром. «Два зеркала были поставлены одно против другого на расстоянии 12 футов ($\approx 3,65$ м) — в фокусе одного мы поместили нагретое ядро, в фокусе другого — термометр. Тотчас же температура начала повышаться и в 6 минут поднялась на $10\frac{1}{2}$ градусов, тогда как другой, поставленный на таком же расстоянии, показывал повышение лишь на 2 градуса».

Чтобы устранить всякое подозрение на то, что термометр нагревается световыми лучами, Пикте взял вместо нагретого ядра сосуд, наполненный кипящей водой; повторив опыт, он обнаружил, что температура в фокусе второго зеркала повысилась больше чем на градус. В течение нескольких десятилетий после этих опытов в физике господствовало убеждение, что от нагретого тела распространяются невидимые лучи теплоты, подчиняющиеся тем же законам распространения и отражения, как и лучи света. Говорят же люди, что лучи солнца осветили комнату (т. е. свет — это излучение), но также говорят: «греться в лучах солнца» (т. е. и тепло может распространяться в виде лучей). Много позже ученые поняли, что тепловое излучение — это электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет энергии теплового движения атомов и молекул (т. е. внутренней энергии).

Физики долго пытались найти формулу, которая точно и в полном согласии с экспериментом описывала бы спектр излучения черного тела. Чтобы понять

первую и, пожалуй, самую серьезную из этих проблем, представьте себе большой черный ящик с зеркальной внутренней поверхностью, в одной из стенок которого проделана маленькая дырочка. Луч света, проникающий в ящик через микроскопическое отверстие, навсегда остается внутри, бесконечно отражаясь от стенок. Объект, не отражающий света, а полностью поглощающий его, выглядит черным, поэтому его и принято называть черным телом. Термин был введен Г. Кирхгофом в 1862 году. Наиболее черные реальные вещества, например сажа, поглощают до 99 % падающего излучения в видимом диапазоне длин волн, однако инфракрасное излучение поглощается ими значительно хуже. Среди тел Солнечной системы свойствами абсолютно черного тела в наибольшей степени обладает Солнце. Абсолютно черное тело — подобно многим другим — объект чисто гипотетический, хотя, например, полая, равномерно разогревающаяся зеркальная изнутри сфера, свет в которую проникает через единственное крохотное отверстие, является хорошим приближением.

Модель такого черного ящика помогает нам понять, как ведет себя поглощенный черным телом свет, взаимодействуя с атомами его вещества. Изначально к решению проблемы были применены чисто классические методы, которые дали ряд важных и верных результатов, однако полностью решить проблему не позволили, приведя в конечном итоге к резкому расхождению с экспериментом.

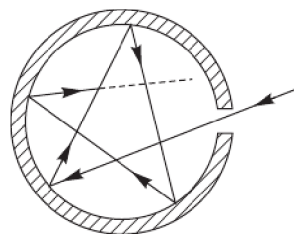


Рис. 28.2. Модель абсолютно черного тела (Википедия)

Спектр излучения нагретых тел. В 1879 году австрийский физик Йозеф Стефан (1835–1893) на основе экспериментальных данных установил закон пропорциональности энергии излучения абсолютно черного тела четвертой степени абсолютной температуры: *мощность излучения абсолютно черного тела прямо пропорциональна площади поверхности и четвертой степени температуры тела*. В 1884 году эту зависимость теоретически на основе классической электродинамики установил Л. Больцман. Отсюда название — закон Стефана–Больцмана.

Экспериментаторы ранее установили, что спектр черного тела напоминает остроконечный холм или горб верблюда. Вершина горба, где излучение максимально, находится при определенной длине волны, значение которой зависит от температуры, причем влево — в направлении коротких длин волн — интенсивность излучения резко убывает (рис. 28.3). Нетрудно видеть, что спектр, изображенный на рис. 28.3, содержит непрерывный диапазон частот. Такой непрерывный спектр частот испускают нагретые твердые тела или жидкости и даже плотные газы.

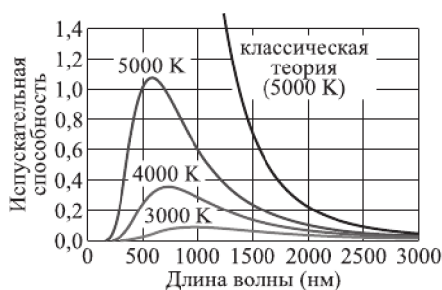


Рис. 28.3. Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны для разных температур и ее вид, исходя из классических рассуждений Рэля и Джинса (Википедия)

Первую попытку описать математически спектр излучения абсолютно черного тела предпринял Рэлей. Попытка состояла в том, чтобы уподобить атомы в стенках сосуда набору колеблющихся зарядов — осцилляторов, каждый из которых, как это положено по теореме Максвелла, имеет в среднем энергию kT (половина этой величины приходится на кинетическую энергию, половина — на потенциальную). После этого можно было, пользуясь методами термодинамики, рассчитать и плотность энергии излучения. Релей получил для плотности энергии, находящейся в равновесии со стенками, формулу, носящую название формулы Релея–Джинса после того, как Дж. Джинс несколько переработал теорию Рэля. Из этого закона получалось, что спектральная плотность мощности излучения должна была неограниченно расти по мере сокращения длины волны. Но это никогда не наблюдалось! Как выглядят результаты расчета по теории Рэля–Джинса и наблюдаемые данные, можно видеть на рис. 28.3 (классическая теория).

В соответствии с формулой Рэля–Джинса с уменьшением частоты излучения число осцилляторов растет беспредельно, так что энергия излучения окажется бесконечной. Термодинамическое равновесие между стенкой и электромагнитным полем в рамках классической физики оказывалось невозможным.

Попытку исправить дело предпринял Вильгельм Карл Вин (1864–1928). Он заинтересовался формулой распределения энергии для ультрафиолетового участка спектра (т. е. областью высоких частот) и нашел формулу, которая хорошо работала в этой области спектра. Кроме того, Вин обнаружил, что кривая излучения перемещается в область более коротких или более длинных волн по мере того, как температура соответственно повышается или понижается согласно простому соотношению, ныне известному как закон смещения Вина. Длина волны, соответствующая пику излучения, умноженная на абсолютную температуру, остается величиной постоянной (закон смещения Вина). Математически закон смещения Вина записывается так: длина волны, при которой энергия излучения абсолютно черного тела максимальна, определяется соотношением $\lambda_{\max} = 0,0029/T$, где T — температура, λ_{\max} — длина волны с максимальной интенсивностью в метрах. Так, если считать в первом приближении, что кожа человека близка по свойствам к абсолютно черному телу, то максимум спектра излучения при температуре 36°C (309°K) лежит на длине волны 9400 нм (в инфракрасной области спектра). Поскольку форма кривой, изображающей зависимость излучаемой энергии от температуры, в основном не меняется, то, зная кривую при одной температуре, можно построить аналогичную кривую и при любой другой температуре, пользуясь законом Вина. Изменения длины волны очевидны в электронагревательном элементе по мере возрастания температуры. Когда элемент становится достаточно горячим, он светится тусклым красным свечением (длинные волны). Если температура повышается, он меняет свечение на ярко-красное, затем оранжевое, далее желтое и, наконец, белое, поскольку длина волны становится все короче и короче. Белый цвет — это смесь многих длин волн. Здесь присутствуют короткие волны в соответствии с законом Вина (длины волн по мере возрастания температуры становятся короче) и все волны, включая и менее длинные, которые обладают достаточной энергией, чтобы присутствовать в видимой компоненте в согласии с законом Стефана–Больцмана (общее количество излучаемой энергии возрастает с увеличением температуры). Закон смеще-

ния Вина получил экспериментальное подтверждение при измерениях излучения, испускаемого маленьким отверстием в полости черного тела.

Однако смысл этой формулы был неясным. Никакого отношения к кинетической теории она не имела и для малых частот была непригодна. Возникла парадоксальная ситуация, получившая название «ультрафиолетовая катастрофа» (название было придумано Эренфестом (1880–1933)). Расхождение, которое никак не удавалось устранить. Логичные и обоснованные математические расчеты неизменно приводили к формулам, выводы из которых совершенно расходились с экспериментом. Из этих формул следовало, что раскаленная печь должна с течением времени отдавать все больше тепла в окружающее пространство и яркость ее свечения должна все больше возрастать! Современник «ультрафиолетовой катастрофы» физик Лоренц грустно заметил: «Уравнения классической физики оказались неспособными объяснить, почему угасающая печь не испускает желтых лучей наряду с излучением больших длин волн...»

Необходимо было выяснить причину такого разительного несоответствия физики и опыта! Сложилось странное положение. Одна формула была хороша с теоретической точки зрения, но приводила к абсурду; вторая справлялась с катастрофой при высоких частотах, но была, очевидно, неверна при низких. В рассуждениях был где-то порок. Порок лежал в основах теории. Выход из такой ситуации нашел Макс Планк.

Формула Планка. Найти формулу, описывающую спектр излучения абсолютно черного тела, удалось Планку, который получил правильную формулу для спектральной плотности излучения абсолютно черного тела, нагретого до температуры T , которая, как он считал, помогла устранить выявившиеся несоответствия. Замечания Планка были опубликованы в «Сообщениях Немецкого физического общества» под заголовком «Об улучшении спектрального уравнения Вина». Это была маленькая, всего на три страницы, статья. В ней была приведена формула излучения при длинноволновом излучении и высоких температурах, справедливая для опытных данных, полученных ранее в экспериментах Ф. Курлбаума (1857–1927) и Г. Рубенса (1865–1922); при коротких волнах и низких температурах она переходила в закон Вина. Проверка уравнения Планка подтвердила полное совпадение его с данными опытов. Формула Планка точно согласуется с экспериментальными данными во всем интервале частот, от 0 до бесконечности. «Ультрафиолетовая катастрофа» не привела к катастрофе физики!

Получив естественное удовлетворение от ее экспериментального подтверждения, Макс Планк задумался об ее теоретическом обосновании. Месяца через два пришел к заключению, что мог бы вывести формулу на основе нового весьма радикального предположения: в процессах излучения энергия может быть отдана или поглощена не непрерывно и не в любых количествах, а лишь в известных неделимых порциях. Каждая такая порция-квант имеет энергию E , пропорциональную частоте излучения ν : $E = h\nu$. Сумма энергий этих мельчайших порций определяется через число колебаний соответствующего вида излу-



Рис. 28.4. Макс Планк

чения и универсальную естественную константу, которую Планк ввел в науку позднее ставшим знаменитым символом h . Он назвал эту постоянную величину элементарным квантом действия. Сегодня ее чаще всего называют постоянной Планка.

При выводе своей формулы Планк исходил из того, что свет испускается группами колеблющихся атомов (впоследствии оказалось, что это не так, но не помешало сделать правильный вывод о «порциях» световой энергии). При этом, по мнению Планка, в нагретом веществе группы атомов, колеблющихся с очень высокими (и очень низкими) частотами, не могут составлять большинство и основная масса порций энергии выделяется в области каких-то промежуточных, «средних» частот. Поэтому нагретый в горне металл (или раскаленная поверхность Солнца) при высоких температурах светится белым (в белом есть кванты всех длин волн), но не фиолетовым светом. Далее Планк применил формальный прием. Он разделил некоторую суммарную энергию E , принадлежащую N осцилляторам, на определенное целое число P равных частей $\varepsilon = h\nu$ и распределил эти части между осцилляторами по комбинаторному принципу: $W = (N + P - 1)/(N - 1)P!$ Числовое значение h Планк определил еще за полгода до этого в другой связи, на основании измерений Луммера и Прингсхайма.

Постоянная Планка h — одна из универсальных числовых констант природы, входящая во многие формулы и физические законы, описывающие поведение материи и энергии в масштабах микромира. Принятое в настоящее время значение постоянной Планка равно $(6,6260755 \pm 0,00023)10^{-34}$ Дж · с. Вычисленное Планком значение составило $6,55 \cdot 10^{-34}$ Дж · с, что всего лишь примерно на 1 % отличается от современного значения.

14 декабря 1900 года на заседании Немецкого физического общества в Институте им. Гельмгольца на Рейхстагуфер Макс Планк сообщил о своем революционном (как стало ясно позднее) открытии. Его выводы на девяти страницах вскоре появились в печати под заголовком «К теории закона распределения энергии в нормальном спектре». «После нескольких недель самого напряженного труда в моей жизни темнота спала и начала вырисовываться невиданная перспектива», — писал он впоследствии. 14 декабря 1900 года был заложен фундамент великой квантовой теории. Сам Планк скромно называл свою гипотезу «математическим приемом» и «рабочим предположением».

Он не скрывал, что был вынужден выдвинуть такую «странную» формальную гипотезу ради одного — чтобы любой ценой получился положительный результат. Свою идею Планк докладывал коллегам с ощущением, что совершает «акт отчаяния» — настолько она противоречила всем принципам классической физики. Идею кванта он рассматривал только как математический прием. Он так и писал известному американскому физику Роберту Вуду: «Это была чисто формальная гипотеза..., чтобы любой ценой получился положительный результат». Он вспоминал: «Мои тщетные попытки включить тем или иным образом квант действия в классическую теорию продолжались несколько лет и стоили мне больших трудов. Многие мои коллеги видели в этом нечто трагическое. Я держусь другого взгляда. Тем ценнее было для меня то, что я приобрел путем такого основательного уяснения вопроса. Теперь я мог сказать с уверенностью, что квант действия играет в физике гораздо более значительную роль, чем я был склонен считать сначала...»

Первое применение кванта действия: атом Бора. В 1912 году на квантовую гипотезу обратил внимание датский физик Нильс Бор. В модели Резерфорда электроны тоже двигались по орбитам, но эти орбиты могли быть «спиралевидными» и электрон падал на ядро атома. Двигаясь по спирали ближе или дальше к ядру, атом мог излучать или поглощать энергию. В этом случае спектры испускания атомов должны были быть похожими на непрерывный солнечный спектр, а спектр испускания водорода оказался прерывистым, линейчатым. Большую роль в построении модели атома сыграли сведения, которые Бор почерпнул в беседах со спектроскопистом из Копенгагена Хансенom. Спектроскопия дает много информации о внутреннем строении атома. Эту информацию использовал Бор. Атомные спектры стали эмпирическим основанием для его модели атома.

Бор решил «спасти» модель Резерфорда, предположив, что строением роя электронов в атоме управляет квант действия, который Планк использовал с успехом для объяснения кривой излучения абсолютно черного тела. Бор предложил считать аксиомой тот факт, что только на постоянных, стационарных орбитах электрон может существовать устойчиво, не падая на ядро. Объяснение этого феномена Бор откладывал до лучших времен, предлагая посмотреть, как новая модель объясняет экспериментальные факты. Бор предположил, что электроны в атомах также не могут терять энергию непрерывно, а должны совершать при этом квантовые переходы с одной орбиты на другую. Иными словами, линейчатые спектры испускаются атомами вещества, когда электроны в атоме переходят из одного состояния в другое. В связи с этим он выдвинул два предположения, которые названы постулатами.

Первый постулат (постулат стационарных состояний): *атом может находиться в особых, стационарных состояниях (слово «стационарный» образовано от латинского слова *stationarius* — неподвижный); находясь в этих состояниях, он не излучает и не поглощает электромагнитные волны. Каждому стационарному состоянию соответствует определенное значение энергии — энергетический уровень.*

Разрешенными стационарными орбитами являются только те, для которых угловой момент импульса L электрона равен целому кратному величине постоянной Планка h . Поэтому для n -ой стационарной орбиты выполняется условие квантования: $L = mvr = nh/2\pi$, $n = 1, 2, \dots$ орбит и их энергии.

Второй постулат (правило частот): *при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией e_n в другое стационарное состояние с энергией e_k испускается или поглощается один квант энергии (рис. 28.5).* При этом частота f излучения атома определяется разностью энергий атома в двух стационарных состояниях, так что $hf = E_k - E_n$.

Итак, электрон может обращаться вокруг ядра только в соответствии с дискретной (прерывистой) последовательностью возможных частот колебаний, каждая из которых соответствует в общем одной классической орбите старой планетарной модели. Этим Бор избежал противоречия с классической механикой, со-

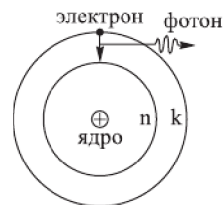


Рис. 28.5. Возможные орбиты в модели атома водорода

гласно которой электрон при вращении по орбите должен излучать энергию (см. выше).

Найдем радиусы стационарных орбит электрона в атоме Бора.

Запишем условие вращения электрона массы m_0 по круговой орбите радиуса r под действием кулоновской силы со стороны ядра и формулу Бора квантования момента импульса электрона $m_0 v^2/r = 1/4\pi\epsilon_0 Z e^2/r^2$ и $m_0 v r = nh/2\pi$. Здесь Ze — заряд ядра (Z — число положительных элементарных зарядов).

Решая эту систему уравнений, находим для радиусов допустимых (стационарных) орбит электрона в атоме водорода следующее выражение: $r_n = n^2 h^2 \epsilon_0 / (\pi m_0 Z e^2)$, $n = 1, 2, \dots$

Введем в качестве универсальной константы теории боровский радиус $r_1 = a_0 = \epsilon_0 h^2 / (\pi m_0 e^2) = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м как радиус первой стационарной орбиты электрона в атоме водорода. Тогда радиусы более далеких орбит будут кратны n^2 : $r_2 = 4r_1$; $r_3 = 9r_1$ и т. д.

Из приведенных соотношений следует, что на каждой из допустимых орбит электрон обладает определенной энергией. Полная энергия электрона равна сумме кинетической и потенциальной энергий. Потенциальная энергия равна $U = -eV$, где V — потенциал точечного заряда: $U = -1/4\pi\epsilon_0 (Ze^2/r)$.

Полная энергия $E_n = 1/2 m_0 v^2 - 1/4\pi\epsilon_0 (Ze^2/r_n)$. Подставляя в правую часть E_n выражение для v из соотношения для L и выражение для r_n , получим

$$E_n = -(Z^2 e^4 m_0 / 8 \epsilon_0^2 h^2) (1/n^2), \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Для водорода низший энергетический уровень соответствует $n = 1$. Подставляя в формулу значения констант, получим $E_1 = -2,17 \cdot 10^{-18}$ Дж = -13,6 эВ.

Энергия более высоких орбит уменьшается обратно пропорционально n^2 : $E_n = -13,6/n^2$ (эВ). Как мы видим, в модели Бора квантуются не только радиусы орбит, но и энергии. Заметим, что энергии удаленных орбит уменьшаются по абсолютной величине. Но так как они отрицательны, то ближайшая к ядру орбита имеет самую низкую энергию.

Электронам, не связанным в атоме, отвечает бесконечное значение n , и, соответственно, $E = 0$. Электронам, связанным в атоме, отвечает энергия $E < 0$. Чтобы оторвать электрон от атома, требуется затратить энергию, называемую энергией ионизации. Энергия ионизации водорода, согласно измерениям, равна

13,6 эВ. Эта энергия соответствует вырыванию электрона из низшего состояния с $E_1 = -13,6$ эВ при переходе в состояние с $E = 0$, когда электрон свободен.

Низший энергетический уровень (или состояние) соответствует энергии E_1 и называется основным состоянием. Более высокие состояния (с E_2, E_3, \dots) называются возбужденными состояниями.

Так как $hf = hc/\lambda$, то $1/\lambda = 1/hc(E_n - E_m)$ или $1/\lambda = -(Z^2 e^4 m_0 / 8 \epsilon_0^2 h^2) (1/n^2 - 1/k^2)$, где квантовое число n относится к верхнему, а k — к нижнему состоянию. Приведенная формула имеет такой же вид, как и эмпирическая формула Бальмера при $n = 2$. Таким образом, серия Бальмера соответствует в боровской модели переходам электронов на второй энергетический уровень (рис. 28.6).

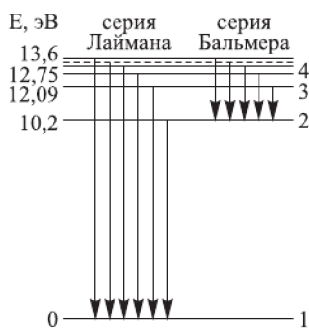


Рис. 28.6. Схема уровней энергии в атоме водорода в сериях Лаймана и Бальмера

Постоянную $Z^2 e^4 m_0 / (8 \epsilon_0^2 h^2 c)$ в приведенной формуле, вычисленную для $Z = 1$, называют постоянной Ридберга. Ее значение $R = 1,0974 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

Теория Бора, опубликованная в 1913 году, принесла ему известность, а его модель стала известна как атом Бора. Опыты Джеймса Франка и Густава Герца (племянника Г. Герца), выполненные в 1913 году, показали существование у изолированных атомов дискретных уровней энергии и явились прямым подтверждением квантовых постулатов Бора.

Эксперименты Франка–Герца. Эксперименты Франка–Герца подтвердили предположение Бора о том, что спектры атомов объясняются наличием дискретных энергетических уровней, которые могут возбуждаться в результате рассеяния электронов на атоме. Энергии связи внешних электронов в тяжелых атомах составляют несколько эВ. На рис. 28.7 показаны уровни энергии валентных электронов атома ртути. Энергия электронов основного состояния $E_0 = -10,42 \text{ эВ}$. Энергия первого возбужденного состояния $E_1 = -5,54 \text{ эВ}$. Энергия перехода между этими состояниями $E = E_1 - E_0 = -5,54 - (-10,42) = 4,88 \text{ эВ}$.

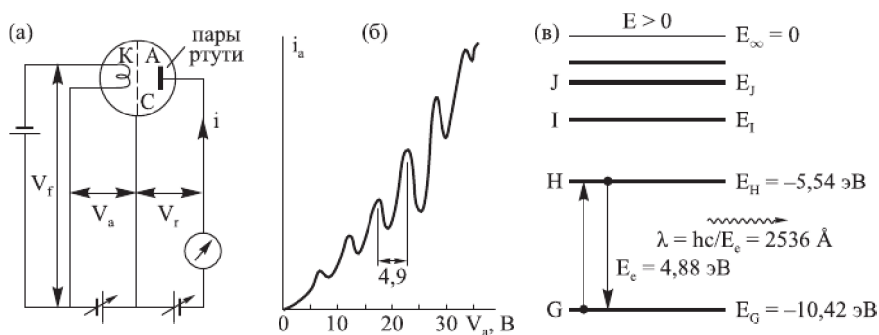


Рис. 28.7. Опыт Франка–Герца. а) Схема экспериментальной установки. В баллоне с парами ртути имелись три электрода: К — катод, А — анод и С — сетка. Ускоряющая разность потенциалов V_a прикладывалась между катодом и сеткой, между сеткой и анодом создавалось тормозящее поле с $V_r = 0,5 \text{ В}$. б) Полученная зависимость анодного тока от V_a . Интервал между максимумами составляет 4,9 В. в) Схема энергетических уровней ртути

Если энергия пучка медленных электронов, проходящего через пары ртути, меньше 4,88 эВ, то столкновения электронов пучка с атомами ртути будут упругими, т. е. без передачи энергии. Если энергия пучка электронов превышает 4,88 эВ, то происходят неупругие столкновения с передачей части энергии электрону атома ртути, сопровождающиеся переходами электронов атома ртути в первое возбужденное состояние. Поэтому в зависимости анодного тока от ускоряющего потенциала будут наблюдаться характерные максимумы и минимумы, соответствующие дискретным уровням энергии, на которых находятся внешние электроны атома ртути.

Лишь после Бора удалось объяснить характер линейчатых спектров. Теоретический и экспериментальные результаты хорошо согласуются, но... теория Бора правильно объясняет линейчатый спектр лишь атома водорода. Однако уже при попытке объяснить строение атома гелия теория Бора терпит неудачу.

А дальше сценарий внешне очень напоминает историю с моделью Птолемея, теорией Кеплера... Пришлось подправить боровскую модель атома. В декабре 1915 и январе 1916 года Арнольд Зоммерфельд (1868–1951) развил теорию Бора. Зоммерфельд, как Кеплер для Солнечной системы, предположил, что электроны в атоме Бора движутся по эллиптическим орбитам. На эллиптически вытянутой орбите скорость электрона все время меняется не только по направлению, как это бывает в случае кругового движения, но и по величине. Вдали от ядра скорость одна, вблизи — другая. Но если величина скорости меняется, то меняется и масса электрона в соответствии с теорией А. Эйнштейна. Получилось, что, описав оборот вокруг ядра, электрон чуть смещается в сторону. Он вяжет вокруг ядра петлю за петлей. Пока он летит по эллипсу своей орбиты, этот эллипс сам вращается — катится по плоскости орбиты. И потому истинный путь электрона — это красивая кривая, называемая розеткой: он очерчивает в полете по контуру многолепестковый цветок, вроде ромашки. Чтобы описать такое движение в пространстве в дополнение к главному квантовому числу Бора, понадобилось ввести еще два дополнительных квантовых числа. Он назвал их внутренними. Используя координаты в плоскости орбиты (радиус-вектор r и азимутальный угол ϕ), Зоммерфельд получил два квантовых числа: азимутальное n_ϕ (k на рис. 28.8) и радиальное n_r . Их сумма равна главному квантовому числу n теории Бора. Возможные значения азимутального квантового числа Зоммерфельда n_ϕ определяются для стационарных орбит условием $n_\phi = 1, 2, 3, \dots, n$.

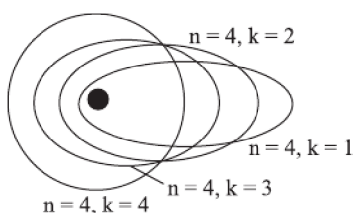


Рис. 28.8. Эллиптические орбиты электрона в атоме водорода согласно модели Бора–Зоммерфельда (Википедия)

Зоммерфельд уточнил выражение орбитального момента электрона для стационарных эллиптических (и круговых) орбит. Теперь, в отличие от теории Бора, он равен $n_\phi \hbar / 2\pi$.

По просьбе Зоммерфельда Фридрих Пашен проверил и подтвердил следствие его теории на примере спектральной линии гелия. Он обнаружил, что линия в действительности состоит из тринадцати тесно расположенных линий. Это было удивительное совпадение, и в то время (1916 году) его сравнивали с вычислениями Леверье и Адамса, которые теоретически предсказали планету Нептун.



Рис. 28.9. Арнольд Зоммерфельд (слева) и Нильс Бор на конференции в 1919 г.

В 1916 году в работах Арнольда Зоммерфельда в качестве меры релятивистских поправок при описании атомных спектральных линий в рамках модели атома Бора появилась константа, которую называют «постоянная тонкой структуры» (α), или постоянной Зоммерфельда. $\alpha = 2\pi e^2 / \hbar c$, где \hbar — постоянная Планка, c — скорость света и e — заряд электрона. Постоянная тонкой структуры — величина безразмерная, образованная комбинацией фундаментальных констант. Ее численное значение не зависит от выбранной системы единиц и равно примерно $\alpha \approx 7,297 \cdot 10^{-3}$.

Эта константа характеризует «силу» электромагнитного взаимодействия по сравнению с другими взаимодействиями (гравитационным, сильным и слабым). На сегодня

альфа — это одна из самых загадочных физических констант. Р. Фейнман (1918–1988) как-то он назвал эту константу «одной из величайших проклятых тайн физики: магическое число, которое приходит к нам без какого-либо понимания его человеком»...

Но и подправленная теория Бора не смогла объяснить интенсивность спектральных линий и фактически была справедлива только для водородоподобных атомов и не работает для атомов, следующих за ним в таблице Менделеева. И наконец, теория Бора логически противоречива: не является ни классической, ни квантовой. С моделью Бора физикам трудно было примириться. Теория Бора являлась недостаточно последовательной и общей. В системе двух уравнений, лежащих в ее основе, одно — уравнение движения электрона — классическое, другое — уравнение квантования орбит — квантовое. Вот как отреагировал П. Эренфест: «Работа Бора... приводит меня в отчаяние: если формулу Бальмера можно получить таким образом, то я должен выбросить всю физику на свалку и сам отправиться туда же».

Поль Дирак (1902–1984), лауреат Нобелевской премии, говорил: «Мы просто замучились с теорией Бора. Теория Бора давала хорошие результаты, пока речь шла об одном электроны. Но на этом пути нельзя было далеко продвинуться. В спектроскопии исследовались по большей части атомы с несколькими электронами, и было совершенно непонятно, как учесть взаимодействие между электронами в рамках теории Бора. Была проделана большая работа, но положение оказалось совершенно безнадежным: сложные вычисления не давали полезных результатов».

Квантовая модель была совершенно необычной. Так, первый постулат Бора полностью противоречит классической электродинамике. «Чем больших успехов добивается квантовая теория, тем бестолковее она выглядит», — писал А. Эйнштейн в 1912 году. А воспитанный в традициях классической теории и сделавший весьма многое для ее углубления и развития Лоренц не мог легко и быстро принять все те грандиозные перемены, которые пришли в физику с началом нового века. А. Ф. Иоффе в книге «Встречи с физиками» приводит слова Лоренца: «Сегодня, излагая электромагнитную теорию, я утверждаю, что движущийся по криволинейной орбите электрон излучает энергию, а завтра я в той же аудитории говорю, что электрон, вращаясь вокруг ядра, не теряет энергии. Где же истина, если о ней можно делать взаимно исключаящие друг друга утверждения? Способны ли мы вообще узнать истину и имеет ли смысл заниматься наукой?»

Трудности и противоречия накопились, и надо было искать выход.

Подтверждение теории квантов: фотоэффект, эффект Комптона. Электроны проявились в важном для физики явлении, получившем название «фотоэффект». Фотоэффект — это испускание электронов телами под действием света. Эффект был открыт в 1887 году Г. Герцем. Он обнаружил, что разряд между двумя металлическими шариками (прохождение искры) заметно облегчается, то есть происходит при меньшем напряжении, если их осветить ультрафиолетовым светом. Факт вызвал интерес среди физиков. В 1888 году немецкий физик Вильгельм Гальвакс (1859–1922) исследовал описанное Герцем явление. Он освещал металлический диск, соединенный с электрометром или электрометром. Рядом с диском был помещен соединенный с другим электрометром экран с отверстием

для пропускания света на диск. Гальвакс обнаружил, что если диск был заряжен отрицательно, то под действием света он терял этот заряд, а экран приобретал отрицательный заряд. Если же диск был заряжен положительно, то свет не оказывал влияния. Он также убедился в том, что тело, на которое действовали ультрафиолетовые лучи, приобретало положительный заряд. Почему существовала такая разница?

Законы фотоэффекта были установлены Филиппом Ленардом и Александром Григорьевичем Столетовым на рубеже XIX и XX веков. Эти ученые измеряли число выбитых электронов и их скорость в зависимости от интенсивности падающего излучения. Ф. Ленардом в 1900 году облучался отрицательный электрод через кварцевое окошко в вакуумной колбе. Было обнаружено, что ток вызван только ультрафиолетовой частью спектра облучения, а эксперименты с выбором материала показали зависимость возникновения тока от материала, точнее от спектра его поглощения, что сегодня называется красной границей фотоэффекта.

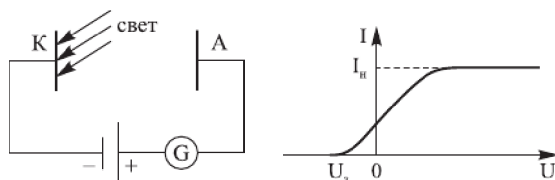


Рис. 28.10. Схема наблюдения фотоэффекта и зависимость тока фотоэлектронов от приложенного напряжения

Многочисленными экспериментаторами были установлены следующие основные закономерности фотоэффекта.

Фототок насыщения I_n (максимальное число электронов, высвобождающихся светом за 1 с) прямо пропорционален световому потоку, падающему на катод.

Для каждого вещества существует граница фотоэффекта, т. е. наименьшая частота ν_{\min} , при которой еще возможен фотоэффект. Иными словами, если направить на мишень пучок красных лучей, то электроны не вылетят вообще.

Если излучение — волновой процесс, то такого не может быть.

Эйнштейн предложил свое объяснение на основе гипотезы М. Планка о том, что свет излучается и поглощается определенными порциями, причем энергия каждой такой порции определяется формулой $E = h\nu$, где h — постоянная Планка. Эйнштейн сделал следующий шаг в развитии квантовых представлений. Он пришел к выводу, что и свет имеет прерывистую дискретную структуру. Эйнштейн утверждал: свет не только испускается квантами, как того требовала гипотеза Планка, но и распространяется также квантами: электромагнитная волна состоит из отдельных порций — квантов, впоследствии названных фотонами³. При взаимодействии с веществом фотон целиком передает всю свою энергию $h\nu$ одному электрону. Часть этой энергии электрон может рассеять при столкнове-

³ Эйнштейн ввел понятие светового кванта. А современное название, «фотон», получено от греческого слова «phōs» (означает «свет»), было введено в 1926 году химиком Гилбертом Ньютоном Льюисом, опубликовавшим теорию, в которой фотоны считались «несоздаваемыми» и «неразрушимыми». Хотя теория Льюиса никогда не использовалась, так как находилась в противоречии с экспериментами, термин «фотон» начал использоваться большинством физиков (постулированный Эйнштейном фотон был открыт в 1922 году А. Комптоном).

ниях с атомами вещества. Кроме того, часть энергии электрона затрачивается на преодоление потенциального барьера на границе «металл–вакуум». По мысли Эйнштейна, какая-то часть ее, назовем ее W , расходуется на то, чтобы вырвать электрон из атома, а остальная часть — на то, чтобы разогнать его до скорости v , то есть сообщить ему кинетическую энергию $(mv^2)/2$. Оба эти утверждения можно коротко записать в виде простого уравнения:

$$h\nu = W + (mv^2)/2.$$

Эту формулу принято называть уравнением Эйнштейна для фотоэффекта.

Эта простая формула сразу проясняет всю картину. С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все закономерности внешнего (внутренним фотоэффектом называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений) фотоэффекта. Так как электроны удерживаются в металле силами притяжения, для их выбивания с поверхности металла требуется минимальная энергия W_0 , называемая работой выхода, зависящей от свойств материала катода. Для большинства металлов она составляет несколько электрон-вольт. Если частота падающего света недостаточна для выбивания электрона с поверхности металла, то фототок равен нулю. Эффект фотоэлектронной эмиссии наблюдается, когда энергия падающих квантов электромагнитного излучения больше работы выхода электронов W_0 из материала катода. Пороговая энергия фотоэлектронной эмиссии определяется из выражения $h\nu_{кр} = A$, где $\nu_{кр}$ — пороговая частота фотоэлектронной эмиссии (известная как красная граница фотоэффекта).

Из уравнения Эйнштейна следуют линейная зависимость максимальной кинетической энергии от частоты и независимость ее от интенсивности света, существование красной границы (действительно, пока энергия квантов мала (красный свет), они не могут выбить электрон из атома, $h\nu < W$), безынерционность фотоэффекта. Общее число фотоэлектронов, покидающих за 1 с поверхность катода, должно быть пропорционально числу фотонов, падающих за то же время на поверхность.

Если теперь на анод подать некоторое отрицательное напряжение, то вовсе не у всех электронов хватит энергии, чтоб преодолеть отталкивание от анода. И вполне очевидно, что чем больше это напряжение, тем труднее будет электронам его преодолеть. При некоторой величине этого напряжения (когда eU будет в точности равно кинетической энергии электронов E_k) фототок полностью прекратится. Это напряжение называется запирающим (U_3). Оно зависит от длины волны света (рис. 28.11). Тщательные измерения показали, что запирающий потенциал линейно возрастает с увеличением частоты ν света.

Как следует из уравнения Эйнштейна, тангенс угла наклона прямой, выражающей зависимость запирающего потенциала U_3 от частоты ν , равен отношению постоянной Планка h к заряду электрона e :

$$\operatorname{tg} \alpha = -h/e.$$

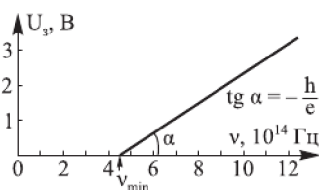


Рис. 28.11. Зависимость запирающего потенциала U_3 от частоты ν падающего света (Википедия)

Это позволяет экспериментально определить значение постоянной Планка. Такие измерения были выполнены Р. Милликен (1914) и дали хорошее согласие со значением, найденным Планком.

Важную роль в подтверждении теории квантов сыграл *эффект Комптона*, названный в честь его открывателя А. Г. Комптона (1892–1962). Комpton начал свои опыты в 1922 году. А годом позднее он и нидерландско-американский физик Петер Джозеф Уильям Дебай (1884–1966) дали теоретическую интерпретацию результатам опытов.

Комптон изучал рассеяние рентгеновского излучения различными веществами и обнаружил, что частота рассеянного света меньше частоты падающего света.

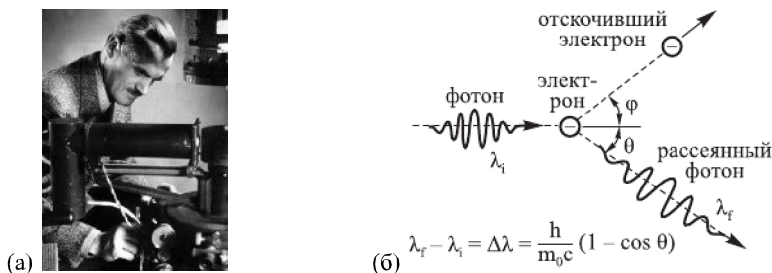


Рис. 28.12. а) А. Комптон; б) эффекта Комптона

Объяснить эффект Комптона в рамках классической электродинамики невозможно. С точки зрения классической физики электромагнитная волна является непрерывным объектом и в результате рассеяния на свободных электронах изменять свою длину волны не должна. Иное дело, если фотоны действительно можно уподобить частицам, в этом случае они, кроме энергии, должны иметь и импульс. Более того, импульс фотонов, если он у них существует, должен быть связан с энергией той же формулой, которая имеет место в механике. Так ли это и можно ли фотону приписать импульс? Эти вопросы были экспериментально решены Комптоном. Комптон исследовал процесс столкновения фотонов с электронами. Если фотон имеет импульс, то при столкновении с электроном суммарный импульс должен сохраняться, что в опыте так или иначе должно проявляться. Все как при столкновении бильярдных шаров (см. с. 83). Эффект становится объяснимым, если полагать, что электромагнитное излучение представляет поток фотонов, каждый из которых обладает энергией $h\nu$ и импульсом. Т. е. фотон ведет себя, грубо говоря, как движущийся шарик. В легких веществах, с которыми проводил опыты А. Комптон, энергия связи электронов мала по сравнению с энергией, передаваемой ему квантами рентгеновского излучения, и электроны можно считать свободными. При комптоновском рассеянии происходит упругое столкновение фотона со свободным электроном. По образному выражению М. Борна, эффект Комптона — это игра в бильярд фотонами и электронами.

Комптон поставил опыт по рассеянию рентгеновских лучей на графите. Рентгеновские же лучи, как свет очень короткой длины волны, должны рассеиваться на атомах и отдельных электронах. Суть опыта Комптона заключалась

в следующем. Узкий направленный пучок монохроматических рентгеновских лучей направляется на небольшой образец из графита. Рентгеновские лучи, как известно, обладают хорошей проникающей способностью: они проходят через графит, и одновременно часть их рассеивается во все стороны на атомах графита. Рассеянные лучи улавливались под различными углами рассеяния и с помощью рентгеновского спектрографа измерялась длина волны рассеянного света. Математически решить задачу не составляло труда (опять же как в случае задачи о столкновении упругих шаров). Энергия рассеянных фотонов, предсказанная фотонной теорией, полностью совпала с экспериментальными данными. Уменьшение энергии фотона после комптоновского рассеяния называется комптоновским сдвигом (см. рис. 28.12). В классической электродинамике рассеяние электромагнитной волны на заряде (томсоновское рассеяние) не сопровождается уменьшением ее частоты.

Опыты Комптона блестяще подтверждают фотонную теорию света: свет можно рассматривать как поток корпускул — фотонов, — энергия и импульс которых определяются частотой света. Открытие эффекта Комптона еще раз подтвердило двойственную природу излучения — дуализм «волна—частица» (см. ниже). Рентгеновское излучение сначала ведет себя как волна, затем взаимодействует с электроном как частица (фотон) и после столкновения вновь подобно волне.

Подведем итог. Казалось, физики смогли обойти все подводные рифы и справиться с возникшими трудностями. Но действительность оказалась сложнее. Теория Бора, рассмотренная в предыдущей главе, хотя и смогла объяснить удовлетворительным образом строение атома водорода, оказалась бессильной в случае более сложных атомов. Эта теория представляла собой странную смесь классических и квантовых представлений. Примерно с 1920 года в атомной физике начинает утрачиваться представление о строении даже простейшего атома водорода. Считается, что к этому времени старая квантовая теория «представляла собой... скопление гипотез, принципов, теорем и вычислительных рецептов», не могла объяснить наблюдаемые в опытах явления, относящиеся к атомам.

В целом такое состояние было названо кризисом в физике.

Было обнаружено существенное противоречие между классическим описанием движения электрона в атоме и результатами наблюдений. А это явный признак того, что теория неверна.

29. Кризис в атомной физике. Новая наука и новые взгляды. Волны де Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм. Волновая функция и ее интерпретация. Дифракция электронов на двух щелях. Принцип неопределенности. Странности квантового мира. Принцип запрета Паули. Системы с большим числом атомов. Квантовая механика твердого тела. Зонная теория полупроводников. Транзистор.

В начале 20-х годов физики Макс Борн и Джеймс Франк и математик Давид Гильберт организовали в Геттингене «Семинар по материи», на котором задолго до работ Гейзенберга и Шрёдингера стали употреблять термин «квантовая механика». В семинаре принимали участие и признанные в то время ученые, и знаме-

нитая впоследствии молодежь. Почти каждый семинар Гильберт начинал вопросом: «Итак, господа, подобно вам, я хотел бы, чтобы мне сказали точно: что такое атом». Так вот, объяснить особенности строения атома удалось только с развитием волновой механики, в основе которой лежат корпускулярно-волновой дуализм и соотношение неопределенности. Физики обратились к недавно появившейся новой науке — квантовой механике.

Развитие квантово-механических представлений. Теория Бора в своей основе была теорией, созданной для объяснения одной проблемы: допущения, из которых она исходила, были сделаны с расчетом, чтобы ее предсказания соответствовали эксперименту. Вслед за теорией Бора начала создаваться другая теория атомных процессов, исходящая из совершенно новых основ. В 1923 году Луи де Бройль (1892–1987) выдвинул идею двойственной природы вещества, опирающуюся на предположение о том, что поток материальных частиц, таких как электроны, обладает и волновыми свойствами, неразрывно связанными с массой и энергией. Одним из исходных аргументов де Бройля в пользу волновой природы электронов состоял в том, что его предположение давало объяснение боровской теории атома водорода. Это была поразительная по смелости и дерзкая гипотеза. Вот как отозвался об этом А. Эйнштейн в 1925 году в письме М. Борну. А. Эйнштейн писал: «Прочтите диссертацию Луи де Бройля. Хотя и кажется, что ее писал сумасшедший, написана она солидно». Согласно де Бройлю, если частица имеет энергию E и импульс p , то с ней связана волна, частота которой $\nu = E/h$ и длина волны $\lambda = h/p$, где $h = 6 \cdot 10^{-27}$ эрг \cdot с — постоянная Планка. Эти волны получили название волн де Бройля. Для частиц не очень высокой энергии, движущихся со скоростью $v \ll c$ (c — скорость света), импульс равен $p = mv$ (где m — масса частицы), бройлевская длина волны $\lambda = h/p = h/mv$ очень мала.



Рис. 29.1. Луи де Бройль

Следовательно, длина волны де Бройля тем меньше, чем больше масса частицы и ее скорость. Например, частице с массой в 1 г, движущейся со скоростью 1 м/с, соответствует волна де Бройля с $\lambda \approx 6,62 \cdot 10^{-31}$ м, что лежит за пределами доступной наблюдению области. Поэтому волновые свойства несущественны в механике макроскопических тел. Для электронов же с энергиями от 1 эВ до 10 000 эВ длина волны де Бройля лежит в пределах от ~ 1 нм до 10^{-2} нм, то есть в интервале длин волн рентгеновского излучения. Поэтому волновые свойства электронов должны проявляться, например, при их рассеянии на тех же кристаллах, на которых наблюдается дифракция рентгеновских лучей.

Первое экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля было получено в 1927 году в опытах К. Дэвиссона и Л. Джермера.

И, как нередко бывает в физике, дифракция электронов была обнаружена во многом случайно. В 1922 году по заказу американской фирмы «Белл-телефон» Клинтон Джозеф Дэвиссон (1881–1958) и его сотрудник Кенсмен изучали отражение электронных пучков от поверхности металлов и вдруг заметили какие-то аномалии. В 1925 году, после работ де Бройля, ученик Макса Борна Вальтер Эльзассер предположил, что эти аномалии объясняются электронными волнами.

Дэвиссон прочел эту заметку, но не придал ей значения. В 1926 году он приехал в Европу и показывал свои графики Максу Борну и Джеймсу Франку в Геттингене, а также Дугласу Хартри в Оксфорде. Все они единодушно признали в них волны де Бройля. В пути через океан Дэвиссон изучал работы Шрёдингера (о них — далее) и вскоре по приезде в Америку вместе с Лестером Альбертом Джермером подтвердил гипотезу де Бройля опытом.

В их опыте пучок электронов ускорялся в электрическом поле с разностью потенциалов 100–150 В (энергия таких электронов 100–150 эВ, что соответствует $\lambda = 1 \text{ \AA}$) и падал на кристалл никеля, играющего роль пространственной дифракционной решетки. Под углом θ к падающему пучку электронов устанавливался цилиндр Фарадея⁴, соединенный с чувствительным гальванометром (рис. 29.3). По показаниям гальванометра определялась интенсивность отраженного от кристалла электронного пучка. Вся установка находилась в вакууме. Опыты показали, что имеется ярко выраженная селективность (выборочность) рассеяния электронов. При различных значениях углов и скоростей, в отраженных лучах наблюдаются максимумы и минимумы интенсивности Δ . Условие максимума: $\Delta = 2d \sin \theta = \lambda n$, $n = 1, 2, \dots$ (здесь d — постоянная кристаллической решетки). Картина точно такая же, как и в случае дифракции света (рис. 29.4). Таким образом, наблюдалась дифракция электронов на кристаллической решетке монокристалла. Опыт явился блестящим подтверждением существования у микрочастиц волновых свойств. Итак, было установлено, что электроны дифрагируют на кристалле, причем именно так, как должно быть для волн, длина которых определяется соотношением де Бройля.

Независимо от К. Дэвиссона и Л. Джермера дифракцию электронов на кристалле наблюдал английский физик Дж. П. Томсон (1928) (Джордж Паджет Томсон — сын знаменитого Джи-Джи), поверивший в идею де Бройля. В своей лаборатории он ставил опыт специально с целью проверки идеи Луи де Бройля. В своих экспериментах вместо пучка медленных электронов, который трудно было регулировать, Дж. Томсон использовал пучок быстрых электронов ($\sim 10^4$ эВ), создаваемых катодной трубкой. Вместо отражения от толстой пластинки (кристалла) он исследовал прохождение электронов через тонкую фольгу, а для регистрации результатов вместо гальва-



Рис. 29.2. Американские ученые Дэвиссон и Джермер

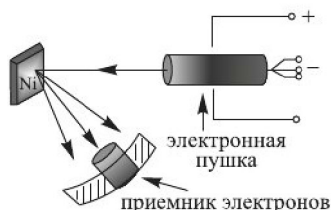


Рис. 29.3. Схема опыта Дэвиссона и Джермера

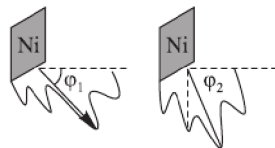


Рис. 29.4. Дифракционная картина

⁴ Цилиндр Фарадея — это наиболее распространенный прибор, используемый в качестве первичного эталонного прибора для измерения токов пучков заряженных частиц. При измерении тока пучок частиц попадает на изолированный от окружающих предметов электрод, который задерживает частицы пучка и почти все вторичные частицы, образующиеся при столкновении частиц пучка с материалом электрода.

нометра взял фотографическую пластинку. Для устранения рассеяния электронов на молекулах воздуха установка тщательно откачивалась ртутными насосами. Дж. П. Томсон надеялся получить картину, сходную с известной дифракционной картиной рентгеновского излучения. И такая картина была получена! На рис. 29.5 приведена фотография дифракционной картины. Волновые свойства электронов, нейтронов и других частиц, а также атомов и молекул теперь не

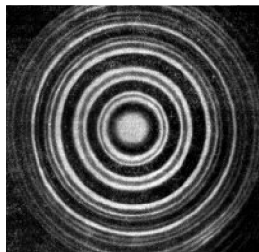


Рис. 29.5. Снимки дифракционных колец при пропускании электронов через тонкую золотую фольгу

только надежно доказаны прямыми опытами, но и широко используются в установках с высокой разрешающей способностью.

Волны де Бройля лежат в основе работы электронного микроскопа, разрешающая способность которого на много порядков выше, чем у любого оптического микроскопа, что позволяет наблюдать молекулы и атомы, а также в основе методов исследования таких сверхмалых объектов, как атомные ядра и элементарные частицы, бомбардировкой их частицами высоких энергий. Метод дифракции частиц в настоящее время так широко используется при изучении строения и свойств вещества, что можно говорить об их инженерном использовании.

Гипотеза де Бройля и атом Бора. Одним из аргументов в пользу гипотезы де Бройля было то, что она давала объяснение боровской теории атома водорода. Эта гипотеза позволила изящно объяснить, почему электрон в атоме может существовать только на стационарных орбитах. А именно, стационарными орбитами в атоме могут быть только такие орбиты, в которые укладывается целое число длин волн электрона. Такая волна называется стоячей (рис. 29.6). Стоячие волны на круговой орбите могут существовать только при условии, что длина орбиты равна целому числу длин волн (два первых рисунка). На последнем рисунке это условие не соблюдается и волна гасит сама себя. Такая модель наглядно показывает, что квантовое число n может быть только целым.

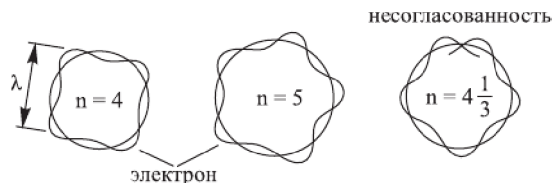


Рис. 29.6. Разрешенные и неразрешенные стоячие волны электрона на боровских орбитах

Рассмотрим движение электрона в атоме водорода по круговой орбите радиуса r . Потребуем, чтобы разрешенными были только такие орбиты, на которых укладывается целое число длин волн де Бройля, т. е. орбиты, для которых выполняется условие $2\pi r = \lambda n$, $n = 1, 2, 3, \dots$

Подставляя для длины волны выражение де Бройля, получим $mvr = nh/2\pi$, т. е. условие квантования, выведенное Бором. При выполнении этого условия,

называемого условием квантования орбиты, любой произвольной точке на орбите соответствует определенная фаза колебания, связанного с волной. В самом деле, задавая на орбите какую-либо точку, мы видим, что волна после полного оборота по орбите приходит в эту точку с той же самой фазой.

Таким образом, выполнение условия квантования делает волновую картину определенной и однозначной. Если же это условие не выполняется, то после полного оборота волна придет в исходную точку уже с другой фазой, затем опять с новой фазой и т. д. То есть в этом случае никакой однозначной волновой картины нет. Итак, волновое движение электронов в ограниченном пространстве сводится, как и в других волновых явлениях, к образованию стоячих волн.

Заметим, что при описании электрона в виде волны нельзя говорить о движении по орбите. Однако мы всё же воспользовались представлением об орбите и использовали свойствами волн де Бройля, для того чтобы указать, какие орбиты являются разрешенными. Такой подход хотя и не является последовательным и строгим, но обладает большой наглядностью и позволяет получить результаты, очень близкие к точным квантово-механическим расчетам.

Корпускулярно-волновой дуализм. Положение о том, что в поведении микрообъектов проявляются как корпускулярные, так и волновые черты, получило название «корпускулярно-волновой дуализм». Это было удивительно! У. Брэгг-старший остроумно заметил: «Каждый физик вынужден по понедельникам, средам и пятницам считать свет состоящим из частиц, а в остальные дни недели — из волн. Лишь при объяснении немногих явлений (например, прямолинейного распространения света, эффекта Доплера и др.) можно с равным успехом следовать как одной, так и другой теории».

Как мы видели, в первой половине XIX века борьба между корпускулярной и волновой теориями завершается победой волновой концепции — было установлено, что свет является поперечным волновым движением. Об этом убедительно свидетельствовали опыты по интерференции и дифракции света. Но в начале прошлого века физики столкнулись с удивительной загадкой: в ходе экспериментов было обнаружено, что свет в одних ситуациях проявлял себя как волна (то есть огибал препятствия), а в других — как частица (то есть пытался сквозь эти препятствия проникнуть). К 1924 году в науке о свете создалось тягостное положение: ни волновая, ни квантовая теории не в состоянии охватить все области световых явлений. Эренфест даже обучил своего цейлонского попугая произносить фразу: «Aber, meine Herren, das ist keine Physik» («Но, господа, ведь это не физика»). Этого попугая он предлагал в качестве председателя в дискуссиях о новой квантовой механике в Геттингене. В 1961 году, весной, будучи в Москве, Нильс Бор рассказывал, как лет за сорок до этого Эйнштейн спросил его с комическим отчаянием: «Скажите, так что же такое свет?» Бор ответил: «Обратитесь к немецкому правительству, и пусть оно либо издаст постановление, что свет — это волна, и запретит пользоваться фотоэлементами, либо решит, что свет — это частицы (корпускулы), и тогда запретит пользоваться дифракционными решетками».

Но выход физики нашли. Этот выход был найден Н. Бором в 1927 году. Он пришел к выводу, что двойственную природу света следует принять как непреложный факт, как данность. Бор выдвинул свой знаменитый принцип дополненности. Этот принцип утверждает, что для объяснения эксперимента следу-

ет использовать либо волновые, либо корпускулярные представления, но не те и другие одновременно. Так, для полного понимания природы света необходимо учитывать как волновые, так и корпускулярные свойства света. Оба эти аспекта свойств света взаимно дополняют друг друга. Это трудно принять, ибо наш повседневный опыт противится этому. Но не всё можно представить себе наглядно!



Рис. 29.7. Эрвин Шрёдингер

Волновая функция. Открытие уравнения Шрёдингера последовало за революционным предположением де Бройля, что не только свету, но и вообще любым телам (в том числе и любым микрочастицам) присущи волновые свойства. Эта гипотеза легла в основу механики Шрёдингера (1887–1961) (изложена им в отдельной книге, вышедшей в 1927 году под общим названием «Статьи по волновой механике»). В конце 1925 года в одной из статей А. Эйнштейна Шрёдингер прочел несколько похвальных слов в адрес де Бройля и его гипотезы о «волнах материи». Это был толчок, который подвигнул Шрёдингера развить гипотезу «о волнах материи» до ее логического завершения. Шрёдингер понимал: какой бы ни была природа электронных волн, их движение должно подчиняться волновому уравнению. В квантовой механике амплитуду, скажем, электронной волны называют волновой функцией. Ее обозначают буквой Ψ (пси). Для нахождения волновой функции Шрёдингер получил специальное уравнение, получившее название «уравнение Шрёдингера». Эту идею Шрёдингера удалось выразить очень точно с помощью однозначного языка формул. Уравнение Шрёдингера, как и любой другой глубокий закон природы, нельзя вывести только из более простых. Его можно только угадать. (Шрёдингер впоследствии признался, что и сам еще не совсем понимает, как ему это удалось.)

Как мы знаем, решение задачи о движении тела макроскопических размеров основано на применении второго закона Ньютона. Если известны силы, действующие на тело, то сначала мы находим его ускорение, затем траекторию, после чего все параметры движения. Но в масштабах атомов понятие траектории теряет свой смысл. То есть то, что мы традиционно считали частицей, в квантовом мире ведет себя во многом подобно волне. В основе расчетов лежит уравнение Шрёдингера. В 1926 году ему удалось в явном виде записать уравнение для волн волновой механики, т. е. для дебройлевских волн, связанных с материальными частицами.

Уравнение Шрёдингера настолько важно для понимания современной физики, что приведем его здесь в самой простой форме (так называемое одномерное стационарное уравнение Шрёдингера). Вышеупомянутая волновая функция распределения вероятности, обозначаемая греческой буквой Ψ , является решением следующего дифференциального уравнения: $d^2\Psi/dx^2 + 8\pi^2m/h^2(E - U)\Psi = 0$, где x — расстояние, h — постоянная Планка, m , E и U — соответственно масса, полная энергия и потенциальная энергия частицы. Решив его, мы находим набор энергетических уровней, который реализуется в заданном потенциале, а также получаем информацию статистического характера о возможном положении частицы. Тем самым математически подтверждается тот факт, что волнам де Бройля, сопряженным с частицами, нельзя приписать «физического существования». Поэтому сам де Бройль называл эту волну фиктивной, а Эйнштейн окрестил ее волной-призраком. Решение уравнения для атома водорода можно получить довольно просто.

Состояние электрона в атоме водорода описывается волновой функцией Ψ , удовлетворяющей стационарному уравнению Шрёдингера, учитывающему значение потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром:

$$\Delta\Psi + 8\pi^2m/h^2(E + Ze^2/4\pi\epsilon_0r)\Psi = 0,$$

где

$$\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$$

— так называемый оператор Лапласа.

В теории дифференциальных уравнений доказывается, что уравнения типа Шрёдингера имеют решения, удовлетворяющие требованиям однозначности, конечности и непрерывности волновой функции Ψ , только при собственных значениях энергии: $E_n = -(1/n^2)Z^2me^4/8h^2\epsilon_0^2$ ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Как и в случае «потенциальной ямы» с бесконечно высокими «стенками» и гармонического осциллятора, решение уравнения Шрёдингера для атома водорода приводит к появлению дискретных энергетических уровней. Возможные значения E_1, E_2, E_3, \dots показаны на рис. 29.8 в виде горизонтальных прямых. Самый нижний уровень E_1 — основной, все остальные — возбужденные. При $E < 0$ движение электрона связанное, при $E > 0$ — свободное (атом ионизуется). $E_1 = -E_i = me^4/8h^2\epsilon_0^2 = 13,6$ эВ (энергия ионизации атома водорода).

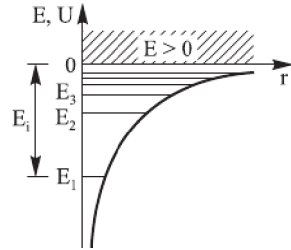


Рис. 29.8

Уравнение Шрёдингера играет в квантовой механике ту же роль, что и уравнение Ньютона в классической механике. Его можно было бы назвать уравнением движения квантовой частицы. Найти закон движения такой частицы — значит определить значение пси-функции в каждый момент времени и в каждой точке пространства. Волновая функция описывает движение свободной частицы с заданным значением импульса, имеет вид волны де Бройля. В соответствии с гипотезой де Бройля каждый материальный объект имеет волновые свойства и, следовательно, его можно описать волновой функцией вида $y = y_0 \cos(\omega t - kx)$. Циклическая частота ω и волновое число k в этом уравнении связаны с энергией и импульсом материальной частицы и могут быть найдены с помощью формул де Бройля. Но каков смысл y и y_0 ? Какова их природа? Это мгновенное значение и амплитуда чего? Де Бройль на эти вопросы не дал определенного ответа.

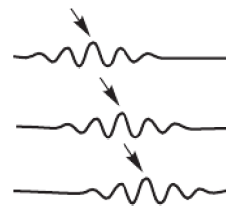


Рис. 29.9. Можно следить за движением максимума волнового пакета (густка волн, как на рисунке)

Теперь необходимо было разобраться в смысле волновой функции. Шрёдингер предположил, что наложением волновых функций образуется волновой пакет, который, по его мнению, и представляет движущуюся микрочастицу, так как, по де Бройлю, скорость группы волн равна скорости частицы.

Групповая скорость волны в обычных средах — «хорошее» понятие, поскольку с групповой скоростью ассоциируется перемещение энергии волнового пакета. Однако уже для двух частиц такая наглядная интерпретация оказалась невозможна. Волновой пакет с течением времени расплывается. Нужно было искать другую интерпретацию.

И вскоре она была найдена, а за этими волнами закрепилось другое название: волны вероятности. Необходимость вероятностного подхода к описанию

микрочастиц является важнейшей отличительной особенностью квантовой теории. Можно ли волны де Бройля истолковывать как волны вероятности, т. е. считать, что вероятность обнаружить микрочастицу в различных точках пространства меняется по волновому закону? Такое толкование волн де Бройля неверно хотя бы потому, что тогда вероятность обнаружить частицу в некоторых точках пространства может быть отрицательна, что не имеет смысла. Чтобы устранить эти трудности, немецкий физик М. Борн в 1926 году предположил, что по волновому закону меняется не сама вероятность, а величина, названная амплитудой вероятности. Амплитуда вероятности может быть комплексной, и вероятность W пропорциональна квадрату ее модуля.

В 1927 годы Гейзенберг и Борн пришли к выводу, что квадрат модуля волновой функции в любой точке пространства и в любой момент времени есть мера того, что соответствующая частица находится в этой точке и в этот момент. Иными словами, Борн и Гейзенберг предполагают существование частицы и связанной с ней непрерывной волны ψ , но частица не имеет ни определенной скорости, ни определенной траектории. Речь может идти лишь о вероятности нахождения частицы в той или иной области пространства. Эту вероятность и определяет волна ψ -функции — решение уравнения Шрёдингера.

Таким образом, вероятность dP обнаружить частицу в объеме dV можно записать в следующем виде $dP = A|\psi|^2 dV$. Здесь A — коэффициент пропорциональности. Так появилась возможность рассчитывать вероятность нахождения электрона-волны в разных точках пространства вокруг ядра.

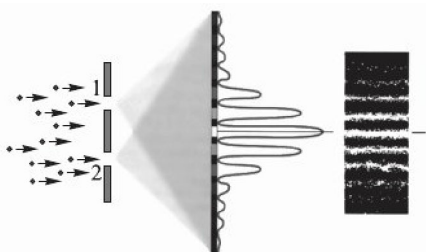


Рис. 29.10. Дифракция электронов на двух щелях

Дифракция электронов на двух щелях. Экспериментальные результаты, подтверждающие волновую природу электронов, получены в опытах по дифракции электронов на двух щелях, выполненных впервые в 1961 г. К. Йенсоном. Эти опыты — прямая аналогия опыта Юнга для видимого света. Схема опыта представлена на рис. 29.10. Поток электронов, ускоренных разностью потенциалов 40 кВ, после прохождения

двойной щели в диафрагме попадал на экран (фотопластинку). В тех местах, где электроны попадают на фотопластинку, образуются черные пятна. В результате попадания большого числа электронов на фотопластинку наблюдается типичная интерференционная картина в виде чередующихся максимумов и минимумов, полностью аналогичная интерференционной картине для видимого света.

Характерно, что все описанные результаты опытов по дифракции электронов наблюдаются и в том случае, когда электроны пролетают через экспериментальную установку поодиночке. Этого можно добиться при очень малой интенсивности потока электронов, когда среднее время пролета электрона от катода до фотопластинки меньше, чем среднее время между испусканием двух последующих электронов с катода. Последовательное попадание на фотопластинку всё большего и большего количества одиночных электронов постепенно приводит к возникновению четкой дифракционной картины (рис. 29.11).

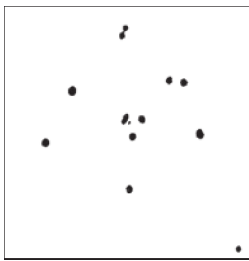


Рис. 29.11. Распределение дифрагировавших электронов по фотопластинке при небольшой длительности эксперимента

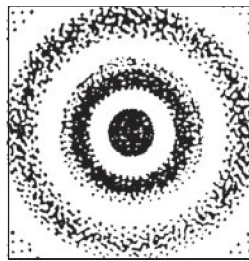


Рис. 29.12. Распределение дифрагировавших электронов по фотопластинке в случае длительного эксперимента

Эта картина не есть следствие взаимодействия электронов друг с другом.

Описанные результаты означают, что в данном эксперименте электроны, оставаясь частицами, проявляют также волновые свойства, причем эти волновые свойства присущи каждому электрону в отдельности, а не только системе из большого числа частиц. Все происходит так, как если бы электрон проходил через обе щели одновременно! А это возможно, если принять, что электрон не просто частица, а волна-частица. А волна может проходить через обе щели одновременно.

Соотношения неопределенности. Энергия квантов рентгеновских лучей много больше энергии квантов солнечных (из-за разницы в частотах). В то время как свет от Солнца, даже интенсивный, практически не воздействует на движение планет и позволяет нам спокойно вести их наблюдения, излучение рентгеновских микроскопов очень сильно влияет на движение исследуемых электронов, бомбардируя их фотонами высоких энергий. Очень доходчиво объясняет этот факт физик А. Воронель: «Когда мы из укрытия наблюдаем за прохожим, мы можем тешить себя мыслью, что он не заметит, куда упал луч света, отраженный от его тела. Но, если наблюдаемым объектом станет частица субатомных размеров, этот луч непременно (и необратимо) изменит ее судьбу, ибо действие луча света на электрон — это не меньше, чем удар ломом по голове человека».

Чем меньше детали объектов, которые мы собираемся рассматривать, тем энергичнее должны быть используемые фотоны (меньше длина волны). Этот факт имел странные последствия и привел в 1927 году к появлению соотношения неопределенности Гейзенберга (1901–1976). Согласно Гейзенбергу невозможно одновременно определить и положение, и скорость электрона (да и любой другой частицы). Более того, бессмысленно даже представлять электрон как объект, которому можно приписать положение и скорость, определенные совершенно точно в одно и то же время.

Действительно, представим мысленно, что мы хотим измерить положение электрона с помощью фотонов (или электронного микроскопа, рассуждения будут аналогичными). Так как точность наблюдения любого объекта не превышает длины волны используемого излучения, то для более точного измерения положения тела надо выбирать короткие волны. Но малая длина волны соответствует большей частоте и, следовательно, большей энергии. А чем больше энергия фо-

тонов, тем больший импульс они передают при соударении объекту и тем самым сильно и непредсказуемо влияют на движение и положение объекта. Таким образом, самый акт наблюдения вносит существенную неопределенность либо в положение, либо в импульс электрона.



Рис. 29.13. Вернер Гейзенберг

В этом и заключается принцип неопределенности Гейзенберга. Математически он записывается так: пусть Δx — среднеквадратичное отклонение координаты частицы M , движущейся вдоль оси x , и Δp — среднеквадратическое отклонение ее импульса; величины Δx и Δp связаны следующим неравенством: $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2\pi$.

Квантовая механика определяет границы, за которыми нельзя одновременно измерять такие величины; если бы мы знали точное местонахождение электрона, то о его скорости (на самом деле надо говорить о количестве движения, равном скорости, умноженной на массу) нам ничего бы не было известно. Образ частицы в виде материального шарика, перемещающегося вдоль вполне определенной орбиты, является всего лишь зрительным приближением. Но электрон не частица в буквальном смысле слова. Попытка представить его (да и любую другую элементарную частицу) в виде частицы — это упрощение, она и приведет к ограничениям, которые утверждает принцип неопределенности. Поэтому на основе представления электронов в виде частиц нельзя было объяснить, например, поведение электронов вблизи атомного ядра: в модели Бора наиболее глубокие атомные орбиты страдают как раз от этих ограничений — они слишком близко подходят к ядру. Поэтому при их описании надо учитывать, что электрон является волной. Если бы мы попытались поместить электрон внутрь ядра (которое чрезвычайно малых размеров), то он тут же обрел бы столь большую скорость, что немедленно оставил это ядро. Таким образом, квантовая механика объясняет стабильность атомов, ядер и всех других составных систем.

Соотношение неопределенности вызывало сильное неприятие со стороны Эйнштейна. Вот как вспоминает П. Эренфест это время: «Я восхищался диалогами между Бором и Эйнштейном. Это было похоже на игру в шахматы. Эйнштейн приводил все новые примеры мысленных конструкций вечного двигателя второго рода, чтобы опровергнуть соотношение неопределенностей. Бор, окутанный философскими клубами табачного дыма, находил все новые аргументы против примеров Эйнштейна. Эйнштейн, как чертик из табакерки, каждое утро являлся со свежими силами. О, это было восхитительно...»

Соотношения неопределенности являются фундаментальными соотношениями квантовой механики, устанавливающими предел точности одновременно определения некоторых пар физических величин. Они представляют собой следствие свойств квантовых систем, внутренне присущих им.

Квантовый гармонический осциллятор. Мы уже изучали гармонический осциллятор при рассмотрении механических колебаний в части 17. Примером таких колебаний в квантовой механике являются колебания атомов в твердых телах, молекулах и т. д. Гармонический осциллятор в квантовой механике представляет собой квантовый аналог простого гармонического осциллятора, при этом рассматриваются не силы, действующие на частицу, а полная энергия гар-

монического осциллятора, причем потенциальная энергия предполагается квадратично зависящей от координат (как и в случае классического аналога). Исследование соответствующего уравнения Шрёдингера для колеблющейся частицы приводит к интересному результату: уравнение решается только при значениях энергии $E_n = (n + 1/2) \hbar\omega_0$, где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Формула для E_n показывает, что энергия квантового осциллятора может иметь лишь дискретные значения, пропорциональные кванту действия (как говорят, квантуется). Энергия ограничена снизу отличным от нуля минимальным значением энергии: $E_0 = 1/2\hbar\omega_0$.

Существование минимальной энергии (она называется энергией нулевых колебаний) является типичной для квантовых систем и представляет собой прямое следствие соотношения неопределенностей. Вывод о наличии энергии нулевых колебаний квантового осциллятора противоречит выводам классической теории, согласно которой наименьшая энергия, которую может иметь осциллятор, равна нулю (соответствует покоящейся в положении равновесия частице). Например, классическая физика приводит к выводу, что при температуре $T = 0$ энергия колебательного движения атомов кристалла должна обращаться в нуль. Следовательно, должно исчезать и рассеяние света, обусловленное колебаниями атомов. Однако эксперимент показывает, что интенсивность рассеяния света при понижении температуры не равна нулю, а стремится к некоторому предельному значению, указывающему на то, что при $T \rightarrow 0$ колебания атомов в кристалле не прекращаются. Это является подтверждением наличия нулевых колебаний.

Из формулы, приведенной выше, следует, что уровни энергии линейного гармонического осциллятора расположены на одинаковых расстояниях друг от друга, а именно: расстояние между соседними энергетическими уровнями равно $\hbar\omega$. Но это еще не всё. Полученное решение приводит еще к одному значительному отличию от классического рассмотрения. Квантово-механический расчет показывает, что частицу можно обнаружить за пределами дозволенной области (см. рис. 29.14)!

Мир квантовой механики непривычен и удивителен, в нем не работают почти все стереотипы, отказывает здравый смысл. Квантовая механика имеет дело с миром субатомных частиц, где интуиция совершенно отказывается служить, и кажется, что природа разыгрывает с нами злые шутки. Один из ее фокусов — туннельный эффект. Эффект заключается в том, что микрочастица, например электрон, преодолевает потенциальный барьер, когда его полная энергия (остающаяся при туннелировании неизменной) меньше высоты барьера. Барьер создается электрическим напряжением или цепочкой атомов. Кажется естественным, что электрон должен отразиться от барьера, но иногда электрон отражается от барьера, хотя имеет энергию, вполне достаточную для его преодоления. Но уж совсем странно выглядит ситуация, когда электрон, не обладая энергией, достаточной

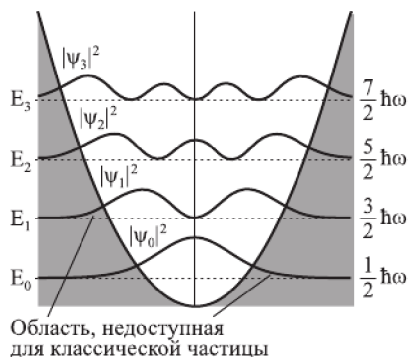


Рис. 29.14. Спектр энергий и квадраты модулей волновых функций квантового гармонического осциллятора



Рис. 29.15. К понятию барьерного эффекта

для прохождения через барьер, тем не менее удивительным образом оказывается по другую его сторону (рис. 29.15). Это никак не согласуется со здравым смыслом: электроны «туннелируют» сквозь энергетический барьер! Между тем именно такой фокус проделывают электроны! Эти удивительные явления создают впечатление, будто электрон ощущает окружающий его мир. Электроны каким-то образом ведут себя так, будто они находятся одновременно в нескольких различных местах. Важно сознавать, что все эти «дикийннне штучки» не просто домыслы умозрительной науки. Так, тун-

нельный эффект используется в некоторых микросхемах, например в туннельном диоде. Изобретение туннельного диода экспериментально подтвердило существование процессов туннелирования в твердых телах.

Туннельный эффект — явление исключительно квантовой природы, невозможное в классической механике и даже полностью противоречащее ей. Оно связано с так называемым дуализмом «волна—частица». Не надо забывать, что квантовая механика работает в области крайне малых размеров и длительностей.

Размер электрона не больше 10^{-18} метра; каков он в действительности, точно не известно, и приведенная величина — только верхний предел, установленный в недавних экспериментах.

Квантовая механика атома водорода. Квантовые числа. Волновые свойства электрона уравнение Шрёдингера учитывает автоматически. Математики задолго до 1926 года изучили дифференциальные уравнения подобного типа и тщательно разработали методы их решения. При решении волнового уравнения Шрёдингера для атома водорода естественным образом возникают три квантовых числа, обычно обозначаемых символами n , l и m_j . При этом уравнение решается, если эти параметры (n , l , m_j (квантовые числа)) принимают определенные целочисленные значения.

Квантовое число n — целое число, принимающее любые значения, большие 0, которое называется главным квантовым числом электрона. Оно соответствует числу, обозначавшему ранее различные боровские орбиты. Число l (орбитальное квантовое число) тоже целое и может принимать любые значения от 0 до $(n - 1)$. Из решения волнового уравнения следует, что разрешены только значения орбитального момента импульса электрона, равные

$$L_i = \sqrt{l(l+1)}\hbar/2\pi.$$

Третье квантовое число, m_j , называется магнитным квантовым числом и играет важную роль, когда атом находится в магнитном поле H . Из решения уравнения Шрёдингера следует, что момент импульса электрона L_i ориентируется в пространстве под действием поля напряженности H . При этом его проекция на направление внешнего магнитного поля H будет $\hbar m_j$. То есть квантуется не только орбитальный момент импульса, но и его проекция на направление магнитного поля. Проекция квантового числа m_j на направление поля H также должна быть

целым числом, m_j . Оно может принимать $(2l + 1)$ значений m_j : $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm l$. В модели Бора это соответствует заданию угла наклона θ плоскости электронной орбиты относительно направления магнитного поля, как показано на рис. 29.16: $\cos \theta = m_j/l$. Например, если $l = 3$, то существует $(2l + 1)$, т. е. 7 различных дискретных значений угла, которые могут составлять боровские орбиты с направлением H (рис. 29.16, б).

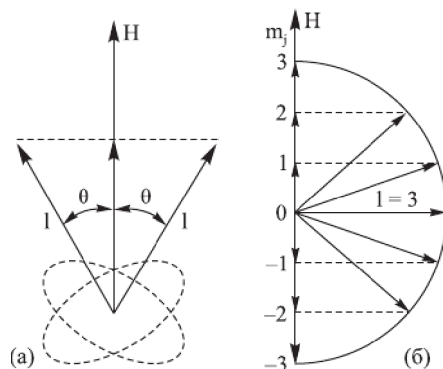


Рис. 29.16. Квантовые числа согласно волновой механике Шрёдингера: а) квантовое число l характеризует орбитальный момент импульса электрона; магнитное квантовое число m_j наряду с l определяет угол θ , под которым электронная орбита наклонена к направлению магнитного поля H ; б) при $l = 3$ квантовое число m_j принимает $(2l + 1)$ возможных значений, в данном случае 7

В то время, когда формировались идеи квантовой механики, спектроскопия более высокого разрешения показала, что многие линии представляют собой дублеты, которые не удастся объяснить, исходя из орбитального движения электронов. Особенно показательный пример — дублет желтых линий натрия 589,0 и 589,6 нм, который четко разделяется даже простыми спектрометрическими приборами. Для объяснения частого появления дублетов в линейчатых спектрах Дж. Уленбек (1900–1988) и С. Гаудсмит (1902–1978) выдвинули в 1925 году предположение, что электрон имеет собственный момент импульса, или спин, т. е. его можно представить себе вращающимся вокруг собственной оси одновременно с вращением по орбите вокруг ядра, аналогично вращению Земли при ее движении вокруг Солнца. Спин характеризуется еще одним квантовым числом — s . Поскольку вектор спинового момента импульса имеет $(2s + 1)$ различных ориентаций, а наблюдаемая кратность энергетических уровней равна двум, имеем $(2s + 1) = 2$, или $s = 1/2$. Проекция вектора s на некоторое выделенное направление (направление внешнего магнитного поля) характеризуются спиновым магнитным квантовым числом m_s , которое может быть равно либо $+1/2$, либо $-1/2$. Вращающийся вокруг собственной оси электрон подобен крошечному магниту с магнитным моментом $\mu_s = eh/(4\pi mc)$.

В конечном итоге получается 4 независимых квантовых числа, характеризующих состояние электрона в атоме: n — главное квантовое число; l — орбитальное квантовое число; m_j — орбитальное магнитное квантовое число; m_s — спиновое магнитное квантовое число.

Итак, подведем итог.

Главное квантовое число n может принимать значения 1, 2, 3, ..., оно характеризует электронный слой, в котором находится электрон, энергию электрона в этом слое, размеры пространства, в котором движется электрон, проявляя свои волновые свойства. Второе квантовое число — l — называют побочным, или орбитальным, квантовым числом. Оно характеризует орбитальный момент количества движения электрона при его движении в слое n и может принимать численные значения 0, 1, 2, ... вплоть до максимального $n - 1$. Чтобы было удобно выражать сразу набор квантовых чисел n и l , для последнего вместо чисел 0, 1, 2, 3, ... часто используются буквенные эквиваленты: s, p, d, f, ... Так, сочетание 1s означает, что $n = 1$, а $l = 0$. Если $n = 2$, а $l = 1$, то пишут 2p. l характеризует форму орбитали, на которой находится электрон. Третье квантовое число — m_l — называют магнитным. Оно определяет пространственную ориентацию момента количества движения электрона и принимает значения $-l, -l + 1, \dots, 0, 1, \dots, l$, а всего $2l + 1$ значений.

Итак, квантовые числа n и l характеризуют размер и форму электронного облака, а квантовое число m_l характеризует ориентацию электронного облака в пространстве. Если для атома водорода решать не уравнение Шрёдингера, а более точное уравнение Дирака (релятивистское волновое уравнение), то появляется еще одно квантовое число — спиновое, которое может принимать всего два значения ($+1/2$ и $-1/2$) и характеризует всего две возможные ориентации в пространстве собственного момента количества движения электрона (спина). Для изображения этого квантового числа часто используют стрелки, направленные вверх или вниз.

Вероятность обнаружения электрона в разных частях атома различна. Электрон при своем движении как бы «размазан» по всему объему, образуя электронное облако, плотность (густота) которого характеризует вероятность его нахождения.

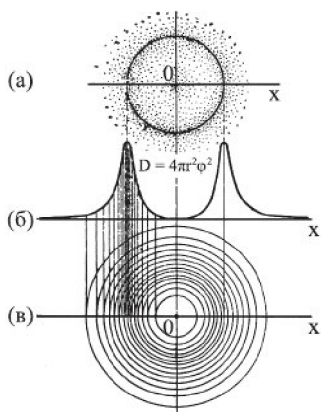


Рис. 29.17

На рис. 29.17 показана точками форма электронной орбитали атома водорода с $n = 1$. Окружность — это условное место максимальной вероятности местонахождения электрона; например, 90 или 95 % электронного облака сосредоточено в области, непосредственно прилегающей к этой окружности. Рисунок сделан на плоскости. В пространстве это будет шаровая поверхность, охватывающая ту же часть электронного облака⁵.

Интересно отметить, что максимум вероятности нахождения электрона в атоме водорода, т. е. радиус орбитали, точно совпадает с радиусом орбиты, вычисленной в предположении вращения электрона вокруг ядра, $r = 0,53 \cdot 10^{-10}$ м. Этим подтверждается волновое и корпускулярное поведение

⁵ Изображение электронного облака в виде зависимости его плотности D от радиуса очень наглядно, однако часто пользуются просто квадратом волновой функции Ψ^2 и строят диаграммы, откладывая Ψ^2 в зависимости от расстояния: $\Psi^2 = D/4\pi r^2$.

ние электрона. И можно также сделать заключение о том, что атом водорода может иметь одно и то же значение энергии, находясь в нескольких различных состояниях (n — одно и то же, а l и m_l — разные).

Все множество решений уравнений квантовой механики для атома водорода сведено в таблице 22. Может ли атомарный водород находиться в любом из тех состояний, которые представлены в этой таблице? Да, может. Но атомы водорода с одинаковой вероятностью не могут находиться в любом из этих состояний.

Таблица 22. Множество решений уравнений квантовой механики для атома водорода

n	l	m	s
1	0	0	$\pm 1/2$
2	0	0	$\pm 1/2$
	1	-1, 0, +1	$\pm 1/2$
3	0	0	$\pm 1/2$
	1	-1, 0, +1	$\pm 1/2$
	2	-2, -1, 0, +1, +2	$\pm 1/2$
4	0	0	$\pm 1/2$
	1	-1, 0, +1	$\pm 1/2$
	2	-2, -1, 0, +1, +2	$\pm 1/2$
	3	-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3	$\pm 1/2$

На рис. 29.18 изображены кривые распределения вероятности $D(r) = 4\pi r^2 |\Psi|^2$ обнаружения электрона в атоме водорода на различных расстояниях от ядра в состояниях 1s и 2s.

Как видно из рис. 29.18, электрон в состоянии 1s (основное состояние атома водорода) может быть обнаружен на различных расстояниях от ядра. С наибольшей вероятностью его можно обнаружить на расстоянии, равном радиусу r_1 первой боровской орбиты. Вероятность обнаружения электрона в состоянии 2s максимальна на расстоянии $r = 4r_1$ от ядра. В обоих случаях атом водорода можно представить в виде сферически симметричного электронного облака, в центре которого находится ядро (рис. 29.19).

Таким образом, в квантово-механической теории атома водорода формула для радиусов орбит электрона определяет наиболее вероятное расстояние электрона от ядра, хотя в принципе электрон может находиться на любом расстоянии: от 0 до бесконечности.

В земных условиях, в межзвездном пространстве наиболее стабильным для водорода является состояние с минимальной энергией, т. е. 1s-состояние. Может

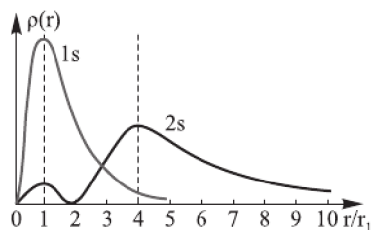


Рис. 29.18. Распределение вероятности обнаружения электрона в атоме водорода в состояниях 1s и 2s. $r_1 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ м — радиус первой боровской орбиты

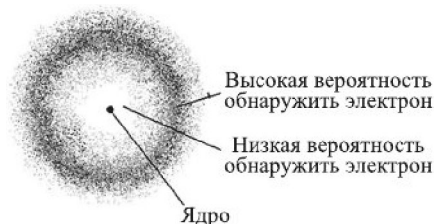


Рис. 29.19. Электронное облако атома водорода в основном состоянии $n = 1$

ли атом водорода переходить из одного состояния в другое? Да, может. Что происходит при таком переходе? По мере увеличения значения главного квантового числа энергия атома возрастает. Поэтому в солнечной атмосфере или в разрядной трубке при прохождении электрического тока атомы водорода могут переходить из основного $1s$ -состояния в возбужденные: $2s$, $2p$, $3s$, $3p$, $3d$, $4s$, $4p$, $4d$, $4f$ и т. д. Время жизни в возбужденных состояниях очень мало, и, испуская квант света $h\nu$, который уносит избыточную энергию, атом водорода возвращается в менее возбужденные состояния, или в $1s$ -состояние.

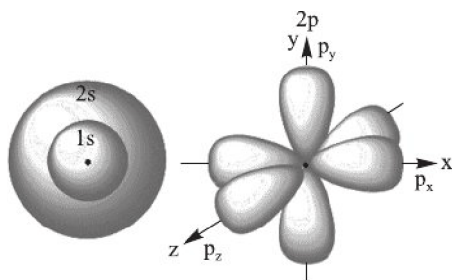


Рис. 29.20. Примерно такую форму в волновой модели атома имеют области вероятности существования электронов: s - и p -орбитали (d -орбитали имеют более сложную форму)

Таким образом, волновая Ψ -функция, описывающая движение электрона в атоме, представляет собой не одномерную, а пространственную волну, соответствующую трем степеням свободы электрона в пространстве, каждая из них имеет свои квантовые числа: n , l , m_l . В волновой модели орбиталь — это пространство около ядра, в котором можно обнаружить заселивший ее электрон с вероятностью, скажем, 95 %. За пределами этого пространства вероятность встретить такой электрон меньше 5 %. Полученные с помощью математического расчета такие области

вероятности нахождения в электронном облаке s - и p -электронов показаны на рис. 29.20.

Функцию распределения электрона в пространстве вычислить можно для различных состояний, но измерить ее довольно трудно. Большую часть информации о строении атома получают в результате изучения спектров испускания в различных условиях.

Сложные атомы. Принцип запрета Паули. Квантовомеханическое описание многоэлектронного атома даже в случае пренебрежения взаимодействием с внешним полем является задачей многих тел, до сих пор представляющую существенные трудности для квантовой механики. Ведь электрон в атоме, даже если пренебречь взаимодействия с внешним полем, не только притягивается ядром, но и отталкивается другими электронами. Математически это задача многих тел.

Значительную помощь в разрешении этой сложной задачи оказал принцип Паули. Изучая атомные спектры гелия (у которого два электрона), молодой физик Вольфганг Паули (1869–1955), уже успевший побывать ассистентом у Бора, обнаружил странный принцип запрета: электроны всячески избегали совместно занимать одну и ту же орбиту. Паули сформулировал в 1925 году следующий принцип для электронов: два электрона не могут находиться в атоме в одном и том же квантовом состоянии (то есть с набором одних и тех же квантовых параметров, квантовых чисел). Он предложил простое правило: в каждом отдельном квантовом состоянии может находиться только один электрон. Это означает, что набор чисел, отвечающих данным n , l и m_l , зависит от n . Например, при $n = 1$

возможно лишь $l = 0$; следовательно, $m_l = 0$ и единственное различие состояний связано с $m_s = +1/2$ и $-1/2$.

Как оказалось, принцип Паули имеет всеобщее значение и справедлив для любых атомов и систем, содержащих электроны. Этот принцип приводит к тому, что электроны в своем коллективном движении вокруг ядра образуют развитую конфигурацию «скорлупок», или оболочек: на одинаковом расстоянии от ядра может находиться вполне определенное небольшое семейство электронов; одинаковые, но по-разному наклоненные орбиты образуют общую для этого семейства электронную оболочку.

В принципе запрета выразилось своеобразие закономерностей микромира, не имеющей никаких параллелей в классической физике. Соответствие принципа Паули эксперименту было подтверждено огромным числом спектроскопических наблюдений, а также многочисленными данными электронной теории металлов, физики ядерных процессов, низкотемпературных явлений. Это один из наиболее фундаментальных объединяющих принципов физики, открывший путь к пониманию электронной структуры сложных атомов. Правда, принципом Паули определяется лишь возможность заполнения различных электронных оболочек, а для проверки фактического заполнения тех или иных состояний необходимы данные, полученные на основе оптических и рентгеновских спектров. Детальный анализ электронной структуры и распределения электронов с точки зрения квантовой механики и принципа Паули в тяжелых атомах весьма сложен. Тем не менее, с помощью принципа Паули стало возможным дать толкование Периодической системы элементов. В качестве примера процесс застройки электронных оболочек первых 10 элементов десяти элементов периодической системы представлен в таблице.



Рис. 29.21. Вольфганг Паули

Таблица 23

Элемент	K	L		M			N		Основной терм
	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	
1 H	1	—	—	—	—	—	—	—	$^2S_{1/2}$
1 He	2	—	—	—	—	—	—	—	1S_0
3 Li	2	1	—	—	—	—	—	—	$^2S_{1/2}$
4 Be	2	2	—	—	—	—	—	—	1S_0
5 B	2	2	1	—	—	—	—	—	$^2P_{1/2}$
6 C	2	2	2	—	—	—	—	—	3P_0
7 N	2	2	3	—	—	—	—	—	$^4S_{3/2}$
8 O	2	2	4	—	—	—	—	—	3P_2
9 F	2	2	5	—	—	—	—	—	$^2P_{3/2}$
10 Ne	2	2	6	—	—	—	—	—	1S_0

В настоящее время электронная структура атомов в принципе получила свое объяснение, хотя свойства многоэлектронных атомов удастся рассчитать лишь приближенно.

А теперь поговорим о важном практическом применении квантовой теории — о лазерах.

Лазеры. Обычный источник излучает свет во всех направлениях, так что интенсивность его излучения быстро убывает с расстоянием и свет некогерентен. Некогерентность света (случайное различие по фазе различных частей пучка) обусловлена тем, что возбужденные атомы испускают свет независимо друг от друга. В 1916 году А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона в атоме с верхнего (возбужденного) энергетического уровня на нижний может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода. Возникающее при этом излучение называют вынужденным или индуцированным. Вынужденное излучение обладает удивительным свойством. Оно резко отличается от спонтанного излучения. В результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном атом испускает еще один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении. На языке волновой теории это означает, что атом излучает электромагнитную волну, у которой частота, фаза, поляризация и направление распространения точно такие же, как и у первоначальной волны. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде, возрастает. С точки зрения квантовой теории, в результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона-близнеца. Именно индуцированное излучение является физической основой работы лазеров, рассматриваемых ниже. На рис. 29.22 схематически представлены возможные механизмы переходов между двумя энергетическими состояниями атома с поглощением или испусканием кванта света.

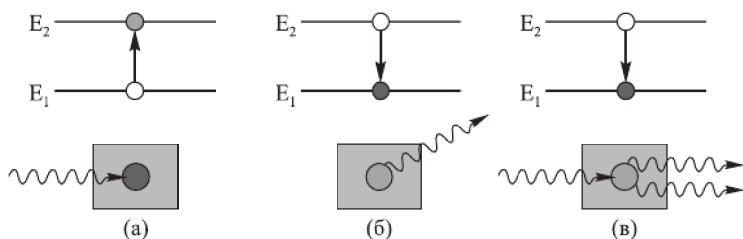


Рис. 29.22. Условное изображение процессов (а) поглощения, (б) спонтанного испускания и (в) индуцированного испускания кванта

Первая попытка экспериментально обнаружить индуцированное излучение была совершена в 1928 году, когда Рудольф Вальтер Ланденбург, изучая отрицательную дисперсию света, сформулировал условия обнаружения индуцированного излучения как преобладание его над поглощением (условие инверсии), отметив, что для этого необходимо специальное избирательное возбуждение квантовой системы. Чтобы проходящая через слой вещества волна усиливалась, нужно искусственно создать условия, при которых $n_2 > n_1$, т. е. создать инверсную населенность уровней. Среда, в которой создана инверсная населенность уровней, называется активной. Она может служить резонансным усилителем светового сигнала. Для того чтобы возникала генерация света, необходимо использовать обратную связь. Для этого активную среду располагают между двумя высокока-

чественными зеркалами, отражающими свет строго назад так, чтобы он многократно прошел через активную среду, вызывая лавинообразный процесс индуцированной эмиссии когерентных фотонов. При этом в среде должна поддерживаться инверсная населенность уровней. Этот процесс в лазерной физике принято называть накачкой. Начало лавинообразному процессу в такой системе при определенных условиях может положить случайный спонтанный акт, при котором возникает излучение, направленное вдоль оси системы. Через некоторое время в такой системе возникает стационарный режим генерации. Это и есть лазер (англ. — laser, сокр. от Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation — «усиление света посредством вынужденного излучения»). Лазерное излучение выводится наружу через одно (или оба) из зеркал, которое обладает частичной прозрачностью.

Исторически первый действующий лазер на рубине был построен американским физиком Теодором Майманом (1927–2007) в 1960 году.

Существуют различные способы получения среды с инверсной населенностью уровней. В рубиновом лазере используется оптическая накачка, атомы возбуждаются за счет поглощения света. Но для этого недостаточно только двух уровней. Каким бы мощным ни был свет лампы-накачки, число возбужденных атомов не будет больше числа невозбужденных. В рубиновом лазере накачка производится через уровень выше основного (E_1) — третий уровень. После вспышки мощной лампы, расположенной рядом с рубиновым стержнем, многие атомы хрома, входящего в виде примеси в кристалл рубина (около 0,05 %), переходят в возбужденное состояние со временем жизни порядка 10^{-8} с (уровень E_3), а затем переходят в промежуточное долгоживущее состояние третьего уровня (E_2) (время жизни — около 10^{-3} с). За счет этого создается перенаселенность этого уровня энергии по сравнению с невозбужденным.

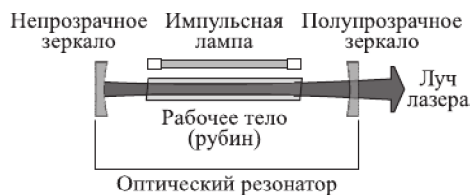


Рис. 29.23. Схема рубинового лазера

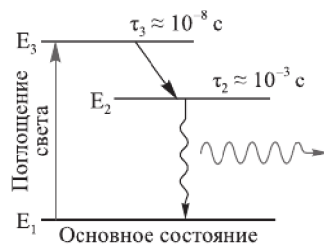


Рис. 29.24



Рис. 29.25. Устройство гелий-неонового лазера (Википедия)

Одним из самых распространенных в настоящее время является газовый лазер на смеси гелия и неона. Общее давление в смеси составляет порядка 10^2 Па при соотношении компонент He и Ne примерно 10 : 1. Активным газом, на котором в непрерывном режиме возникает генерация на длине волны 632,8 нм (ярко-красный свет), является неон. В этом лазере атомы возбуждаются приложенным к трубке высоким напряжением, которое вызывает электрический разряд в газе. Гелий — буферный газ, он участвует в механизме создания инверсной населенности одного из верхних уровней неона. Излучение He–Ne-лазера обладает

исключительной монохроматичностью. Расчеты показывают, что спектральная ширина линии генерации He-Ne-лазера составляет примерно $\Delta\nu \approx 5 \cdot 10^{-4}$ Гц. Это чрезвычайно малая величина.

Эти лазеры часто используются в лабораторных опытах по оптике. Лазеры имеют сейчас очень широкую сферу применения, начиная от медицины, военного дела и заканчивая музыкой (для записи и считывания сигналов на компакт-дисках).

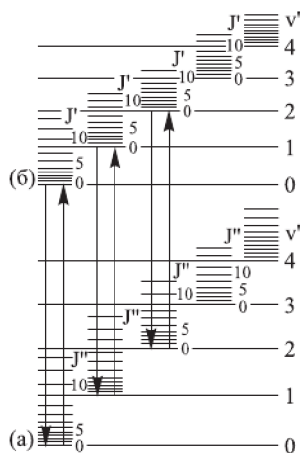


Рис. 29.26. Схема уровней энергии двухатомной молекулы: а и б — электронные уровни; u' и u'' — колебательные квантовые числа; J' и J'' — вращательные квантовые числа

Системы с большим числом атомов. Квантовая механика твердого тела. Мы рассмотрели применение квантовой механики к объяснению структуры атомов. При образовании молекулы энергетические уровни внешних электронов атомов изменяются из-за их взаимодействия друг с другом. С точки зрения квантовой механики молекула представляет собой систему не из атомов, а из электронов и атомных ядер, взаимодействующих между собой. Спектры молекул отличаются от спектров атомов. От линейчатых спектров атомов спектры молекул отличаются прежде всего по внешнему виду. Молекулярный спектр состоит из более или менее широких полос, образованных множеством тесно расположенных спектральных линий. Сложность полосатых молекулярных спектров, по сравнению с линейчатыми атомными спектрами, объясняется тем, что в молекулах наряду с движением электронов относительно ядер атомов, образующих молекулу (УФ и видимая области), имеются другие виды движения: колебания ядер в молекуле около положений равновесия (ИК-область) и вращение молекулы как целого (далекая

ИК- и СВЧ-области). Все эти виды движения квантованы, т. е. соответствующая им энергия может принимать только определенные дискретные значения.

Полная энергия молекулы E приближенно может быть представлена в виде суммы квантованных значений энергий трех видов ее движения:

$$E = E_{эл} + E_{кол} + E_{вращ}.$$

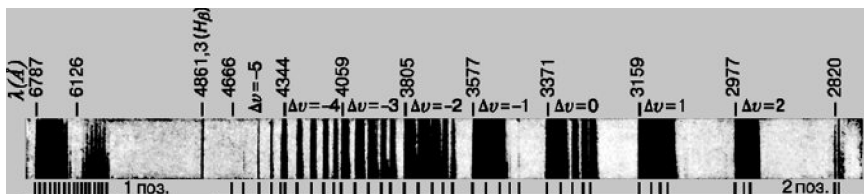


Рис. 29.27. Молекулярный спектр

Переходы между соответствующими уровнями энергии молекул приводят к появлению дополнительных линий в молекулярных спектрах по сравнению со спектрами атомов. С помощью очень хорошего спектрального аппарата можно

обнаружить, что каждая полоса представляет собой совокупность большого числа очень тесно расположенных линий. Конкретная структура молекулярных спектров различна для разных молекул и, как правило, усложняется с увеличением числа атомов в молекуле. Изучение таких спектров дает ценную информацию о строении молекул.

При объединении N атомов в кристаллы за счет взаимодействия с соседними атомами и электрическим полем кристаллической решетки отдельные энергетические уровни атомов расщепляются на N близко расположенных уровней (рис. 29.28). В 1928 году Ф. Блох (1905–1983) и Л. Бриллюэн (1889–1965) создали основы зонной теории твердых тел.

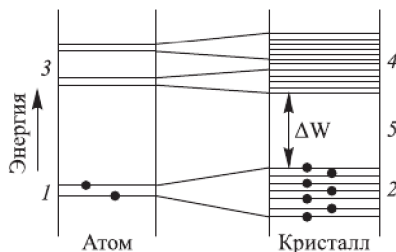


Рис. 29.28. Схема расположения энергетических уровней уединенного атома (слева) и твердого кристаллического тела

Согласно зонной теории из-за сближения атомов в кристалле на расстояния порядка размеров самих атомов их электроны рассматриваются как принадлежащие кристаллу в целом, а не какому-либо атому. В связи с этим дискретные уровни энергии атомов расширяются в полосы (энергетические зоны), состоящие из большого, но конечного числа N очень близко расположенных подуровней, где N — число атомов в кристалле. В соответствии с принципом Паули в каждой энергетической зоне может поместиться не более $2N$ электронов. Зоны разрешенных энергий могут быть отделены зонами запрещенных, но могут и перекрываться. При $T \rightarrow 0^\circ\text{K}$ все электроны занимают наиболее низкие зоны. Верхняя полностью заполненная зона называется валентной зоной, расположенная над ней пустая или заполненная частично — зоной проводимости. Интервалы запрещенных значений энергии между зонами (запрещенные зоны) зависят от природы кристалла и лежат в пределах от десятых долей эВ до нескольких эВ. Реальные напряженности внешнего электрического поля, прикладываемого к кристаллам, таковы, что электроны под действием поля не могут приобрести энергию, достаточную для перехода из одной зоны в другую. Электроны, полностью заполняющие все энергетические состояния, не могут под влиянием электрического поля изменять свою энергию и приобретать упорядоченное движение, т. е. не могут участвовать в проводимости кристалла. Наоборот, в частично заполненной зоне электроны ускоряются электрическим полем (переводятся на соседние вакантные уровни в зоне) и приходят в упорядоченное движение, образуя электрический ток. Электрические свойства кристаллов определяются заполнением зоны проводимости.

Как показывает эксперимент, свободные электроны при обычных температурах практически не покидают металл, что свидетельствует о наличии в поверхностном слое задерживающего поля. Однако испускание электронов нагретой поверхностью было известно давно. *Работой выхода* называется минимальная энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы вывести его из твердого тела в вакуум. С точки зрения классической физики наличие удерживающего поля объясняется возникновением на границе металла двойного электрического слоя, состоящего из положительных ионов и электронного облака, толщиной порядка 10^{-10} – 10^{-9} м, которое препятствует вылету электронов (см. с. 292).

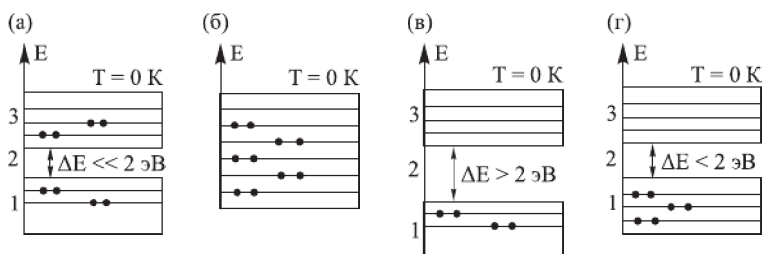


Рис. 29.29. Разделение твердых тел: (а, б) проводник; (в) диэлектрик; (г) полупроводник без примеси. 1 — заполненная или валентная зона; 2 — запрещенная зона; 3 — зона проводимости; если она пустая, то кристалл — диэлектрик или полупроводник, если же она частично заполнена, твердое тело является металлом

Согласно зонной теории при температурах вблизи абсолютного нуля должны быть заполнены последовательно без промежутков все энергетические состояния электронов, начиная с уровня с наименьшей энергией, и существует резкая граница между заполненными и свободными уровнями. При более высоких температурах эта граница размывается и ширина переходной зоны от практически полностью заполненных уровней до практически полностью свободных — порядка kT . Наивысший занятый электронами уровень называется уровнем Ферми, а соответствующая ему энергия — энергией Ферми. В соответствии с этим говорят, что электроны внутри твердого тела находятся в потенциальной яме, глубина которой равна работе выхода.

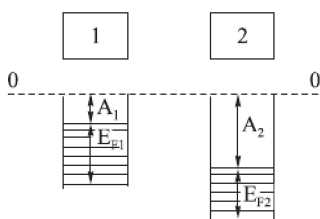


Рис. 29.30. Работа выхода и уровень Ферми двух металлов

Среднее расстояние между соседними энергетическими уровнями электронов проводимости чрезвычайно мало, порядка 10^{-22} эВ, причем вблизи дна «ящика» оно больше, чем вблизи уровня Ферми. Работа выхода электронов равна минимальной энергии, которую надо передать электрону, чтобы он вышел за пределы твердого тела, т. е. перешел в состояние с нулевой энергией. Ясно, что она равна разности потенциальных энергий $E_{\text{и}} = 0$ и уровня Ферми E_F , т. е. $A = E_{\text{и}} - E_F$ или $A = -E_F$. По квантовой теории, все электроны не могут находиться на дне «ям» даже при температуре $T = 0$ К. Они вынуждены «взбираться» вверх по «энергетической лестнице». Уровень Ферми тем выше, чем больше плотность электронного газа в металле.

Большие успехи у зонной теории — в объяснении свойств полупроводников, играющих решающую роль в современной электронике. Различие полупроводников и металлов проявляется в характере зависимости электропроводности от температуры.



Рис. 29.31. С понижением температуры проводимость металлов возрастает и для чистых металлов стремится к бесконечности при приближении к абсолютному нулю. У полупроводников, напротив, с понижением температуры проводимость убывает, а вблизи абсолютного нуля полупроводник становится изолятором.

В соответствии с зонной теорией это различие связано с шириной W_0 (или ΔE) запрещенной зоны (энергетической «щели») между «потолком» валентной зоны и «дном» зоны проводимости. Характерные значения ширины запрещенной зоны в полупроводниках составляют 0,1–4 эВ. Кристаллы с шириной запрещенной зоны более 4 эВ обычно относят к диэлектрикам. В последних электроны очень сильно связаны с ядрами атомов и под действием электрического поля редко отделяются от ядер, т. е. диэлектрики не проводят электрический ток.

Величину W_0 называют энергией активации собственной проводимости, так как для появления проводимости у такого кристалла необходимо, чтобы часть электронов была переведена из валентной зоны в зону проводимости, например за счет теплового возбуждения или фотоэффекта. Характерной особенностью чистых полупроводников является то, что при температуре $T = 0$ К они ведут себя как диэлектрики: их валентная зона полностью заполнена электронами, а следующая зона разрешенных уровней энергии полностью свободна. Собственная проводимость полупроводников обычно невелика, так как число свободных электронов, например, в германии при комнатной температуре порядка $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В то же время число атомов германия в $1 \text{ см}^3 \sim 10^{23}$. С повышением температуры у полупроводников растет число электронов, которые вследствие теплового возбуждения переходят в зону проводимости, чего не наблюдается у диэлектриков при аналогичной температуре.

К полупроводникам относятся элементы IV группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева, которые на внешней оболочке имеют четыре валентных электрона. Типичные полупроводники — германий (Ge) и кремний (Si). Они представляют из себя монокристаллы с элементарной ячейкой в виде тетраэдра. Эти вещества имеют ковалентную связь (это химическая связь между двумя электронами соседних атомов на внешней орбите). Ковалентная связь в таких структурах не очень прочная. При наличии внешнего фактора (например, температуры) она разрушается и появляются свободные электроны. Такой процесс называется генерацией, а обратный ему — рекомбинацией. Между двумя этими процессами имеется некоторое среднее время, называемое временем жизни носителей (τ). В момент образования свободного электрона в ковалентной связи появляется свободное место — «дырка» (hole), которая имеет положительный заряд. При помещении образца кристалла в электрическое поле происходит перемещение свободных носителей (электронов и дырок) во встречных направлениях. То есть проводимость состоит из электронной (σ_n) и «дырочной» (σ_p) составляющих и называется собственной проводимостью полупроводника.

В технике используются полупроводниковые кристаллы, в которых создаются области (разными методами: высокотемпературной диффузией, ионным внедрением и т. п.) с каким-то одним преимущественным типом проводимости. Для их создания в чистые полупроводники вводят примеси — проводят легирование. В качестве легирующих примесей применяют элементы V группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева (например, фосфор, мышьяк) и III-й (например, бор).

Элементы V группы имеют на внешней оболочке пять электронов. Поэтому в кристалле один электрон оказывается лишним. Примеси, при добавлении которых к полупроводнику образуются свободные электроны, называются донорны-

ми. Проводимость в полупроводнике с донорной примесью осуществляется за счет свободных электронов. Такой проводник называется полупроводником n-типа. Элементы III группы (бор, В) имеют на внешней оболочке три электрона. Поэтому, хотя атом бора и встроится в кристалл, одного электрона не будет хватать. Отсутствие электрона проводит к образованию «дырки» в кристалле, что равносильно появлению положительного заряда. Двигающиеся «дырки» рассматриваются как положительно заряженные носители, и полупроводники называются полупроводниками р-типа, а примеси — акцепторными.

Введение примесей в полупроводниковый материал может значительно уменьшить его электрическое сопротивление. Так, введение примеси бора в количестве 1 атом на сто тысяч атомов кремния уменьшает удельное электрическое сопротивление кремния приблизительно в тысячу раз, а примесь одного атома индия на 10^8 – 10^9 атомов германия уменьшает удельное электрическое сопротивление германия в миллионы раз.

При наличии в полупроводнике примесей его зонная структура изменяется. Так, примесь с валентностью большей, чем у основного полупроводника, — донорная, или n-типа примесь, соответствует появлению дополнительного уровня в запрещенной зоне с одним или двумя электронами вблизи дна зоны проводимости (рис. 29.32, б).

Если валентность примеси меньше валентности основного полупроводника, — акцепторная, или р-типа примесь, то появляется свободный уровень в запрещенной зоне вблизи потолка валентной зоны (рис. 29.32, в).



Рис. 29.32. Схемы энергетических уровней полупроводников:

- а) без примесей, ΔE — ширина запрещенной зоны; б) с донорной примесью, ΔE_n — энергетическое расстояние от донорного уровня до дна зоны проводимости;
- в) с акцепторной примесью, ΔE_p — энергетическое расстояние от потолка заполненной зоны до акцепторного уровня

В отличие от собственной электропроводности σ примесные проводимости σ_n и σ_p обеспечиваются носителями одного знака (электронами или дырками).

До сих пор при рассмотрении процессов в полупроводниках мы пользовались зонной картиной твердого тела, возникшей на базе квантовых представлений. Введя параметры, определяющие проводимость, время жизни и т. п., мы теперь с успехом можем описывать явления прохождения электрического тока и связанные с этим эффекты на основе классических представлений. Такое рассмотрение привело к пониманию многих явлений в полупроводниках и их широкому использованию в технике.

Полупроводниковый р–п-переход. В месте контакта двух областей полупроводников акцепторного и донорного типов образуется тонкий слой, называемый р–п-переходом. В этой области происходит переход от одного типа проводимости к другому (рис. 29.33).

Отличия этих областей в том, что левая из них содержит свободно перемещающиеся дырки, а правая — свободно перемещающиеся электроны. Вследствие теплового хаотического движения одна из дырок из левой области р-типа может попасть в правую область n-типа. В результате этого в правой области появится избыточный положительный заряд, а в левой области — избыточный отрицательный заряд (см. рис. 29.33). Аналогично: в результате теплового движения один из электронов из левой области может попасть в правую область. В результате этого в правой области также появится избыточный положительный заряд, а в левой области — избыточный отрицательный заряд.

Появление этих зарядов приведет к возникновению электрического поля E на границе областей полупроводника. Это поле будет отталкивать дырки р-области от границы раздела полупроводников, а электроны n-области — вправо от этой границы. Это электрическое поле приводит к некоторому стационарному состоянию, характеризующемуся переходной областью, обедненной носителями, которую называют р–п-переходом.

Появление этих зарядов приведет к возникновению электрического поля E на границе областей полупроводника. Это поле будет отталкивать дырки р-области от границы раздела полупроводников, а электроны n-области — вправо от этой границы. Это электрическое поле приводит к некоторому стационарному состоянию, характеризующемуся переходной областью, обедненной носителями, которую называют р–п-переходом.

Выпрямительные свойства р–п-перехода.

Сильно влияет на проводимость полупроводника характер его включения в электрическую цепь (полярность включения) (рис. 29.34)

При включении р–п-перехода в прямом направлении (рис. 29.34, а) дырки в левой области будут двигаться к границе раздела и электроны из правой области также будут двигаться к границе раздела. На границе они будут рекомбинировать. Ток на всех участках цепи обеспечивается основными носителями, сам р–п-переход обогащен носителями тока.

Проводимость р–п-перехода будет большой. Положительный полюс батареи будет постоянно «извлекать» электроны от полупроводника р-типа, образуя новые дырки, а отрицательный полюс подпитывает электронами n-область. В результате через полупроводниковый диод потечет сильный ток.

При включении р–п-перехода в обратном направлении (рис. 29.34, б) и дырки в левой области будут двигаться от границы раздела и электроны из правой области также будут двигаться от границы раздела. На границе раздела областей в итоге не останется основных носителей тока. Ток на этой границе будет обеспечиваться очень малым числом неосновных носителей, образовавшихся вблизи р–п-перехода. В этом случае ток через переход мал (равен нулю в идеальном случае).

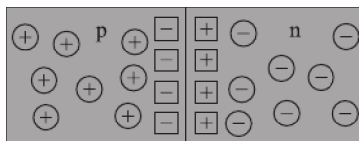


Рис. 29.33. Схематическое изображение р–п-перехода.

Кружками со знаками изображены подвижные носители заряда: электроны (–) и дырки (+), а квадратами — неподвижные ионы в области перехода. Переход образуется положительно заряженными атомами донорной примеси с n-стороны и отрицательно заряженными атомами акцепторной примеси с р-стороны

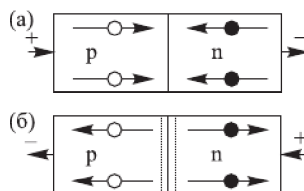


Рис. 29.34. Схема движения электронов и дырок при прямом (а) и обратном включении р–п-перехода



Рис. 29.35. Схема полупроводникового кремниевого диода. Ниже приведено его символическое изображение на электрических принципиальных схемах

Так как диод с р–n-переходом пропускает ток только в одном направлении, он может служить выпрямителем, преобразующим переменный ток в постоянный. Переменный ток, поданный на диод, будет протекать только в течение половины периода, и он работает как диод. Диоды — это устройства, которые проводят электрический ток только в одном направлении. Следовательно, р–n-переходы идеально подходят для их использования в диодных выпрямителях, преобразующих переменный ток в постоянный. Переменный ток, поданный на диод, будет протекать только в течение половины периода.

Для того чтобы получить выпрямление для двух полупериодов переменного тока, применяют двухполупериодный выпрямитель на двух (иногда и четырех) полупроводниковых диодах. На рис. 29.36 приведен один из видов электронных схем, служащих для выпрямления и детектирования токов и сигналов.

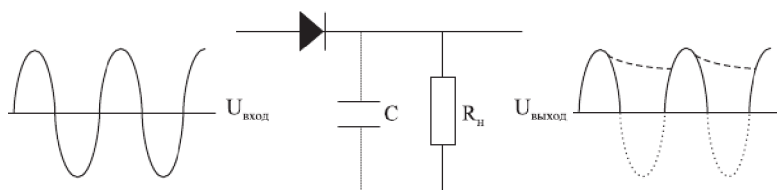


Рис. 29.36. Схема включения р–n-перехода для выпрямления и детектирования токов и сигналов

Чтобы получить огибающую сигнала, используют дополнительный конденсатор C , который, заряжаясь и разряжаясь, сгладит острые полуволны. По такой схеме работают простейшие выпрямители напряжения: устройства, преобразующие переменный ток в постоянный, и детекторы радиосигналов — устройства, позволяющие выделить огибающую высокочастотного сигнала, несущую полезную информацию.

Транзистор. Настоящий прорыв в области полупроводников произошел после открытия трех американских ученых. Джон Бардин, Вильям Шокли и Уолтер Браттейн получают Нобелевскую премию «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». Официально история транзистора звучит так: первое сообщение в печати о появлении полупроводникового усилителя-транзистора появилось в американской прессе в июле 1948 года. Его изобретатели — американские ученые Бардин и Браттейн. Они пошли по пути создания так называемого точечного транзистора на базе кристалла германия n-типа (в Советском Союзе А. В. Красилов и С. Г. Мадоян создали первый точечный транзистор в 1949 году, а первые промышленные образцы пошли в серию в 1950–1952 годах). Первый обнадеживающий результат они получили в конце 1947 года. Однако прибор вел себя неустойчиво, его характеристики отличались непредска-

зуюмостью, и поэтому практического применения точечный транзистор не получил. Прорыв произошел в 1951 году, когда Вильям Шокли создал свой более надежный плоскостной транзистор $n-p-n$ -типа, который состоял из трех слоев германия n -, p - и n -типа общей толщиной 1 см. Уже через несколько лет значимость изобретения американских ученых стала очевидной. Простой транзистор представляет собой кристалл определенного типа проводимости, расположенный между двумя кристаллами противоположного типа. Эти области, входящие в состав транзистора, называются эмиттером, базой и коллектором. База располагается между эмиттером и коллектором.

В зависимости от типа транзистора база может быть либо n -типа, либо p -типа. На рис. 29.37 приведен транзистор $n-p-n$ -типа.

Если к эмиттеру приложить минус, а к базе — плюс, то начинается инжекция (впрыскивание) электронов. Каждый из переходов по своим электрическим свойствам аналогичен $p-n$ -переходам полупроводниковых диодов и открывается при таких же прямых напряжениях на них. Работа транзистора приведенного типа весьма похожа на работу вакуумного триода, где эмиттер выполняет функцию анода, коллектор — катода, а база — функцию сетки. Если на эмиттер приложить минус, а на базу плюс, начинается инжекция электронов из эмиттера в базу.

При прохождении базы электроны могут рекомбинировать, вследствие чего создается ток «эмиттер–база». С этой целью толщина базы делается меньше длины дрейфа носителей заряда за время их жизни τ . Таким образом, большая часть инжектированных носителей успевает достичь перехода «коллектор–база» и втягивается электрическим полем в коллектор. Через транзистор начинает течь ток.

Если напряжение с пары «база–эмиттер» снимается, электроны перестают втягиваться в область между коллектором и эмиттером, проводящий канал разрушается и транзистор перестает пропускать ток — «выключается». Таким образом, транзистор может находиться в двух состояниях: «включено» и «выключено». Такое двоичное поведение транзистора используется при обработке информации в компьютере. Движущихся частей в транзисторах нет, переключение из выключенного состояния во включенное и обратно происходит с помощью управляющего тока на эмиттере.

Одновременно с появлением классического биполярного транзистора развивалось направление, основанное на использовании в активной структуре окисла полупроводника, имеющего свойства диэлектрика. Это так называемые МДП-транзисторы (от слов «металл–диэлектрик–полупроводник»). В этих структурах управление осуществляется не током, а напряжением. Вследствие этого они имеют ряд преимуществ перед биполярными транзисторами, в первую очередь вследствие малого энергопотребления.

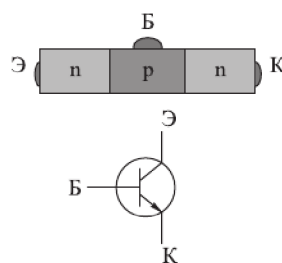


Рис. 29.37



Рис. 29.38. Джон Бардин, Уильям Шокли и Уолтер Браттейн рассматривают в микроскоп свой первый транзистор (показан на снимке вверху)

Совершенствование методов нанотехнологии привело к уменьшению размеров структур, что дало возможность создать полностью твердотельные микросхемы с размерами элементов в 1 мкм и менее. Использование таких кристаллов позволило создать микроЭВМ, без которых трудно себе представить рабочее место в любой человеческой деятельности. Уменьшение массогабаритных характеристик аппаратуры сделало реальностью как создание мобильной связи в руках сотен миллионов людей на земном шаре, так и освоение ближнего и дальнего космоса. Но это лишь первые шаги разворачивающейся на наших глазах очередной научно-технической революции. Плоды этой революции увидят наши ближайшие потомки.

Как вы, наверное, заметили, наше путешествие по физике изобилует множеством интересных и важных открытий. Мы уже ознакомились с теорией, давшей удовлетворительные объяснения строению атомов, молекул и твердых тел. Эти открытия привели к выдающимся практическим приложениям теории. С каждым шагом нашего движения мы все глубже проникаем в самые сокровенные тайны материи. И вот уже подошли к изучению самой сердцевины атома — к атомному ядру.

При написании раздела, описывающего полупроводники, принимал участие С. Е. Горский, который не только сделал ряд важных замечаний, но и определил во многом характер изложения материала.

30. *Опыты Резерфорда и атомное ядро. Первая ядерная реакция. Протон. Обнаружение нейтрона. Протон-нейтронная модель ядра. Энергия связи. Ядерные силы. Дефект масс. Закон радиоактивного распада. Альфа-, бета- и гамма-распады. Радиоактивные ряды. Радиоактивное датирование. Искусственная радиоактивность. Ядерные реакции. Деление ядер. Цепная реакция. Капельная модель. Атомный реактор. Ядерный синтез. «Посуда» для плазмы.*

Об элементарных частицах, как составных частях атома, стали говорить на рубеже XIX–XX веков. Указание на существование какой-то внутренней структуры ядра появилось уже после открытия Беккерелем радиоактивности. Оказалось, что уран, а затем радий, полоний испускают не только электромагнитное излучение различной частоты, не только электроны (бета-распад), но и более тяжелые частицы (альфа-лучи). А они могли исходить лишь из массивной части атома.

7 марта 1911 года Резерфорд сделал в философском обществе Манчестера доклад «Рассеяние альфа- и бета-лучей и строение атома». В докладе он, в частности, говорил: «Рассеяние заряженных частиц может быть объяснено, если предположить такой атом, который состоит из центрального электрического заряда, сосредоточенного в точке и окруженного однородным сферическим распределением противоположного электричества равной величины. При таком устройстве альфа- и бета-частицы, когда они проходят на близком расстоянии от центра атома, испытывают большие отклонения, хотя вероятность такого откло-

нения мала». В последующие годы физики занялись исследованием ядра и самой сердцевины — составных частей ядра атома. Первое представление об истинных размерах ядра давали опыты Резерфорда по рассеянию альфа-частиц в тонких металлических фольгах. Частицы глубоко проникали сквозь электронные оболочки и отклонялись, приближаясь к заряженному ядру. Эти опыты явно свидетельствовали о малых размерах центрального ядра и указали на способ определения ядерного заряда. Резерфорд установил, что альфа-частицы приближаются к центру положительного заряда на расстояние порядка 10^{-14} м, а это позволило ему сделать вывод, что таков максимально возможный радиус ядра. Радиус ядра на несколько порядков меньше размера атома (порядка 10^{-10} м.)

Важным следствием теории Резерфорда было указание на заряд атомного центра, который Резерфорд положил равным $\pm Ne$. Заряд оказался пропорциональным атомному весу. «Точное значение заряда центрального ядра не было определено, — писал Резерфорд, — но для атома золота оно приблизительно равно 100 единицам заряда».

Из последующих исследований и экспериментов Гейгера и Мардсена, предпринявших проверку формул Резерфорда, возникло представление о ядре как об устойчивой части атома, несущей в себе почти всю массу атома и обладающей положительным (Резерфорд считал знак заряда неопределенным) зарядом. При этом число элементарных зарядов оказалось пропорциональным атомному весу. Заряд ядра оказался важнейшей характеристикой атома. В 1913 году было показано, что заряд ядра совпадает с номером элемента в таблице Менделеева. Бор писал: «С самого начала было ясно, что благодаря большой массе ядра и его малой протяженности в пространстве сравнительно с размерами всего атома строение электронной системы должно зависеть почти исключительно от полного электрического заряда ядра. Такие рассуждения сразу наводили на мысль о том, что вся совокупность физических и химических свойств каждого элемента может определяться одним целым числом...»

Структура атомного ядра. В 1919 году Резерфордом было сделано новое сенсационное открытие — расщепление ядра. Сделано это открытие было не случайно. Вот что Резерфорд писал Бору в Данию (9 декабря 1916 года): «Время от времени мне удается урвать свободные полдня, чтобы провести некоторые из моих собственных экспериментов, и я думаю, что получил результаты, которые в конце концов окажутся чрезвычайно важными. Мне очень хотелось бы обсудить все эти вещи вместе с вами здесь. Я обнаруживаю и подсчитываю легкие атомы, приводимые в движение альфа-частицами, и эти результаты, как мне кажется, проливают яркий свет на характер и распределение сил вблизи ядра. Я также пытаюсь этим же методом взломать атом. В одном из опытов результаты представляются обнадеживающими, но потребуется уйма работы, чтобы их подтвердить...»

В этом письме Резерфорд скромно говорит о своих попытках «взломать атом». И это ему удалось: Резерфорд в Манчестерской лаборатории расщепил атомное ядро. Вот как это происходило. Резерфорд изучал столкновение альфа-частиц с легкими атомами. Столкновения альфа-частицы с ядрами таких атомов должны их ускорять. Так, при ударе альфа-частицы о ядро водорода оно увеличивает свою скорость в 1,6 раза, и ядро отбирает у альфа-частицы 64 % ее энергии.

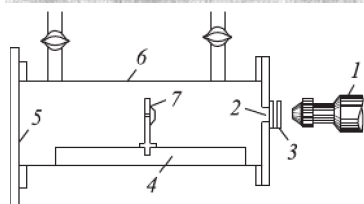
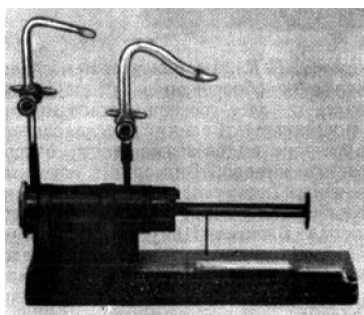


Рис. 30.1. Схема и установка Резерфорда

Для своего эксперимента Резерфорд использовал собственноручно построенный прибор, с помощью которого ему удалось впервые расщепить ядра атомов легких элементов. Этот прибор, а также его схема показаны на рис. 30.1. Латунная трубка 6 длиной 20 сантиметров с двумя кранами наполняется газом. Внутри трубки находится диск радиоактивного излучателя 7, испускающего альфа-частицы. Диск этот укреплен на стойке,двигающейся по рельсу 4. Во время опыта один конец трубки закрывался матовой стеклянной пластинкой 5, а другой конец — латунной пластинкой (прикрепляемой воском). Маленькое прямоугольное отверстие в латунной пластинке закрывалось серебряной пластинкой 3. Серебряная пластинка обладала способностью задерживать альфа-частицы, эквивалентна слою воздуха толщиной примерно 5 сантиметров. Против отверстия помещался люминесцирующий экран из цинковой обманки.

Для счета сцинтилляций использовалась зрительная труба 1.

В продолжении 1919 года в экспериментах по рассеянию альфа-частиц на различных мишенях Э. Резерфорд обнаружил, что при бомбардировке ядер азота из него вылетают положительно заряженные частицы. Величина заряда этих частиц по абсолютной величине была равна величине заряда электрона, но противоположна по знаку. Масса частицы была почти в 2000 раз больше массы электрона. С помощью многочисленных опытов Резерфорд показал, что в результате таких столкновений получаются частицы с максимальным пробегом, таким же, как у атомов водорода. «Из полученных до сих пор результатов, — писал Резерфорд, — трудно избежать заключения, что атомы с большим пробегом, возникающие при столкновении альфа-частиц с азотом, являются не атомами азота, но, по всей вероятности, атомами водорода или атомами с массой 2. Если это так, то мы должны заключить, что атом азота распадается вследствие громадных сил, развивающихся при столкновении с быстрой α -частицей, и что освобождающийся водородный атом образует составную часть атома». Повторение опыта на других мишенях показало, что положительно заряженные частицы вылетают и из других атомных ядер. В следующем году ядра атома водорода были названы Резерфордом протонами («протон» по-гречески означает «простейший», «первичный»). Были и другие предложения по поводу названия. Так, например, предлагалось название «барос» («барос» по-гречески означает «тяжесть»). Но протон — это простейшее ядро — ядро самого легкого изотопа водорода. (Изотопы — разновидности атомов (ядер) одного химического элемента с разным количеством нейтронов (о нейтроне поговорим далее) в ядре. Название связано с тем, что изотопы находятся в одном и том же месте (в одной клетке) таблицы Менделеева.) Это название оказалось очень удачным и прижилось быстро. Пожалуй, это один из наиболее удачных терминов в физике элементарных частиц. Э. Резерфорду удалось осуществить то, что в течение многих веков пытались

сделать алхимики — превратить одно вещество в другое. Ядро азота превращалось в ядро кислорода. Это была первая ядерная реакция, осуществленная искусственно в лабораторных условиях. В то же время стало ясно, что протоны следует считать элементарными частицами, входящими в состав атомного ядра. Измерения масс атомов с помощью масс-спектрометра Ф. Астона, который был сконструирован в 1919 году, показали, что массы всех исследованных атомов с большой точностью пропорциональны массе протона. Отсюда сделали вывод, что протоны входят составной частью в ядро атома. Так родилась протонно-электронная модель ядра. Таким образом, протоны — это частицы с единичным положительным зарядом и массой, в 1840 раз превышающей массу электрона. Масса протона оказалась равной $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, заряд равен заряду электрона в силу нейтральности атома.



Рис. 30.2. Алхимия

Масса атома, выраженная в килограммах или граммах, называется абсолютной атомной массой. Чаще пользуются относительной атомной массой, которая выражается в атомных единицах массы (а. е. м.). В 1961 году между химиками и физиками было достигнуто соглашение, согласно которому наиболее распространенному изотопу углерод-12 были приписаны 12,00000 а. е. м. Поскольку число атомов в 1 моле изотопа равно числу Авогадро N_A , получаем 1 а. е. м. = $1/N_A = 1/6,025 \cdot 10^{23} \approx 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг.

Таким образом, относительная атомная масса представляет собой отношение массы какого-нибудь атома к массе 1/12 части атома углерода. Иногда говорят более коротко: атомный вес. Относительная атомная масса и атомный вес фактически безразмерные величины (масса какого-либо атома делится на массу части атома углерода), поэтому обозначение «а. е. м.» после численного значения обычно опускают (но можно и написать, в этом не будет ошибки). Термины «*относительная атомная масса*», «*атомная масса*», «*атомный вес*» в научном химическом языке обычно используются равноправно и между ними просто не делают различий.

Плотность вещества в ядре фантастически велика — порядка 10^{13} – 10^{14} г/см³. Спичечный коробок, наполненный веществом такой плотности, весил бы 2,5 миллиарда тонн! Внешние размеры атома — это размеры гораздо менее плотного электронного облака, которое примерно в 100 000 раз больше диаметра ядра.

Итак, из двух частиц — протона и электрона — родилась протон-электронная модель ядра. Однако экспериментальные данные по массам атомных ядер, их магнитным моментам и другим характеристикам настойчиво указывали на трудности в объяснении этих данных с помощью предложенной модели. Протон-электронная модель ядра ушла со сцены в 1932 году.

Год 1932-й был решающим годом в развитии физики ядра и элементарных частиц. За два года до этого, в 1930 году, В. Боте (1891–1954) и Г. Беккер (1887–1955), работавшие в Германии и продолжавшие исследования, начатые Резерфордом, обнаружили, что, если высокоэнергетичные альфа-частицы, испускаемые полонием-210, попадают на некоторые легкие элементы, в особенности

на бериллий или литий, образуется излучение с необычно большой проникающей способностью (рис. 30.3). Сначала считалось, что это гамма-излучение, но выяснилось, что оно обладает гораздо большей проникающей способностью, чем все известные гамма-лучи, и результаты эксперимента не могут быть таким образом интерпретированы. В 1932 году английский физик Д. Чедвик (1891–1974) показал, что это новая, до сих пор неизвестная нейтральная частица с массой, приблизительно равной массе протона. На рис. 30.3 приведена упрощенная схема установки для обнаружения нейтронов.

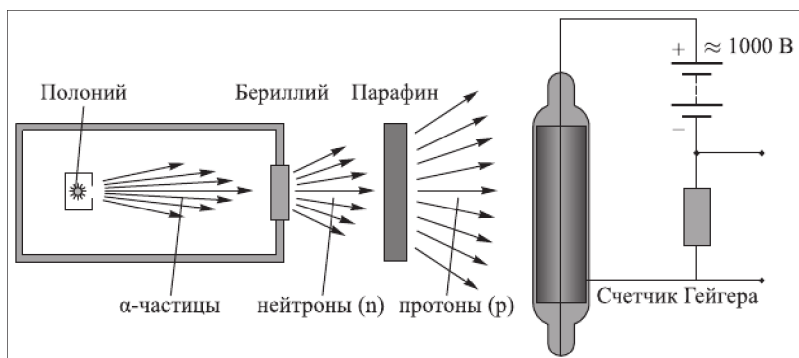


Рис. 30.3. Схема установки для обнаружения нейтронов

Обнаруженная частица была названа нейтроном. Это произошло 28 апреля 1932 года в Лондонском королевском обществе. Резерфорд сразу же оценил это открытие с точки зрения понимания строения ядра. Относительно нейтронов были сделаны важные открытия. Во-первых, в 1933 году Ф. и И. Жолио-Кюри впервые вычислили массу нейтронов, показав, что она больше протона, то есть нейтрон оказывается неустойчивым и может превращаться в протон (см. таблицу 24). Их заряды и массы в кг и в специальных атомных единицах массы (а. е. м.) показаны в таблице 24.

Таблица 24. Субатомные частицы

Частица	Заряд	Масса	
		кг	а. е. м.
Протон	+1	$1,67 \cdot 10^{-27}$	1,00728
Нейтрон	0	$1,67 \cdot 10^{-27}$	1,00867
Электрон	-1	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,000549

Нейтрон — это элементарная частица. Ее не следует представлять в виде компактной протон-электронной пары, как первоначально предполагал Резерфорд. Масса нейтрона приблизительно на две электронные массы превосходит массу протона.

Сразу после открытия нейтрона Д. Иваненко (1904–1994) и В. Гейзенберг независимо выдвинули гипотезу, что атомное ядро состоит из нейтронов и протонов. Эта модель выдержала испытания временем, и, как показывают эксперимен-

тальные наблюдения, в обычных условиях отклонения от протонно-нейтронной модели, связанные с внутренней структурой протонов и нейтронов, невелики.

Ради исторической справедливости заметим, что к протон-нейтронной модели ядра приложил руку талантливый ученый с трагической судьбой — Этторе Майорана (1906–1938). По воспоминаниям Бруно Понтекорво, Ферми говорил: «Если физический вопрос поставлен, никто в мире не способен ответить на него лучше и быстрее, чем Майорана». Он, по свидетельству Ферми и Сегре, первым пришел к правильной интерпретации эксперимента супругов Жолио-Кюри еще до опытов Чедвика (см. «На кого упало яблоко»).

Итак, кроме протонов в состав ядра большинства атомов входят нейтроны, не несущие никакого заряда. Масса нейтрона практически не отличается от массы протона. Вместе протоны и нейтроны называются нуклонами (от латинского *nucleus* — «ядро»). Сумма масс тяжелых частиц (нейтронов и протонов) в ядре атома какого-либо элемента называется массовым числом и обозначается буквой A . Из названия этой величины видно, что она тесно связана с округленной до целого числа атомной массой элемента:

$$A = Z + N.$$

Здесь A — массовое число атома (сумма протонов и нейтронов), Z — заряд ядра (число протонов в ядре), N — число нейтронов в ядре. Масса ядра практически равна массе атома. Число протонов в ядре (Z) называют атомным номером. У нейтрального атома число электронов, обращающихся вокруг ядра, равно атомному номеру Z .

Заряд определяет химический элемент. Величина заряда ядра равна произведению элементарного заряда на зарядовое число ядра, равное порядковому номеру элемента.

В ядрах одного атома число нейтронов может быть различным, а число протонов одно и то же. Например, в ядрах углерода число протонов всегда 6, а число нейтронов может быть равно 5, 6, 7, 8, 9 и даже 10. Ядра, содержащие одинаковое число протонов, но различное число нейтронов, как уже упоминалось выше, называются изотопами.

Поскольку внутри ядра свойства нейтронов и протонов уравниваются и все они одинаково взаимно притягиваются, ядро должно представлять из себя сферу с максимально плотной упаковкой нуклонов. В геометрии данная 3-мерная упаковка шаров давно известна и называется ромбоэдральной. В ней каждый шар соприкасается сразу с 12 соседними. Получается она путем последовательного наложения друг на друга слоев из наиплотнейших плоских упаковок шаров, которые можно изобразить как на рис. 30.5.

При этом, при наложении, каждый новый слой смещается таким образом, чтобы его шары попали в углубления нижнего слоя. Радиус ядра вычисляется по формуле

$$R = a[3/(4\pi/2)]^{1/3}(A)^{1/3},$$

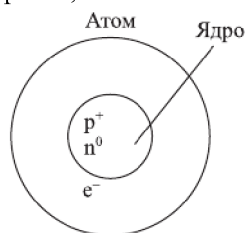


Рис. 30.4. Модель атома после открытия нейтрона

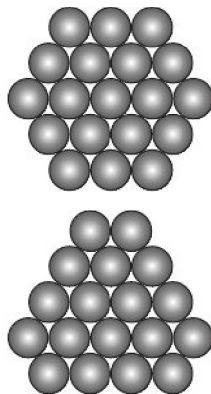


Рис. 30.5

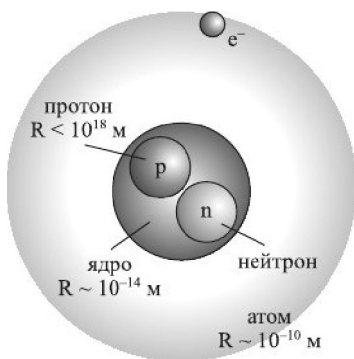


Рис. 30.6

где a — расстояние между центрами соседних шаров-нуклонов, A — количество нуклонов. Как следует из этой формулы, радиус ядра пропорционален кубическому корню из A . Исследования по рассеянию электронов на ядрах показали, что ядра имеют приблизительно сферическую форму, а радиус ядра приближенно равен

$$R \approx (1,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}) A^{1/3},$$

то есть весьма близко к оценочному соотношению, полученному выше.

В ядерной физике используют единицу, называемую «ферми»: 1 ферми = 10^{-13} см. Тогда приблизительно размер ядра атома записывается так:

$$R = 1,3A^{1/3} \text{ ферми.}$$

На рис. 30.6 показаны размеры основных частиц, составляющих атом.

Так как линейный размер ядра пропорционален корню кубическому из A , а следовательно, объем пропорционален A , то оказалось, что для всех ядер с $A > 10$ средняя плотность распределения нуклонов практически одинакова.

Энергия связи и ядерные силы. Ядра атомов представляют собой сильно связанные системы из большого числа нуклонов. Протоны, имеющиеся в ядре, отталкиваются друг от друга кулоновскими силами. Однако это не приводит к разрушению ядер. Очевидно, между нуклонами в ядре действуют силы притяжения незлектрической природы. Эти силы получили название *ядерных*. Взаимодействие нуклонов получило название *сильного взаимодействия*. Ядерные силы примерно на три порядка превосходят электростатические силы и на десятки порядков превосходят силы гравитационного взаимодействия нуклонов.

Основные свойства ядерных сил

1. Это короткодействующие силы, действуют на расстояниях между нуклонами порядка 10^{-15} м и резко убывают при увеличении расстояния; при расстояниях $1,4 \cdot 10^{-15}$ м они уже практически равны нулю. То есть они действуют практически лишь в пределах размера ядра.

2. Это самые мощные силы из всех, которыми располагает природа, поэтому взаимодействие частиц в ядре часто называют сильными взаимодействиями.

3. Ядерным силам свойственно насыщение, т. е. нуклон взаимодействует не со всеми остальными нуклонами, а лишь с некоторыми ближайшими соседями.

4. На основании опытных данных можно заключить, что протоны и нейтроны в ядре в отношении сильного взаимодействия ведут себя одинаково, т. е. ядерные силы не зависят от наличия или отсутствия у частиц электрического заряда.

Это значит, что с одинаковой по модулю силой притягиваются друг к другу и заряженные, и незаряженные частицы, т. е. сила притяжения F_{pp} между двумя протонами равна силе притяжения F_{nn} между двумя нейтронами и равна силе притяжения F_{pn} между протоном и нейтроном.

Здесь стоит напомнить, что различают четыре вида фундаментальных взаимодействий в природе: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.

Сильное взаимодействие происходит на уровне атомных ядер и представляет собой взаимное притяжение и отталкивание их составных частей. *Электромагнитное взаимодействие* примерно в тысячу раз слабее сильного, но значительно более дальнедействующее. Взаимодействие такого типа свойственно электрически заряженным частицам. Носителем электромагнитного взаимодействия является не имеющий заряда фотон — квант электромагнитного поля. В процессе электромагнитного взаимодействия электроны и атомные ядра соединяются в атомы, атомы — в молекулы. В определенном смысле это взаимодействие является основным в химии и биологии.

Слабое взаимодействие возможно между различными частицами. Оно простирается на расстояние порядка 10^{-15} – 10^{-22} см и связано главным образом с распадом частиц, например с происходящими в атомном ядре превращениями нейтрона в протон, электрон и антинейтрино. В соответствии с современным уровнем знаний большинство частиц нестабильны именно благодаря слабому взаимодействию.

Гравитационное взаимодействие — самое слабое, не учитываемое в теории элементарных частиц, поскольку на характерных для них расстояниях порядка 10^{-13} см оно дает чрезвычайно малые эффекты.

В космических масштабах гравитационное взаимодействие имеет решающее значение. Радиус его действия неограничен.

Таблица 25. Фундаментальные взаимодействия

Взаимодействие	Радиус, см	Константа взаимодействия (порядок величины)	Пример проявления
сильное	10^{-13}	1	ядро
электромагнитное	∞	10^{-2}	атом
слабое	10^{-16}	10^{-6}	γ -распад
гравитационное	∞	10^{-38}	сила тяжести

Все четыре взаимодействия необходимы и достаточны для построения нашего такого разнообразного мира.

Важнейшую роль в ядерной физике играет понятие *энергии связи ядра*. Энергия связи ядра равна минимальной энергии, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные частицы. Из закона сохранения энергии следует, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц. Энергию связи любого ядра можно определить с помощью точного измерения его массы. В настоящее время физики научились измерять массы частиц — электронов, протонов, нейтронов, ядер и других частиц с очень высокой точностью. Эти измерения показывают, что масса любого ядра $M_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:

$$M_{\text{я}} < Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}},$$

где m_{p} и m_{n} — массы протона и нейтрона, а Z и N — их количество в ядре соответственно. Разность масс $\Delta M = Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}}$ называется *дефектом массы*. Рассчитать энергию связи ядер можно, используя соотношение между энергией и массой, открытое Эйнштейном в созданной им специальной теории относи-

тельности (см. с. 479). Согласно теории относительности покоящееся тело массой m обладает энергией E , которая равна $E = mc^2$, где c — скорость света. Отсюда следует, что если масса тела изменится на Δm , то и его энергия изменится на величину ΔE , и при этом $\Delta E = \Delta mc^2$.

Дефект масс вызван тем, что нуклоны, образуя ядро, теряют энергию, равную энергии связи этого ядра. Поэтому можно найти следующее выражение энергии связи ядра $E_{\text{св}}$:

$$E_{\text{св}} = \Delta M \cdot c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}) \cdot c^2.$$

В ядерной физике пользуются энергетическими единицами. Имеем 1 а. е. м., что соответствует с вышеизложенным энергии, равной примерно 931,5 МэВ. Тогда, например, масса неподвижного нейтрона равна

$$m_n = 931,5 \cdot 1,008665 = 939,57 \text{ МэВ},$$

где 1 МэВ (мегаэлектронвольт) — 10^6 эВ. Напомним, что электронвольт (эВ) равен кинетической энергии электрона, которую он приобретает, переместившись между двумя точками с разностью потенциалов в один Вольт.

Несколько слов о форме записи: слева от элемента пишут порядковый номер (снизу) и массовое число (сверху).

С помощью соотношения для $E_{\text{св}}$ можно вычислить энергию связи любых ядер. Например, энергия связи самого простого ядра, дейтерия D или ${}^2\text{H}$, состоящего из протона и нейтрона, равна 2,2 МэВ. Чтобы расщепить на нуклоны α -частицу (${}^4_2\text{He}$), необходимо затратить 28 МэВ, а энергия связи ядра изотопа железа (${}^{56}_{26}\text{Fe}$) составляет 493 МэВ. Чем больше массовое число атомного ядра, тем больше его энергия связи.

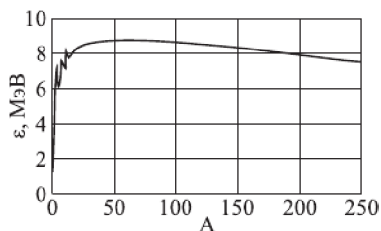


Рис. 30.7. Зависимость удельной энергии связи ядра ϵ от числа нуклонов A в стабильных ядрах

Важной характеристикой атомного ядра является его удельная энергия связи — отношение энергии связи ядра к его массовому числу. Удельная энергия связи — это энергия связи, приходящаяся на один нуклон (см. рис. 30.7).

Для большинства ядер $\epsilon \approx 8$ МэВ (1 МэВ = $1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж). Для разрыва химической связи нужна энергия в 10^6 раз меньше. Под стабильным ядром понимают ядро, существующее сколь угодно долго. Но не все ядра стабильны. И это связано с разной ролью, которую играют в ядре протоны и нейтроны.

Протоны благодаря ядерным силам притягиваются друг к другу и в то же время из-за кулоновского взаимодействия отталкиваются друг друга. Нейтроны не имеют электрического заряда и поэтому притягивают другие нейтроны или протоны благодаря сильному взаимодействию. Стабильные ядра обнаруживают тенденцию к выравниванию числа протонов и нейтронов вплоть до $A \approx 30\text{--}40$. За этой областью стабильные ядра содержат больше нейтронов, чем протонов. Для поддержания устойчивости ядра требуется большее число нейтронов, у которых имеется только ядерное взаимодействие. При очень больших Z избыток нейтронов уже не в состоянии скомпенсировать возрастающее кулоновское отталкивание, и при $Z > 82$ стабильных нуклидов не существует.

У некоторых стабильных ядер число протонов или нейтронов равно 2, 8, 20, 50, 82, 126, 184,... Вероятно, эти «магические числа» соответствуют ядерным состояниям, в которых нуклонные оболочки (слои) оказываются завершенными подобно тому, как на инертных газах — элементах с порядковым номером 2, 10, 18, 36, 54, 86 — завершается построение новой оболочки электронов.

Три составляющие радиоактивности (продолжение). В части 27 мы коротко рассказали об открытии явления радиоактивного распада атомов.

Изложенное в предыдущем разделе проясняет причину радиоактивности: радиоактивность возникает в результате нестабильности ядра. И они распадаются с испусканием того или иного вида излучения. В природе встречаются многие нестабильные изотопы. Их радиоактивность называется естественной радиоактивностью. Другие нестабильные изотопы создаются в лаборатории как продукты ядерных реакций. Такие изотопы называются искусственными, а их радиоактивность — искусственной радиоактивностью.

Изучая природу излучений, Резерфорд и другие исследователи выделили три их типа (рис. 30.8). Это обнаружилось при исследовании поведения этих излучений в магнитном поле. Оказалось, что два излучения имеют заряд, а третье не отклоняется в магнитном поле и заряда не имеет. Это излучение, получившее название «гамма-излучение», представляет собой фотоны очень высокой энергии, значительно превышающей энергию рентгеновского излучения. Альфа-лучи заряжены положительно, а бета-лучи несут отрицательный заряд.

Закон радиоактивного распада. В любом образце радиоактивного вещества содержится огромное число радиоактивных атомов. Так как радиоактивный распад имеет случайный характер и не зависит от внешних условий, то закон убывания количества $N(t)$ нераспавшихся к данному моменту времени t ядер может служить важной статистической характеристикой процесса радиоактивного распада. Пусть за малый промежуток времени Δt количество нераспавшихся ядер $N(t)$ изменилось на $\Delta N < 0$. Так как вероятность распада каждого ядра неизменна во времени, что число распадов будет пропорционально количеству ядер $N(t)$ и промежутку времени Δt : $N = -\lambda N(t)\Delta t$.

Коэффициент пропорциональности λ — это вероятность распада ядра за время $\Delta t = 1$ с. Эта формула означает, что скорость dN/dt изменения функции $N(t)$ прямо пропорциональна самой функции: $dN/dt = -\lambda N$.

Подобная зависимость возникает во многих физических задачах (например, при разряде конденсатора через резистор, рассмотренном выше). Решение этого уравнения приводит к экспоненциальному закону:

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t),$$

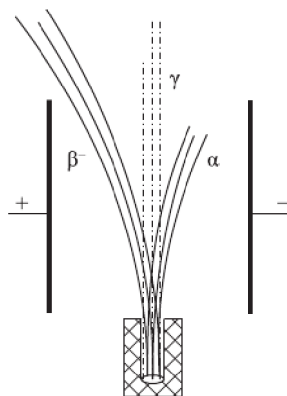


Рис. 30.8. Виды радиоактивного распада

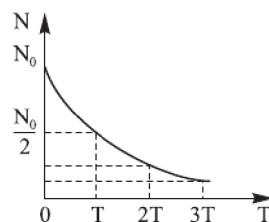


Рис. 30.9. Кривая радиоактивного распада

где N_0 — начальное число радиоактивных ядер при $t = 0$. За время $\tau = 1/\lambda$ количество нераспавшихся ядер уменьшится в $e \approx 2,7$ раза. Величину τ называют средним временем жизни радиоактивного ядра.

Для практического использования закона радиоактивного распада удобно использовать величину, называемую временем полураспада T . За время T распадается половина первоначального количества радиоактивных ядер. Величины T и τ связаны соотношением $T = 1/\lambda \ln 2 = \tau \ln 2 = 0,693\tau$.

Период полураспада — основная величина, характеризующая скорость радиоактивного распада. Чем меньше период полураспада, тем интенсивнее протекает распад. Так, для урана $T \approx 4,5$ млрд лет, а для радия $T \approx 1600$ лет. Поэтому активность радия значительно выше, чем урана. Существуют радиоактивные элементы с периодом полураспада в доли секунды.

1. Альфа-распад. Альфа-распад — самопроизвольное испускание атомными ядрами альфа-частиц (ядер атома гелия). При альфа-распаде из радиоактивного

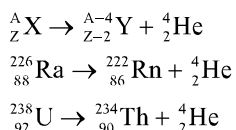


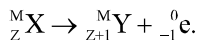
Рис. 30.10. Примеры реакций альфа-распада

(«материнского») ядра с атомным номером Z и массовым числом A испускается ядро гелия (альфа-частица), т. е. два протона и два нейтрона в связанном состоянии. Поскольку α -частица представляет собой связанное состояние двух протонов и двух нейтронов (т. е. ядро гелия), то в результате α -распада конечное ядро содержит на 2 протона и 2 нейтрона меньше, чем начальное: $A_Z \rightarrow A-4(Z-2) + {}^4_2 \text{He}$.

Для того чтобы происходил α -распад, необходимо, чтобы масса исходного ядра $M(A, Z)$ была больше суммы масс конечного ядра $M(A-4, Z-2)$ и α -частицы m_α : $M(A, Z) > M(A-4, Z-2) + m_\alpha$. При этом энергия связи материнского ядра оказывается слишком мала, чтобы ядро было стабильным. Энергия α -распада $Q_\alpha = [M(A, Z) - M(A-4, Z-2) - m_\alpha]c^2$.

Энергия, освобождающаяся при α -распаде, обычно заключена в интервале 2–9 МэВ, и основная ее часть ($\approx 98\%$) уносится α -частицей в виде ее кинетической энергии. Оставшиеся 2% — это кинетическая энергия конечного ядра. Периоды полураспада альфа-излучателей изменяются в очень широких пределах: от $5 \cdot 10^{-8}$ с до $8 \cdot 10^{18}$ лет. Столь широкий разброс периодов полураспада, а также огромные значения этих периодов для многих альфа-радиоактивных ядер объясняется тем, что α -частица не может мгновенно покинуть ядро, несмотря на то что это энергетически выгодно. Для того чтобы покинуть ядро, α -частица должна преодолеть потенциальный барьер — область на границе ядра, образующуюся за счет потенциальной энергии электростатического отталкивания α -частицы и конечного ядра и сил притяжения между нуклонами. С точки зрения классической физики α -частица не может преодолеть потенциальный барьер, так как не имеет необходимой для этого кинетической энергии. Однако квантовая механика допускает такую возможность: α -частица имеет определенную вероятность пройти сквозь потенциальный барьер и покинуть ядро. Это квантовомеханическое явление мы уже рассматривали (туннельный эффект, или туннелированием; см. с. 412). Чем выше барьер, тем меньше вероятность туннелирования, а период полураспада больше. Огромный диапазон периодов полураспада α -излучателей объясняется различным сочетанием кинетических энергий α -частиц и высот потенциальных барьеров.

2. Бета-распад. Естественный бета-радиоактивный распад состоит в том, что ядра атомов одного элемента самопроизвольно испускают бета-частицы, то есть электроны, и при этом превращаются в ядра другого элемента с атомным номером на единицу большим, но с прежней массой. Символически это превращение записывается так:



Здесь X — исходное ядро, Y — продукт распада, e — электрон (верхний индекс «0» показывает, что масса электрона, по сравнению с атомной единицей массы, очень мала). Опыты с бета-распадом показывают, что энергия практически всех бета-частиц меньше, чем разность энергий $W_X - W_Y$. Точнее, β -частицы имеют различные энергии, и все они лежат в пределах от нуля до максимального значения, равного $W_X - W_Y$. Например, для бета-частиц, испускаемых ядрами ${}^{210}_{83}\text{Bi}$ (период полураспада 5 дней), максимальное значение энергии около 1 МэВ,

а средняя энергия, приходящаяся на долю одной частицы, меньше, чем 0,4 МэВ. Создавалось впечатление, что бета-распад — это процесс, в котором, в нарушение закона сохранения энергии, энергия пропадает бесследно. Некоторые физики склонны были думать, что закон сохранения энергии, безусловно верный в мире макроскопических процессов, не обязателен для некоторых процессов, связанных с элементарными частицами. К этой мысли (о возможности нарушения закона сохранения энергии) склонялся даже такой физик, как Нильс Бор. Высказывались и другие мнения, что, возможно, найдутся процессы, при которых энергия не пропадает бесследно (как в случае бета-распада), а наоборот, возникает из ничего. Закон сохранения энергии был, однако, спасен швейцарским физиком-теоретиком Вольфгангом Паули. В 1930 году он высказал предположение, что при бета-распаде из ядра вылетает не только электрон, но и еще одна частица, на долю которой и приходится недостающая энергия. Но почему эта частица никак себя не обнаруживает: не ионизует газ, как это делает электрон; ее энергия при столкновениях с атомами не переходит в тепло и т. д.? Паули объяснял это тем, что придуманная им частица электрически нейтральна и не обладает массой покоя. Эту частицу обозначают буквой ν . В 1934 году Ферми разработал теорию бета-распада с учетом этой частицы, которую он шутливо назвал «нейтрино» («маленький нейтрончик» — по-итальянски). Интересно, что его статью сначала не приняли в «Nature», заявив, что она «далека от реальности». Мы вернемся к проблеме нейтрино далее в этом разделе.

Следует отметить, что испускаемый при бета-распаде электрон не имеет отношения к орбитальным электронам

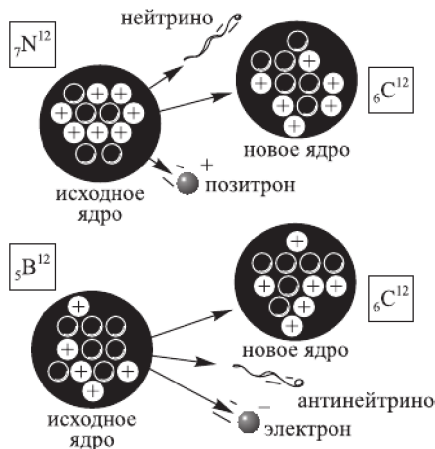


Рис. 30.11. Бета-распад. Взаимопревращение ядерных протонов и нейтронов.

Наверху: протон, превращаясь в нейтрон, испускает позитрон и нейтрино. Внизу: нейтрон, превращаясь в протон, испускает электрон и антинейтрино

атома. Как же из ядер могут вылетать электроны, которых там нет, и нейтрино, которых там тоже нет? Объяснить этот удивительный факт (из ядра вылетает то, чего там нет?) можно только тем, что частицы — протоны и нейтроны, образующие ядро, — способны взаимно превращаться друг в друга. В частности, бета-распад состоит в том, что один из нейтронов, входящих в ядро радиоактивного элемента, превращается в протон. При этом в ядре оказывается одним протоном больше, чем было, а общее число частиц остается прежним. Просто один из нейтронов стал протоном. Но если бы дело только тем и ограничилось, был бы нарушен закон сохранения электрического заряда. Природа таких процессов не допускает! Таким образом, при бета-распаде в ядре происходит превращение одного из нейтронов в протон и рождение двух частиц — электрона и нейтрино. Протон остается в ядре, электрон же и нейтрино, которым в ядре быть «не полагается», вылетают из него.

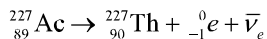
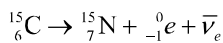
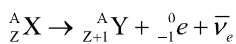


Рис. 30.12. Реакции бета-распада углерода и актиния

Чтобы подчеркнуть ядерное происхождение этого электрона, испускаемые при бета-распаде электроны часто называют β -частицами. Эти частицы ровно ничем не отличаются от орбитальных электронов.

На рис. 30.12 приведены примеры реакций бета-распада с вылетом электронного антинейтрино (см. часть 33).

При бета-распаде основную роль играет слабое взаимодействие. При этом вылетающее нейтрино взаимодействует с веществом только благодаря слабому взаимодействию, поэтому его так трудно регистрировать.

3. Гамма-распад. При ядерных реакциях иногда возникают ядра, находящиеся в возбужденном состоянии (примерно как в возбужденном состоянии могут находиться электроны в атомах и молекулах). Избыточная энергия при возврате ядра в нормальное состояние испускается в виде гамма-кванта.

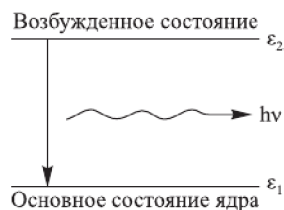


Рис. 30.13. Испускание гамма-кванта возбужденным ядром

Так что распад ядра с испусканием гамма-кванта напоминает испускание фотонов возбужденными атомами. Переход ядра в возбужденное состояние может происходить в результате неупругого столкновения с другой частицей.

Условно верхней границей длин волн гамма-излучения, отделяющей его от рентгеновского излучения, можно считать величину 10^{-10} м. При столь малых длинах волн первостепенное значение имеют корпускулярные свойства излучения. Гамма-излучение представляет собой поток частиц — гамма-квантов или фотонов с энергиями $E = h\nu$. Фотоны с энергиями $E > 10$ кэВ относят к гамма-квантам. Частота гамма-излучения ($> 3 \cdot 10^{18}$ Гц) отвечает скоростям электромагнитных процессов, протекающих внутри атомных ядер и с участием элементарных частиц.

Гамма-излучение зачастую сопровождает явления альфа- или бета-распада. При альфа- и бета-распаде новое возникшее ядро первоначально находится в возбужденном состоянии, и когда оно переходит в нормальное состояние, то испускает гамма-кванты.

Пример реакции с испусканием гамма-квантов показан на рис. 30.14.

Так как радиоактивное излучение состоит из альфа-частиц, бета-частиц и гамма-квантов (т. е. ядер атома гелия, электронов и гамма-квантов), то явление радиоактивности сопровождается потерей массы и энергии ядра, атома и вещества в целом.

Изучение спектров ядерного гамма-излучения и гамма-излучения, возникающего в процессах взаимодействия частиц, дает важную информацию о структуре этих микрообъектов. Доказательством того, что радиоактивное излучение несет энергию, является опыт, показывающий, что при поглощении радиоактивного излучения вещество нагревается.

Радиоактивные ряды. Радиоактивное датирование. Радиоактивные ряды, или радиоактивные семейства, — группы генетически связанных радиоактивных изотопов, в которых каждый последующий изотоп возникает в результате альфа- или бета-распада предыдущего. Каждый из радиоактивных рядов начинается радионуклидом с большим периодом полураспада и заканчивается стабильным нуклидом (см. рис. 30.15).

Каждый радиоактивный ряд содержит как долгоживущие, так и короткоживущие изотопы. В радиоактивном ряду с течением времени устанавливается так называемое вековое равновесие. Время достижения такого равновесия во всем ряду приблизительно равно 10 периодам полураспада самого долгоживущего промежуточного члена ряда. При вековом равновесии скорости образования изотопа и его распада равны. Поэтому содержание такого изотопа остается практически неизменным в течение столетий. Оно с неизмеримо малой скоростью уменьшается лишь по мере распада родоначальника ряда. Выделяют три естественных радиоактивных ряда:

- ряд тория — начинается с нуклида Th-232;
- ряд радия — начинается с U-238;
- ряд актиния — начинается U-235.

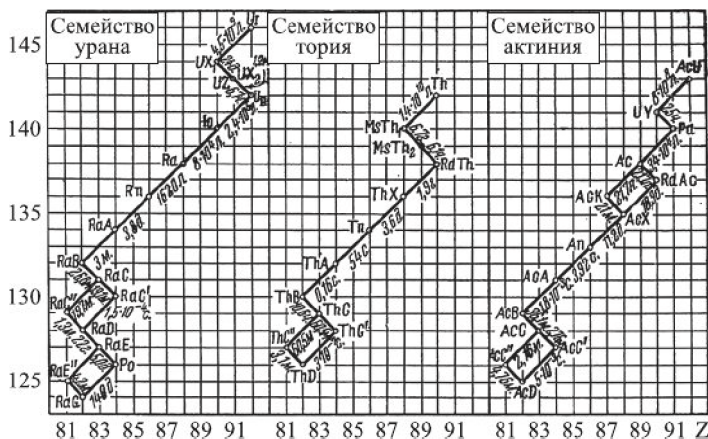
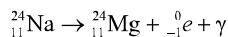


Рис. 30.15. Ряды распада радиоактивных элементов



У γ -кванта нет m , нет q

Рис. 30.14. Распад ядра натрия с испусканием гамма-кванта

Радионуклиды в земной коре расположены неравномерно, и существуют местности с повышенным уровнем радиации (в Бразилии и Индии). Из промежуточных продуктов радиоактивного ряда урана-238 наибольший вклад в облучение населения вносят радиоактивные изотопы радона-222, радия-226, полония-210 и свинца-210.

Вскоре после начала интенсивного исследования радиоактивности появились и приборы для регистрации излучений. Впервые устройство для определения интенсивности распада радиоактивных материалов появилось на свет в 1908 году, его изобрел немецкий физик Ганс Гейгер (1882–1945). Спустя двадцать лет совместно с еще одним физиком Вальтером Мюллером (1905–1979) прибор был усовершенствован и в честь этих двух ученых и был назван. Он служит для регистрации ионизирующих излучений (альфа- и бета-частиц, гамма-квантов, световых и рентгеновских квантов, частиц космического излучения и т. п.). Счетчик Гейгера– Мюллера представляет собой герметично запаивную стеклянную трубку, наполненную каким-либо газом под давлением 13–26 кПа. Внутри трубки находятся два электрода, к которым прикладывается напряжение в несколько сотен вольт. При попадании ионизирующей частицы в счетчик возникает вспышка коронного разряда (характерная форма самостоятельного газового разряда, возникающего в резко неоднородных полях), и во внешней цепи прибора появляется импульс тока, который усиливается и регистрируется счетчиком импульсов.

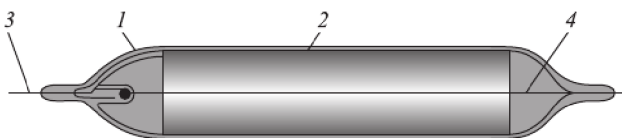


Рис. 30.16. Схема устройства счетчика Гейгера–Мюллера:




1 — герметично запаивная стеклянная трубка; 2 — катод (тонкий слой меди на цилиндре из нержавеющей стали); 3 — вывод катода; 4 — анод (тонкая нить)

Со временем физики пополнили арсенал приборов для исследования в области ядерной физики. В значительной степени успехам в познании законов мироздания мы обязаны уникальным установкам и методам, которые используют экспериментаторы в погоне за новыми частицами и изучении их свойств.

Довольно скоро после открытия явления естественной радиоактивности физики обнаружили возможность использования этого явления для определения абсолютного возраста горных пород. Ведь радиоактивные элементы — это своеобразные часы «с заводом на десятки миллиардов лет». Измерение возраста производится по содержанию продуктов радиоактивного распада в минералах. Процесс распада радиоактивных элементов происходит с постоянной скоростью. В результате радиоактивного распада появляются атомы устойчивых, уже не распадающихся элементов, количество которых увеличивается пропорционально возрасту минерала. При этом принимается как достаточно обоснованное положение, что скорость радиоактивного распада в истории Земли все время оставалась постоянной. Разные элементы распадаются с различной скоростью. Распад таких элементов, как уран, торий, калий, и некоторых других, происходит очень медленно, на протяжении нескольких миллиардов лет. Эти долгоживущие элементы

обычно и используются для определения абсолютного возраста горных пород и минералов. В 1907 году по инициативе Э. Резерфорда Б. Болтвуд в Канаде определил возраст ряда радиоактивных минералов по накоплению в них свинца. Абсолютная датировка геологической летописи позволяет установить примерное время появления на Земле различных групп растений и животных. Этот метод — хорошее подспорье в руках исследователей геологической истории Земли. Метод, использующий изотопы урана и тория, их превращение в стабильные изотопы свинца и гелия — наиболее распространенный метод определения абсолютного возраста. Физики преподнесли геологам поистине царский подарок: стало возможным достаточно точно определить время существования Земли и протяженности различных периодов ее истории.

Таблица 26. Геохронологическая таблица

Эры, их продолжительность в млн лет	Периоды, их продолжительность в млн лет	Основные этапы развития жизни	Главнейшие геологические события, облик земной поверхности	Характерные полезные ископаемые
Кайнозойская эра (KZ), около 70 млн лет	Антропогенный (Q), 2 млн лет		Общее поднятие территории. Неоднократные оледенения. Появление человека	Торф, золото, алмазы, драгоценные камни
	Неогеновый (N), 25 млн лет		Возникновение молодых гор в областях кайнозойской складчатости. Возрождение гор в областях всех древних складчатостей. Господство цветковых растений	Бурый уголь, нефть, янтарь
	Палеогеновый (P), 41 млн лет		Разрушение мезозойских гор. Широкое распространение цветковых растений, развитие птиц и млекопитающих	Бурый уголь, фосфориты, бокситы
Мезозойская эра (MZ), 165 млн лет	Меловой (K), 66 млн лет		Возникновение молодых гор в областях мезозойской складчатости. Вымирание гигантских рептилий. Развитие птиц и млекопитающих	Нефть, уголь, фосфориты, мел, горючие сланцы
	Юрский (J), 53 млн лет		Образование современных океанов. Жаркий, влажный климат. Расцвет рептилий. Господство голосеменных растений. Появление примитивных птиц	Каменный уголь, нефть, фосфориты
	Триасовый (T), 50 млн лет		Наибольшее за всю историю Земли отступление океанов и поднятие материков. Разрушение домезозойских гор. Обширные пустыни. Появление первых млекопитающих	Каменная соль
Палеозойская эра (PZ), 330 млн лет	Пермский (P), 45 млн лет		Возникновение молодых гор в областях герцинской складчатости. Сухой климат. Возникновение первых голосеменных растений	Гипс, каменная и калийная соль
	Каменноугольный (C), 65 млн лет		Широкое распространение заболоченных низменностей. Жаркий, влажный климат. Развитие лесов из древовидных папоротников, хвощей и плаунов. Появление первых рептилий. Расцвет земноводных	Обилие угля и нефти

Эры, их продолжительность в млн лет	Периоды, их продолжительность в млн лет	Основные этапы развития жизни	Главнейшие геологические события, облик земной поверхности	Характерные полезные ископаемые
	Девонский (D), 55 млн лет		Уменьшение площади морей. Жаркий климат. Появление первых пустынь. Появление первых земноводных. Многочисленные рыбы	Соли, нефть
	Силурийский (S), 35 млн лет		Возникновение молодых гор в областях каледонской складчатости. Появление первых наземных растений	
	Ордовикский (O), 65 млн лет		Уменьшение площади морских бассейнов. Появление первых наземных беспозвоночных животных	
	Кембрийский (E), 80 млн лет		Возникновение молодых гор в областях байкальской складчатости. Затопление обширных пространств морями. Расцвет морских беспозвоночных животных	Каменная соль, гипс, фосфориты
Протерозойская эра (PR), 2000 млн лет			Начало байкальской складчатости. Мощный вулканизм. Время бактерий и водорослей	Железные руды, слюда, графит
Архейская эра (AR), 1000 млн лет			Древнейшие складчатости. Напряженная вулканическая деятельность. Время примитивных одноклетчатых бактерий	Железные руды

Археологическое время совсем не похоже на наше календарное время. Археология имеет дело с периодами неопределенной длительности. Она может восстановить последовательность явлений, но не может сказать, как долго они длились. Ситуация весьма похожая на ту, что мы рассмотрели в геологии.

И тут тоже физики пришли на помощь: было обнаружено, что под действием космических лучей из атмосферного азота непрерывно образуется радиоактивный изотоп углерода C^{14} . Он окисляется в углекислый газ CO_2 . Отношение количества радиоактивного углерода C^{14} в атмосфере к стабильному C^{12} можно считать постоянным. В любом живом организме поддерживается тот уровень радиоуглерода, который присутствует в земной атмосфере; это равенство обеспечивается фотосинтезом или питанием вплоть до прекращения жизнедеятельности. Если, срубив дерево, мы лишим его возможности усваивать углерод из атмосферы, то относительное количество радиоактивного углерода начнет уменьшаться вследствие его распада. Каждые 5700 лет количество C^{14} уменьшается вдвое. Таким образом, остаток радиоактивного углерода C^{14} указывает, сколько времени прошло, например, с момента, когда срубили дерево.

Теория остается теорией, откуда она не проверена практикой. Первые датировки по ^{14}C органики из могил Древнего царства в Египте оказались моложе традиционных на несколько сот лет. Это вызвало недоверие к новому методу, поскольку никто тогда и помыслить еще не смел о ревизии, построенной на письменных источниках древнеегипетской хронологии (см. УИМ). Гораздо более сенсационными и на первый взгляд абсолютно неправдоподобными показались

радиоуглеродные даты для культур Европейского континента. Их передатировка выглядела порой прямо-таки чудовищной: по сравнению с традиционными представлениями историков и археологов они удрежняли события более чем на тысячу лет (напомним, что это были бесписьменные культуры). Все-таки несколько тысяч лет — это не то время, когда углеродный метод дает достоверные результаты. Однако все не так плохо. Датировка по описываемому методу постоянно совершенствуется и для достаточно продолжительных интервалов времени часто дает удовлетворительные результаты.

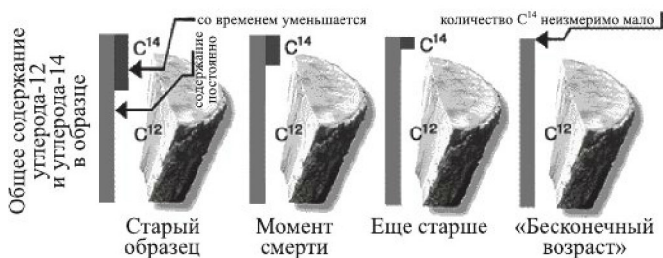


Рис. 30.17. Радиоуглеродный метод датировки

Искусственная радиоактивность. В 1934 году Фредерик Жолио (1900–1958) и Ирен Кюри (1897–1956) сообщили об открытии ими нового вида радиоактивности. Закрыв отверстие детектора тонким слоем алюминиевой фольги, они облучили образцы алюминия и бора альфа-частицами и изучали выход положительных электронов — позитронов (о позитронах см. ниже). К их удивлению, выход позитронов продолжался в течение нескольких минут после того, как был удален полониевый источник альфа-частиц. Позднее Жолио-Кюри пришли к убеждению, что часть алюминия и бора в подвергнутых анализу образцах превратилась в новые химические элементы. Более того, эти новые элементы были радиоактивными, алюминий превратился в радиоактивный фосфор, а бор — в радиоактивный изотоп азота. В течение непродолжительного времени Жолио-Кюри получили много новых радиоактивных элементов. Они показали, что в этом случае возникает новый этап радиоактивности. Так впервые удалось искусственно вызвать радиоактивность, создав новые радиоактивные изотопы, не наблюдаемые до этого в природе.

Не все облученные вещества проявляли радиоактивность. Не удалось ее обнаружить в опытах с водородом, литием, углеродом, бериллием, азотом, кислородом, фтором, натрием, кальцием, никелем и серебром. Ученые поняли, что имеют дело с новым явлением.

Опираясь на исследования Резерфорда и Кокрофта, Ирен и Фредерику Жолио-Кюри удалось установить, что происходит с атомами алюминия при бомбардировке их

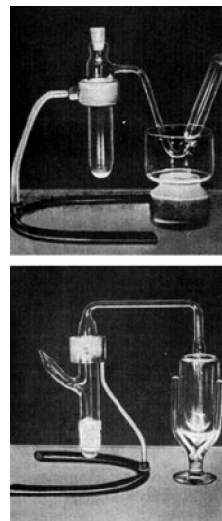


Рис. 30.18. Приборы И. и Ф. Кюри, с которыми была получена искусственная радиоактивность

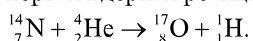
альфа-частицами полония. Сначала альфа-частицы захватываются ядром атома алюминия, положительный заряд которого возрастает на две единицы, вследствие чего оно превращается в ядро радиоактивного атома фосфора, названного учеными радиофосфором. Этот процесс сопровождается испусканием одного нейтрона, и масса полученного изотопа становится равной 30. Устойчивый изотоп фосфора имеет массу 31. Радиофосфор с зарядом 15 и массой 30 распадается с периодом полураспада 3 минут 15 секунд, излучая один позитрон и превращаясь в устойчивый изотоп кремния.

Единственным и неоспоримым доказательством того, что алюминий превращается в фосфор и потом в кремний с зарядом 14 и массой 30, могло быть только выделение этих элементов и их идентификация с помощью характерных для них качественных химических реакций. И хотя эта «неразрешимая» задача требовала непосильного труда, напряжения, виртуозной ловкости и бесконечного терпения, она была решена. Несмотря на чрезвычайно малый выход продуктов ядерных превращений и совершенно ничтожную массу вещества, претерпевшего превращение, лишь несколько миллионов атомов, удалось установить химические свойства полученного радиоактивного фосфора.

Обнаружение искусственной радиоактивности сразу было оценено как одно из крупнейших открытий века.

Ядерные реакции. Ядерные реакции происходят тогда, когда данное ядро сталкивается с другим ядром или какой-нибудь частицей (например, нейтроном или гамма-квантом), в результате между ними происходит взаимодействие. Впервые ядерную реакцию, как было рассказано выше, наблюдал Резерфорд. Наиболее подходящими «снарядами», обладающими достаточной для разрушения ядра энергией, были альфа-частицы. Первым ядром, подвергшимся искусственному превращению, было ядро азота. В результате бомбардировки ядра азота альфа-частицами оно превращается в ядро изотопа кислорода с испусканием протонов- ядер атома водорода.

Вот как записывается эта первая ядерная реакция 1919 года:



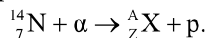
Несколько слов о форме записи. Стрелка указывает направление реакции. Иногда уравнение ядерной реакции записывают в сокращенном виде; например, для написанной реакции это будет выглядеть так: ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$. Символы химических элементов слева и справа от скобок указывают соответственно исходное и конечное ядра. Символы внутри круглых скобок (альфа-частица и протон) указывают налетающую или падающую (первый символ) и испускаемую (второй символ) частицы.

В ядерных реакциях выполняется ряд законов сохранения:

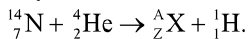
- 1) закон сохранения электрического заряда;
- 2) закон сохранения числа нуклонов;
- 3) закон сохранения импульса;
- 4) закон сохранения энергии.

Пример. Изотоп ${}^{14}_7\text{N}$ при захвате α -частицы образует некоторый элемент и протон. Определите, какой элемент образуется в результате этой реакции.

Решение. Начнем с записи реакции:



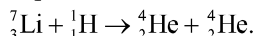
Вспомнив, что α -частица является ядром атома гелия, а для протона $A = 1$, $Z = 1$, перепишем реакцию в следующем виде:



Суммы зарядов и массовых чисел в левой и правой частях уравнения должны быть равны. Поэтому нетрудно определить, что для неизвестного нуклида X $A = 14 + 4 - 1 = 17$, $Z = 7 + 2 - 1 = 8$. Заглянув в таблицу Менделеева, определяем, что $Z = 8$ соответствует кислороду. Следовательно, в результате реакции получается изотоп кислорода ${}^{17}_8\text{O}$.

Будем рассматривать двухчастичную ядерную реакцию: $a + A = B + b$.

Законы сохранения позволяют, не рассматривая конкретного механизма ядерной реакции, дать ответ на вопрос, возможна ли данная ядерная реакция или нет. Это касается в особенности двух последних законов сохранения. Ядерные реакции совершаются с выделением энергии (если образовавшееся ядро имеет большую энергию связи на частицу) или с поглощением энергии (если продукты реакции имеют меньшую энергию связи на частицу, чем исходное ядро). Ядерные реакции, происходящие с выделением энергии, называют экзотергетическими, с поглощением энергии носят название эндотергетических. Пример реакции, идущей с выделением энергии, — взаимодействие ядра лития с протоном:



Вследствие большой энергии связи частиц при ядерных реакциях выделяется энергии примерно в 10^6 раз больше, чем при химических реакциях. Эндотергетические реакции осуществляются, если энергия бомбардирующей частицы больше пороговой энергии E для данного вида реакции.

Вероятность осуществления реакции характеризуется поперечным сечением σ — вероятностью превращения одного ядра в результате данной ядерной реакции под действием одной частицы, падающей на 1 см^2 поверхности мишени, и численно равна поперечному сечению ядра. Сечение σ измеряется либо в квадратных сантиметрах, либо в барнах ($1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$; поперечное сечение ядра равно πr^2 и по порядку величины равно 10^{-24} см^2).

Другой характеристикой ядерных реакций является выход реакции W — отношение числа актов данной ядерной реакции к числу попавших на мишень частиц.

О сечении ядерной реакции. Представим себе некий объем в виде параллелепипеда, содержащий n_0 ядер какого-нибудь элемента. Пусть радиус каждого ядра — r_0 , длина параллелепипеда (мишени) равна l , а площадь торца — S . Будем стрелять в торец другими ядрами, скорость каждого из них — v . Площадь поперечного сечения одного ядра — $\sigma_0 = \pi r_0^2$, а площадь сечения всех ядер в объеме мишени будет $\sigma_0 n_0 S l$. Вероятность того, что пролетающее через мишень ядро попадет в одно из ядер, будет $\sigma_0 n_0 S l / S$, т. е. равна отношению суммарной площади геометрического сечения всех ядер в объеме мишени к площади его торца. Поделив полученную величину на время пролета ядра через кристалл ($t = l/v$), найдем вероятность попадания в единицу времени: $w = \sigma_0 v n_0$. Таким образом,

если каждую секунду со скоростью v через площадь в 1 см^2 пролетает одна частица, то с вероятностью w она попадает в одно из ядер мишени. Данная формула справедлива и в ядерной физике, и в квантовой механике, только вместо геометрического поперечного сечения следует брать некоторое «эффективное» сечение, которое может быть больше или меньше геометрического πr_0^2 . Реальное сечение зависит от энергии сталкивающихся частиц. Эти сечения для разных реакций могут различаться в тысячи и миллионы раз. Квантовая механика дает возможность рассчитать сечения ядерных реакций.

Ядерные реакции хорошо описываются *моделью составного ядра*, согласно которой они протекают в две стадии: сначала частица захватывается ядром и образуется возбужденное промежуточное, или составное, ядро. За время, большее по сравнению со временем, необходимым для пролета частиц через ядро, бомбардирующая частица вследствие большого количества соударений передает свою энергию всем частицам ядра, так что происходит достаточно равномерное распределение ее по отдельным нуклонам (температура ядра повышается).

Пример. Ядерная реакция $^{14}\text{N} + ^4\text{He} \rightarrow ^{17}\text{O} + p$ может идти, если налетающие на неподвижные ядра азота α -частицы имеют энергию, превышающую пороговую энергию $E_0 = 1,45 \text{ МэВ}$. На сколько энергия α -частиц должна быть больше пороговой, чтобы кинетическая энергия образующихся в реакции протонов была равна нулю?

Решение. Пороговая энергия E_n — это минимальная энергия налетающей частицы, при которой происходит ядерная реакция. Она включает в себя энергию E , поглощаемую при реакции, и минимальную кинетическую энергию E_k продуктов реакции. (E_k не может быть равной нулю, исходя из закона сохранения импульса.) Эта кинетическая энергия минимальна, если ядро кислорода и протон движутся как единое целое, то есть с одинаковыми скоростями. Согласно закону сохранения энергии в первом случае

$$E_n = E + m_\alpha E_n / (m_\alpha + m_p),$$

где m_α , m_α и m_p — массы α -частицы, ядра кислорода и протона соответственно.

Во втором случае E_α частицы будет равна

$$E_\alpha = E + m_\alpha E_\alpha / (m_\alpha + m_p).$$

Тогда увеличение энергии α -частицы

$$\Delta E_\alpha = E_\alpha - E_0 = E_0 m_\alpha m_p / ((m_\alpha + m_p)(m_\alpha - m_p)) \approx 25 \text{ кэВ}.$$

Деление ядер. Выделение ядерной энергии впервые удалось осуществить в знаменитом 1932 году Дж. Кокрофту (1897–1967) и Э. Уолтону (1903–1995), бомбардировавшим литий протонами (запись этой реакции приведена выше). В этой реакции масса вступающих в реакцию ядер была несколько больше массы продуктов, в результате чего и происходило выделение энергии.

Из воспоминаний С. П. Капицы. Первый в мире ускоритель построили ученик П. Л. Капицы Кокрофт и инженер Уолтон. Это была довольно сложная установка, протянувшаяся на два этажа, с большими изоляторами и управляющий стенд, на котором напряжение достигало полумиллиона вольт.... Подо всем этим гигантским устройством была маленькая кабина, где экспериментатор на флуоресцирующем экране наблюдал через микроскоп частицы от ядерных превращений. Такими простыми средствами, без вся-

кой электроники, можно было увидеть!.. Первым туда (в кабинку) залез Резерфорд, и, когда было подано напряжение, он первым увидел ядерное превращение, вызванное пучком ускоренных частиц (Капица С. Мои воспоминания. М.: АСТ, 2015).

А в 1934 году Ферми (1901–1954) открыл явление замедления нейтронов — последовательное уменьшение кинетической энергии нейтронов в результате соударений с атомными ядрами вещества. Именно нейтрон, на который вокруг ядра электрическое поле не действует, оказался ключом к ядерной реакции деления. Дальнейшее развитие ядерной физики пошло ускоренными темпами.

В Римском университете группа физиков под руководством Э. Ферми подвергли облучению нейтронами почти все элементы периодической системы. Ферми пытался с помощью бомбардировки нейтронами элемента урана получить заурановые элементы, не существующие в природе. В результате бомбардировки наблюдалось образование ряда радиоактивных веществ. Химические исследования показали, что эти вещества являлись изотопами известных элементов периодической системы. Однако наблюдаемое им впервые в истории физики деление ядер урана не было правильно понято. Ферми предположил, что ядро урана, захватив нейтрон, становится бета-радиоактивным и после испускания бета-частицы превращается в ядро нового трансуранового элемента. Этот вывод подвергся критике со стороны Иды и Вальтера Ноддак, молодой пары из Института физической химии Фрейбургского университета в Бреслау. Ноддак первой указала на необоснованность вывода, сделанного в 1934 году из своего эксперимента Энрико Ферми об открытии трансуранового элемента, и первая высказала предположение о реакции расщепления ядра урана на осколки при захвате ядром нейтрона.

В 1938 году немецкие ученые Отто Ган (1879–1968) и Фриц Штрассман (1902–1980) сделали удивительное открытие. Они обнаружили, что при бомбардировке урана нейтронами иногда возникают ядра, примерно вдвое более легкие, чем исходное ядро урана. В многочисленных публикациях 1935–1938 гг. Ган и его коллега Лиза Мейтнер (1878–1968) исчерпывающе описали химические свойства новых веществ, образовавшихся в результате нейтронной бомбардировки. Среди продуктов реакции был обнаружен барий — химический элемент с массой много меньше, чем масса урана. Этот радиоактивный барий считали поначалу радием. Но отделить его химически от бария не могли. Разгадку нашла Л. Мейтнер. Она сделала достоянием научной общественности смелую идею Гана, которую тот когда-то высказал ей в частной беседе: она предположила, что радий не удастся отделить от бария, поскольку радия нет. А то, что считают радием, на самом деле радиоактивный барий, который образовался в результате нейтронной бомбардировки урана. Радиоактивный барий распадается с излучением бета-частицы, превращаясь в лантан. Но каким образом из урана мог получиться барий? Ведь барий относится к элементам-средневесам и не были известны процессы радиоактивного распада, когда тяжелый элемент превращался в другой — почти в два раза легче исходного. Мейтнер выдвинула идею, что урановое ядро под действием нейтронов *делится* на два новых ядра, и предложила назвать такое явление расщеплением. Она предположила, что два элемента, на которые распадается урановое ядро, — это барий и элемент номер 43, стоящий в периодической таблице над рением (позднее этот элемент будет назван технеций).

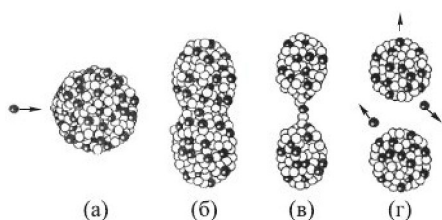


Рис. 30.19. Один из вариантов вынужденного деления урана-235 после поглощения нейтрона (www.physbook.ru)

статического отталкивания скомпенсированы, поэтому ядро имеет сферическую форму (рис. 30.19, а).

После захвата ядром урана нейтрона образуется промежуточное ядро (${}_{92}^{236}\text{U}$)*, которое находится в возбужденном состоянии. При этом энергия нейтрона равномерно распределяется между всеми нуклонами, а само промежуточное ядро деформируется и начинает колебаться. Если возбуждение невелико, то ядро (рис. 30.19, б), освобождаясь от излишка энергии путем испускания γ -кванта или нейтрона, возвращается в устойчивое состояние. Если же энергия возбуждения достаточно велика, то деформация ядра при колебаниях может быть настолько большой, что в нем образуется перетяжка (рис. 30.19, в), аналогичная перетяжке между двумя частями раздваивающейся капли жидкости. Ядерные силы, действующие в узкой перетяжке, уже не могут противостоять значительной кулоновской силе отталкивания частей ядра. Перетяжка разрывается, и ядро распадается на два «осколка» (рис. 30.19, г), которые разлетаются в противоположные стороны.

Не все физики сразу поняли, что стоит за этим открытием, не все обратили внимание на необычайно высокое энергосодержание. В процессе расщепления выделяется невероятное количество энергии, значительно больше, чем в ходе обычного радиоактивного распада. Но это явление удивительно не только огромным выбросом энергии. Более важным представляется тот факт, что в результате деления ядра выделяется два-три нейтрона. Через два месяца после Мейтнер сразу несколько физиков поняли, что стоят на пороге цепной ядерной реакции. Хотя выражение «цепная реакция» звучит несколько экзотически, но фактически это довольно распространенное явление. Даже горение обычного куска бумаги представляет собой химическую цепную реакцию. Этот процесс инициируется с помощью горящей спички, но как только бумага разгорелась, процесс продолжается самопроизвольно, за счет выделяющегося тепла, в результате чего пламя не просто поддерживается на одном уровне, но разгорается все сильнее. То есть горение самоусиливается (Азимов А. «Путеводитель по науке. От египетских пирамид до космических станций»). Точно такая же картина наблюдается и в ходе ядерной цепной реакции. Вначале единственный нейтрон расщепляет ядро урана, в результате чего образуются два новых нейтрона, которые вызывают расщепление еще двух ядер; вылетающие при этом четыре новых нейтрона способствуют расщеплению уже четырех ядер и т. д.

С практической точки зрения выделяющаяся в одном акте деления энергия ничтожно мала. Но если одновременно делится большое число ядер урана, то в макроскопических масштабах будет выделяться огромная энергия.

Объяснить эту реакцию деления можно основываясь на капельной модели ядра. В этой модели ядро рассматривается как капля электрически заряженной несжимаемой жидкости. Кроме ядерных сил, действующих между всеми нуклонами ядра, протоны испытывают дополнительное электростатическое отталкивание, вследствие которого они располагаются на периферии ядра. В невозбужденном состоянии силы электростатического отталкивания скомпенсированы, поэтому ядро имеет сферическую форму (рис. 30.19, а).

В результате расщепления всего одного грамма урана выделяется столько же энергии, как при сгорании 3 тонн угля или 300 литров высококачественной нефти. О том, что химическая реакция изменяет вид материи, причем может выделяться или поглощаться энергия, было известно давно, но то, что в энергию может превратиться часть материи, было обнаружено впервые. Открытия в области радиоактивности и инициируемые человеком ядерные реакции заставили по-иному взглянуть на следствие теории Эйнштейна, выраженное формулой $E = mc^2$. Оказывается, суммарная масса образующихся продуктов ядерной реакции не равна сумме масс исходных компонент, а энергетический выход реакции объясняется как раз этим небольшим, но уже фиксируемым изменением массы в ходе реакции (порядка десятых долей процента). Но на самом деле масса нигде не исчезает. Уравнение Эйнштейна показывает, что она просто проявляет себя в форме энергии, которую c^2 увеличивает, в сравнении с массой, почти в 1 166 400 000 000 000 000 раз (с в единицах км/ч).

Ряд физиков, включая Ферми, поняли, что нейтроны, выпускаемые в каждом акте деления, можно использовать для осуществления цепной реакции. Таким образом, открылись перспективы использования цепной реакции деления в двух направлениях:

- управляемая ядерная реакция деления — создание атомных реакторов;
- неуправляемая ядерная реакция деления — создание ядерного оружия (первый экспериментальный ядерный взрыв был успешно произведен в 17 часов 30 минут 16 июля 1945 года на воздушной базе Аламогордо, примерно в 200 километрах от Альбукерке, в пустыне штата Нью-Мексико, США).

В январе 1939 года Энрико Ферми высказывает мысль, что при делении урана следует ожидать испускания быстрых нейтронов и что, если число вылетевших нейтронов будет больше, чем число поглощенных, путь к цепной реакции будет открыт. Для самоподдерживающейся цепной реакции в среднем по крайней мере один нейтрон, возникающий в каждом акте деления, должен вызвать деление одного ядра на следующем этапе. Среднее число нейтронов в каждом акте деления, вызывающих деление других ядер, называется коэффициентом размножения нейтронов k . Для самоподдерживающейся цепной реакции должно выполняться неравенство

$k > 1$. К весне 1942 года эта теория была разработана, и летом началась серия экспериментов, главной задачей которых являлось измерение нейтронного потока. Было сделано около тридцати опытов и в июне того же года был получен коэффициент размножения нейтронов больше единицы. Это открывало возможность

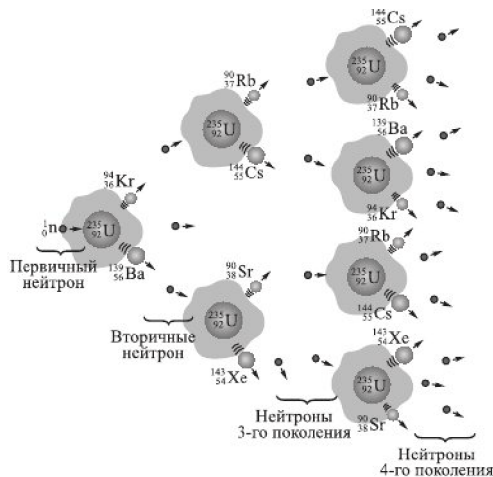


Рис. 30.20. Схема размножения нейтронов при цепной реакции

получения цепной реакции в достаточно большой решетке из урана и графита и послужило началом разработки конструкции реактора. Постройка реактора началась в Металлургической лаборатории Чикагского университета в октябре, а закончилась 2 декабря 1942 года. В самодельной лаборатории под стадионом Stagg Field Stadium на этом реакторе был проведен поистине эпохальный эксперимент, продемонстрировавший первую самоподдерживающуюся цепную реакцию.



Рис. 30.21. Творцы ядерной физики: Ирен и Фредерик Жолио-Кюри (искусственные изотопы, 1934, Франция), Э. Ферми («превращения» урана, 1934, Италия, ядерный реактор 2.12.1942, США), О. Ган (энергия атомного распада, 1939, Германия)

Воздвигаемый реактор на техническом жаргоне называли «кучей», так как он был сложен из брусков графита (чистого углерода), которые должны были сдерживать скорость цепной реакции (замедлять нейтроны). Уран и оксид урана размещались между графитовыми брусками. Быстрые нейтроны, появляющиеся после деления ядер урана с массовым числом 235, замедлялись графитом до тепловых энергий⁶, а затем вызывали новые деления ядер.

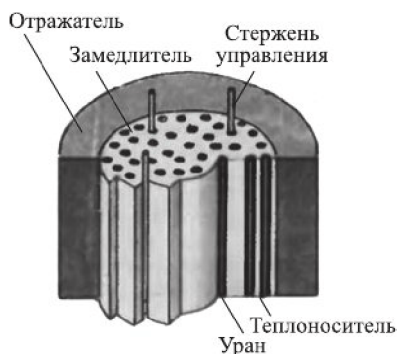


Рис. 30.22. Схема активной зоны атомного реактора

2 декабря 1942 года кадмиевые регулирующие стержни, поглощающие нейтроны, были медленно выдвинуты, чтобы запустить первую в мире самоподдерживающуюся цепную реакцию. «Было ясно, — писал впоследствии Джон Кокрофт, — что Ферми открыл дверь в атомный век». Скоро эта фраза стала крылатой.

Принципиальная схема реактора довольно проста: составными частями любого ядерного реактора являются активная зона с ядерным топливом, обычно окруженная отражателем нейтронов, теплоноситель, система регулирования цепной реакции, радиационная защита, система дистанционного управления. Система регулирования имеет задачу управления цепной реакцией (рис. 30.22).

⁶ Тепловые нейтроны — нейтроны, кинетическая энергия которых близка к средней энергии теплового движения молекул газа при комнатной температуре (примерно 0,025 эВ). Быстрые нейтроны, образующиеся при ядерной реакции деления, после нескольких столкновений с ядрами вещества теряют свою кинетическую энергию и становятся тепловыми.

Ее выполняют подвижные стержни (обычно из кадмия), назначение которых состоит в том, чтобы поглощать нейтроны и перевести, когда возникнет необходимость, реактор из «надкритического» состояния в почти критическом $k = 1$.

Однако осуществить в реальности эту схему оказалось непросто. В СССР первый реактор был запущен в 1946 году под руководством И. Курчатова.

Разница между ядерным реактором и атомной бомбой заключается в скорости высвобождения энергии: в реакторе коэффициент размножения нейтронов поддерживается близким к единице, тогда как в атомной бомбе этот коэффициент несколько превышает единицу, отчего цепная реакция развивается очень быстро и происходит взрыв.

Ядерный синтез. После открытия деления ядер атомов был открыт обратный процесс — ядерный синтез, когда легкие ядра соединяются в более тяжелые. Так как масса любого стабильного ядра меньше суммы масс составляющих его протонов и нейтронов, то, следовательно, если протоны и нейтроны привести в соприкосновение при слиянии ядер, при образовании ядра происходило бы уменьшение массы. Уменьшение массы приведет к выделению огромных количеств энергии.

Термоядерный синтез сопровождается колоссальным энергосвободением на единицу массы реагирующих веществ (примерно в 10 миллионов раз больше, чем в химических реакциях). Поэтому чрезвычайно интересно овладеть этим процессом и на его основе создать дешевый и экологически чистый источник энергии.

В общем-то этому превращению мы обязаны своим существованием, так как приходящая на Землю энергия в виде светового излучения (фотонов) образуется внутри звезд, в результате термоядерных реакций синтеза ядер водорода в ядра гелия (рис. 30.23).

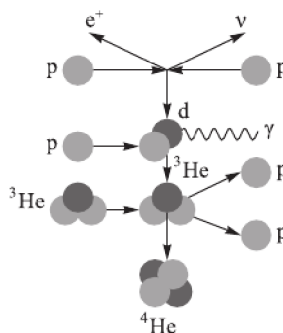
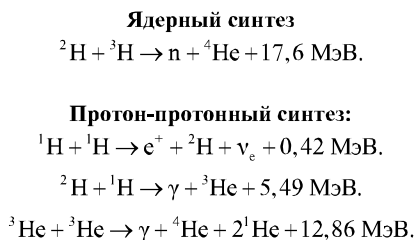


Рис. 30.23. Цепочка «протон–протон», которая питает ядерный синтез внутри ядра нашего Солнца

За пределами земной атмосферы каждую секунду на квадратный метр лучи Солнца приносят энергию 1,37 кДж, т. е. его мощность — 1370 Вт/м^2 (так называемая «солнечная постоянная»). Это огромная энергия: чтобы ее получить, необходимо каждую секунду сжигать $1,3 \cdot 10^{16}$ т угля — в тысячу раз больше, чем все его известные запасы на Земле.

Множество гипотез строили ученые, чтобы ответить на вопрос: почему светит Солнце? Одни считали, что Солнце состоит из глыбы пылающего угля. Другие — что

разогревается под ударами метеоритов. Более физической была гипотеза, что причиной разогрева является сжатие светила под действием силы тяжести. Но все эти гипотезы не могли объяснить огромную величину и постоянство во времени лучистого потока, излучаемого Солнцем. И лишь к концу 1930-х годов ученые вплотную подошли к разгадке тайны Солнца. Стало ясно что, источником энергии является синтез легких ядер в более тяжелые.

При этом на Землю попадает только $4,5 \cdot 10^{-9}$ часть энергии излучения Солнца (пропорционально $(R_z/R_c)^2$). Иными словами, из 4,2 млн т массы Солнца, которые каждую секунду трансформируются в энергию излучения, на обогрев Земли приходится лишь 1,9 кг!

Реакция слияния легких ядер, цель которой — получение полезной энергии, называется *управляемым термоядерным синтезом*. Каким образом можно осуществить термоядерную реакцию? Проблема заключается в том, что слиянию ядер препятствуют электрические силы расталкивания. В соответствии с законом Кулона электрическая сила расталкивания растет обратно пропорционально квадрату расстояния между взаимодействующими ядрами: $F \sim 1/r^2$. Поэтому для синтеза ядер, образования новых элементов и выделения избыточной энергии необходимо преодолеть кулоновский барьер, то есть совершить работу против сил расталкивания, сообщая ядрам необходимую энергию. Впервые реакцию синтеза осуществили Дж. Кокрофт и Э. Уолтон в своих экспериментах, проводившихся в 1932 году в Кавендишской лаборатории, где они облучали литиевую мишень ускоренными в электрическом поле протонами и наблюдали взаимодействие протонов с ядрами лития Li. С тех пор изучено большое число подобных реакций.

В принципе, в настоящее время для осуществления реакций синтеза ядер рассматривают две возможности. Одна из них заключается в столкновении двух ускоренных навстречу друг другу пучков легких атомов. При этом достигают большой относительной скорости ядер. Оказалось, однако, что этот путь неэффективен. Дело в том, что вероятность слияния ядер в ускоренных пучках чрезвычайно мала из-за низкой плотности ядер и ничтожно малого времени их взаимодействия, хотя создание пучков необходимой энергии в существующих ускорителях проблемы не составляет.

Другой путь, на котором и остановились современные исследователи, — нагрев вещества до высоких температур (порядка 100 млн градусов). Чем выше температура, тем выше средняя кинетическая энергия частиц и тем большее их количество может преодолеть кулоновский барьер. Но за счет так называемого «максвелловского хвоста» (см. рис. 12.6) синтез зажигается уже при 10^7 °К. Но при таких температурах вещество становится плазмой и очень интенсивно излучает энергию, то есть быстро остывает.

Плазма считается четвертым (после твердого, жидкого и газообразного) агрегатным состоянием вещества. Слово «ионизированный» означает, что от значительной части атомов или молекул отделен по крайней мере один электрон. Плазма квазинейтральна, это означает, что, несмотря на наличие свободных зарядов (электронов и ионов), суммарный электрический заряд плазмы равен нулю. Присутствие свободных электрических зарядов делает плазму проводящей средой, что обуславливает ее заметно большее (по сравнению с другими агрегатны-

ми состояниями вещества) взаимодействие с магнитным и электрическим полями. Применения физики плазмы весьма многочисленны. Работа ртутных выпрямителей, газотронов, газоразрядных источников света основана на использовании той или иной формы газового разряда и, следовательно, предполагает получение плазмы с заданными параметрами.

Существует, однако, одна область применения физики плазмы, которая занимает совершенно особое место. Речь идет об управляемом синтезе легких ядер. Реакция синтеза заключается в следующем: берутся атомные ядра и с применением некоторой силы сближаются настолько, что силы, действующие на таких расстояниях, преобладают над силами кулоновского отталкивания между одинаково заряженными ядрами, в результате чего формируется новое ядро. Первое практическое применение эта реакция получила в водородной бомбе, где атомная бомба используется в качестве запала.

Понятно, что более легкие атомные ядра проще свести на нужное расстояние. В итоге человечество может получить неограниченный по мощности, доступный и дешевый источник энергии. Станет возможным прямое преобразование энергии, выделяемой при вполне безопасной ядерной реакции в энергию электрическую. По словам Л. А. Арцимовича, человечество в полном смысле слова попадает в «энергетическое Эльдorado».

Среди различных экзотермических реакций слияния, в процессе которых из легких ядер синтезируются более тяжелые, особенно интересными являются реакции соединения ядер дейтерия и трития. Это должно происходить в полностью ионизованной горячей водородной плазме. В этом случае потери на возбуждение и ионизацию исключены и столкновения между ионами плазмы рано или поздно завершаются ядерным синтезом. Таким образом, для осуществления реакции синтеза в дейтерий-тритиевой плазме необходимо обеспечить высокую температуру (нагреть) и концентрацию ионов (сжать) в течение определенного времени. Время нагрева — от десятых до порядка 10 с. При этом основная проблема сводится к проблеме удержания (сжатия) плазмы. В природе такое сжатие осуществляется (в звездах) с помощью гравитации: наружные слои звезды так тяжелы, что сжимают внутренний объем, нагревая его до такой температуры, когда скорость сближения ядер уже преодолевает барьер электрического отталкивания. Но современная технология не способна создать такие огромные гравитационные давления, и она пошла по другому пути.

Если говорить привычным языком, можно сказать, что дело за «посудой» для горячей плазмы. Магнитные силовые линии, которые ведут себя подобно сопротивляющимся сжатию жгутам, начнут быстро «выпучиваться», так что изгиб будет увеличиваться вплоть до разрушения всей структуры плазменного шнура. В результате плазма вступит в контакт со стенками камеры и охладится. Удержать плазму — значит не дать ей возможность коснуться стенок камеры, в которой плазма находится. Чтобы исключить это губительное явление, до пропускания основного аксиального тока в камере создают продольное магнитное



Рис. 30.24. Неустойчивый плазменный шнур

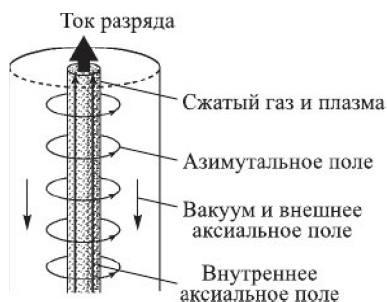


Рис. 30.25. Плазменный шнур можно защитить от неустойчивости изгиба аксиальными полями, создаваемыми внутри и снаружи токнесущего шнура

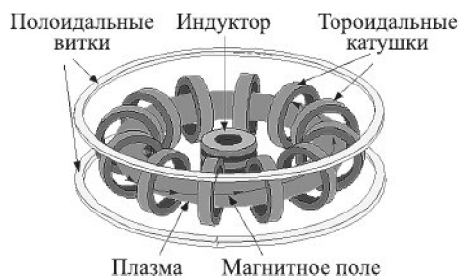


Рис. 30.26. Принципиальная схема узлов «Токамака»

поле, которое вместе с приложенным позднее круговым полем выпрямляет зарождающийся изгиб плазменного шнура (рис. 30.25). Принцип стабилизации плазменного шнура аксиальным полем положен в основу двух перспективных проектов термоядерных реакторов — токамака и пинча с обращенным магнитным полем. Установку для управляемого термоядерного синтеза, получившую название «**тороидальная камера с магнитными катушками**», сокращенно — «**Токамак**», разработали в СССР И. Е. Тамм (1895–1971) и А. Д. Сахаров (1921–1989). В 1955–1956 гг. в СССР построены первые установки «Токамак». В 1968 году в СССР на установке «Токамак-3» зарегистрированы первые термоядерные нейтроны.

Несмотря на то что исследованиями управляемого термоядерного синтеза заняты большие научно-технические коллективы во многих развитых странах, предстоит решить еще немало сложных проблем, прежде чем промышленное производство термоядерной энергии станет реальностью.

В настоящее время усилиями ведущих стран мира строятся различные

установки. Если все пойдет по плану, то в последней четверти XXI века мир вступит в эпоху термоядерной энергии.

В нашем путешествии мы с каждым шагом погружаемся во все более потаенные области материи. После открытия и изучения атомов подошли вплотную к изучению ядра атома. И тут мы вновь обращаемся к вопросу, поставленному первыми атомистами почти 2500 лет тому назад: а до какой степени можно дробить вещество?

В течение двух тысячелетий царствовала гипотеза о неделимости и бесструктурности атома. В XVII и XVIII веках химики подтверждали эту идею, показывая, что некоторые вещества не могут быть подвергнуты дальнейшему расщеплению на составляющие элементы с помощью химических методов. Открытия строения атома и атомного ядра — крупнейшие достижения физики. Как замечательно, что всё, что нас окружает, построено из элементарных частиц всего-навсего трех сортов: электронов, протонов, нейтронов. Хороший подарок преподнесла ядерная физика — существенно упростила картину устройства мира, и в течение некоторого времени казалось, что в физике царит полное благополучие. Увы, благополучие очень скоро нарушилось. Более глубокое изучение свойств атомных ядер, протонов, нейтронов, электронов привело к открытию позитрона, нейтрино, мюонов и других частиц, названных элементарными.

31. *Всепроникающая частица. Камера Вильсона. Как «положительный электрон» стал позитроном. Обитатели микромира. Космические лучи и элементарные частицы. В погоне за частицами. Ускорители больших энергий и физика элементарных частиц. Левиафаны в мире ускорителей. Попытки классификации элементарных частиц.*

Элементарные частицы. Элементарные частицы — материальные объекты, которые нельзя разделить на составные части. Вроде бы ясное определение. В соответствии с этим определением к элементарным частицам не могут быть отнесены молекулы, атомы и атомные ядра, которые поддаются делению на составные части: атом делится на ядро и орбитальные электроны, ядро — на нуклоны. В современной физике термин «элементарные частицы» используют в более широком смысле: так называют мельчайшие частицы материи, подчиненные условию, что они не являются атомными ядрами и атомами (исключение составляет протон); иногда по этой причине элементарные частицы называют субъядерными частицами. Большая часть таких частиц (а их известно уже более 350) являются составными системами.

В середине 30-х годов прошлого века было установлено, что «кирпичиками мироздания» являются не атомы, а протоны, нейтроны и электроны. Одной из основных проблем в ядерной физике 20–30-х годов XX века была проблема бета-распада: спектр электронов, образующихся при β -распаде, измеренный английским физиком Д. Чедвиком еще в 1914 году, имеет непрерывный характер, то есть из ядра вылетают электроны самых различных энергий. С другой стороны, в соответствии с развитыми к тому времени квантово-механическими представлениями энергетические уровни в атомном ядре должны носить дискретный характер. Отсюда следовало, что спектр вылетающих при распаде ядра частиц должен быть дискретным и показывать энергии, равные разностям энергий уровней, между которыми происходит переход при распаде. Таковым, например, является спектр альфа-частиц при альфа-распаде. Таким образом, непрерывность спектра электронов β -распада ставила под сомнение закон сохранения энергии, так как энергия испускаемого электрона могла иметь энергию от нуля и выше максимального вычисленного значения. Дело было очень серьезным: все выглядело так, как будто нарушался закон сохранения энергии. Физики взволновались. Как мы рассказывали выше, вопрос стоял настолько остро, что в 1931 году знаменитый Н. Бор на Римской конференции выступил с идеей о несохранении энергии! Однако было и другое объяснение: потерянную энергию уносит какая-то неизвестная и незаметная частица.

Эта теоретическая догадка принадлежала В. Паули (1930). «После открытия нейтрона, — говорил Паули на семинарах в Риме, — мою новую частицу, испускаемую при β -распаде, Ферми стал называть «нейтрино», чтобы отличить ее от тяжелого нейтрона». Это итальянское название стало общепринятым. И сразу же были предсказаны ее свойства: она должна быть электрически нейтральной и чрезвычайно малой по массе (иначе бы ее легко наблюдали). Последнее свойство, согласно теории относительности, приводит к тому, что нейтрино (если у него нет «массы покоя») не может находиться в состоянии покоя: оно всегда движется со скоростью света (последние исследования дают для массы нейтрино величину меньше $1/25\,000$ массы электрона). Нейтрино — одна из самых распро-

страненных и энергичных частиц во Вселенной. Она является элементарной частицей, которая, вместе с другими частицами — кварками и лептонами (электроны, мюоны и др.) — образует все вещество (от атомов до молекул, карандашей, людей и звезд). Понятно, что частицу со свойствами нейтрино обнаружить чрезвычайно трудно. Поймать нейтрино очень трудно из-за его слабого взаимодействия с другими частицами и поэтому огромной проникающей способности. Нейтрино могут беспрепятственно проникать, скажем, сквозь чугунную плиту, толщина которой в миллиарды раз превышает расстояние от Земли до Солнца! Без каких-либо последствий для нас с вами каждую секунду через наше тело свободно проходят многие триллионы таких частиц. По той же причине они путешествуют в космосе на весьма значительные расстояния, не «сбиваясь с курса», просто пролетая сквозь встретившиеся планеты.

Но уже 14 июня 1956 года американская экспериментальная группа Фредерика Рейнса сообщала о детектировании нейтрино и о том, что интенсивность его взаимодействия с протоном отлично совпадает с расчетами по теории Ферми. Правда, «поймали», как потом выяснилось, не нейтрино, а антинейтрино, а это не совсем тождественные частицы. Требуются опыты, которые позволили бы «поймать» нейтрино и доказать, что оно действительно обладает теоретически приписанными ему удивительными свойствами. Для поимки неуловимой частицы строят специальные детекторы под землей, подо льдом и т. п. Физики не отчаиваются и ставят все новые опыты, чтобы отловить эту удивительную частицу.

Нейтрино не ограничились открытия первой трети двадцатого века.



Рис. 31.1. Чарльз
Томас Вильсон



Рис. 31.2. Камера Вильсона.
1912 г.

В 1911 году в физике произошло важное событие. Профессор Кембриджского университета шотландец Чарльз Вильсон (1869–1959) создал удивительный прибор для наблюдения следов-треков отдельных альфа-частиц. Прибор получил название камеры Вильсона. Принцип действия камеры основан на использовании явления конденсации перенасыщенного пара при появлении в среде такого пара каких-либо центров конденсации (в частности, ионов, сопровождающих след быстрой заряженной частицы): на них образуются мелкие капли жидкости. Эти капли достигают значительных размеров и могут быть сфотографированы. Источник исследуемых частиц может располагаться либо внутри камеры, либо вне ее (в этом случае частицы залетают через прозрачное для них окно). Для исследования количественных характеристик частиц (например, массы и скорости) камеру помещают в магнитное поле, искривляющее треки. Создание туманной камеры (так назывался этот прибор до момента присвоения ему имени изобретателя) оказалось чрезвычайно трудоемким процессом. Для нее потребовалось несколько очень сложных стеклянных деталей, которые Вильсон изготовил сам, освоив профессию стеклодува. Пол лаборатории был устлан осколками, колбы лопались вновь и вновь. Виль-

сон не расстраивался, начинал все сначала, только приговаривал, пристраивая к аппарату очередную колбу: «Милая, милая, ты же потерпишь немного?»

Изобретенный прибор сразу завоевал известность среди физиков, изучающих атомы и ядра. Так, Резерфорд высоко оценил возможности камеры Вильсона для экспериментаторов и, по словам Н. Бора, говорил о ней почти с детской радостью. Он сказал, что это «самый оригинальный и удивительный инструмент в истории науки». Фредерик Жолио-Кюри усовершенствовал камеру Вильсона, благодаря чему удалось увеличить длину трека в 76 раз. Это значительно улучшило возможность наблюдения — по длине трека судят об энергии частицы.

Камера Вильсона сыграла большую роль в доказательстве реальности существования микрочастиц. Эта камера, правда в модернизированном виде и даже под другими названиями, играет большую роль в экспериментальном изучении процессов микро- и субмикромира.

Начиная с 30-х годов и вплоть до 50-х годов новые частицы открывались главным образом в космических лучах (космические лучи — потоки атомных ядер высокой энергии, в основном протонов, попадающих на землю из космического пространства).

Их исследованию уделялось много внимания особенно в первой половине двадцатого века. Космические лучи были открыты австрийским ученым В. Ф. Гессом в начале нашего века. В 1912–1914 гг. совместно с Кольхерстером он доказал, что на высотах, больших 3 км над уровнем моря, интенсивность проникающей радиации, регистрируемая электроскопом, увеличивается.

Такой рост ионизации с высотой мог быть вызван только частицами внеземного происхождения. Космические лучи непрерывным потоком падают на Землю. Они приходят к нам как из ближнего (околосолнечного), так и дальнего (галактического) и, по-видимому, сверхдальнего (метегалактического) мирового пространства.

Изучая тысячи фотографий конденсационных треков в камере Вильсона, оставленных высокоэнергетическими частицами, летящими из внеземного пространства, норвежский физик Карл Андерсен (1905–1991) заметил несколько следов, которые отличались от следов электронов только одним: они отклонялись в противоположном направлении (рис. 31.4). Другие исследователи тоже замечали время от времени подобные следы, но, поскольку теоретическое обоснование для существования положительно заряженной похожей на электрон частицы отсутствовало, они относили их за счет погрешностей эксперимента. Но Андерсен не отмахнулся от этих удивительных данных, за что впоследствии был отмечен Нобелевской премией. Так, в 1932 году



Рис. 31.3. 1911–1912 год,
Виктор Франц Гесс
(сидит в корзине)
(VF Hess Society/Schloss Pöllau)

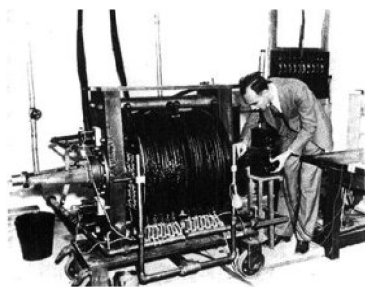
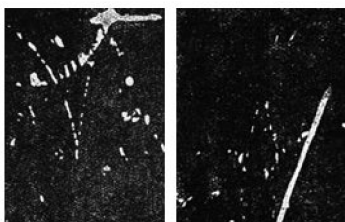


Рис. 31.4. Карл Андерсен на-
страивает фотокамеру для записи
треков в камере Вильсона



а) б)

Рис. 31.5. Изображены пути электрона и позитрона по снимку Ирен и Фредерика Жолио-Кюри в камере Вильсона

К. Андерсоном была обнаружена первая анти-частица — позитрон (e^+) — частица с массой электрона, но с положительным электрическим зарядом.

На рис. 31.5, а видно, что в газе сразу образуются две частицы — электрон и позитрон, пути которых изгибаются в разные стороны. На рис. 31.5, б видны пути позитрона и протона. Путь протона — в виде толстой полоски, а позитрона — в виде тонкой.

Название «позитрон» придумал сам Андерсон. Позитрон был первой открытой античастицей. Позитроны (положительные электроны)

в веществе не могут существовать, потому что при замедлении они аннигилируют, соединяясь с отрицательными электронами, а их масса превращается в энергию в форме двух (и гораздо реже — трех и более) гамма-квантов.

Вскоре после открытия позитрона были получены фотографии, проливающие свет на происхождение позитронов: под действием γ -квантов вторичного космического излучения позитроны рождались в парах с обычными электронами. Такие свойства вновь открытой частицы оказались в поразительном согласии с уже имевшейся релятивистской теорией электрона Дирака (1902–1984). Еще до открытия позитрона Дирак поставил себе задачу придать уравнениям волновой механики такую форму, чтобы они удовлетворяли и теории относительности. Эти уравнения Дирака, однако, привели к очень странному следствию. Решение уравнения предсказывало существование у электрона отрицательной энергии ($E < 0$). Поскольку вещество предпочитает находиться в состоянии с минимальной энергией, то выходило, что все электроны имели бы возможность провалиться в состояние с отрицательной энергией. Дирак так вышел из положения. Пусть в действительности, рассудил он, состояния с $E < 0$ заняты. Свободные же места — «дырки» — в этом заполненном фоне тогда

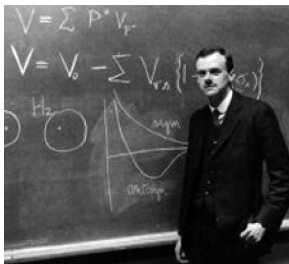


Рис. 31.6. Поль Дирак

должны отвечать частицам с положительной энергией, но несущим заряд, противоположный заряду электрона, то есть положительный. Голландский физик П. Эренфест на семинаре в Физическом институте Московского университета так комментировал еще не опубликованную тогда работу П. Дирака о следствиях из его уравнения: «Здесь речь идет о каких-то дырках в вакууме. Эти дырки несут положительный заряд... Если б это писал не Дирак, то я бы просто... Но Дирак — гений, вот и разберись тут!»

Теперь очевидно, что Дирак предсказал частицу с массой электрона, но зарядом «+», а тогда вначале хотел даже отождествить ее с протоном, но то была слишком массивная частица, чтобы вписаться в его релятивистскую квантовую теорию. 12 декабря 1933 года в Стокгольме Дирак прочел лекцию на тему «Теория электронов и позитронов», в которой предсказал существование антивещества. Предсказание и открытие позитрона породили в научном сообществе уверенность, что начальная кинетическая энергия одних частиц может быть преобразо-

вана в энергию покоя других, и привели в дальнейшем к стремительному росту числа элементарных частиц. Так и случилось.

В 1936 году Х. Андерсон и С. Неддермейер открыли мюон (μ -мезон). Эта частица отличается от электрона только своей массой, которая примерно в 200 раз больше электронной. Существование подобных частиц из чисто теоретических соображений предсказал в 1935 году японский физик-теоретик Хидэки Юкава (1907–1981).

Затем были открыты и другие разновидности частиц, играющие важную роль во взаимодействии протонов с нейтронами в ядрах. Существование подобных частиц также было также предположено Х. Юкавой. Тогда же этот талантливый физик постулировал существование еще не найденных частиц, π -мезонов, или пионов, которые должны были «склеивать» нуклоны, играя роль ядерных сил.

Надо отдать должное космическим лучам — они явились источником крупнейших открытий XX века: открытия антиматерии (позитрона), тяжелых электронов (мюонов), открытия пиона, который играет ведущую роль в ядерных процессах, и многого другого. Их изучение привело к открытию процесса множественного рождения частиц, к открытиям электромагнитного и ядерно-каскадного процессов при прохождении частиц через вещество.

В атмосфере Земли атомные ядра первичных космических лучей, сталкиваясь с ядрами атомов воздуха, порождают новые элементарные частицы. Этот процесс получил название процесса множественного рождения частиц. Из рис. 31.8 видно, что во вторичном космическом излучении встречаются многие элементарные частицы.



Рис. 31.7. Х. Юкава

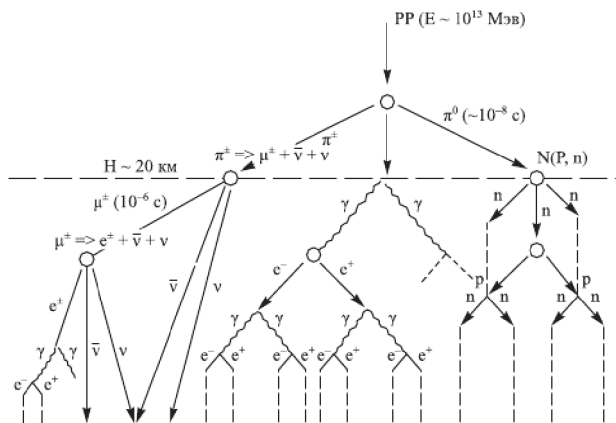


Рис. 31.8. Каскадный процесс рождения частиц

После создания ускорителей электронов, протонов и атомных ядер исследование элементарных частиц и их свойств переместилось из космических лучей на ускорители. Наступила эра ускорителей заряженных частиц. Успехи в физике ядра и элементарных частиц всё в большей степени определяются прогрессом

в области создания ускорителей больших энергий. Мы знаем, что в соответствии с формулой де Бройля для изучения внутренней структуры частиц требуются большие энергии. Чем больше энергия «снаряда» (налетающего ядра), тем меньше длина волны ($\lambda = h/mv$) и тем больше деталей удастся различить.

Современные ускорители представляют собой сложные электрофизические комплексы, состоящие из большого числа установок, концентрирующих в себе все самые современные достижения науки и техники: сверхвысокий вакуум, сильноточную и высоковольтную электрическую аппаратуру, сверхпроводящие устройства и т. п.

Получить большую энергию частиц можно не только путем их ускорения в электрическом поле. Можно получить значительный выигрыш в энергии, если столкнуть два пучка частиц, так как при лобовом столкновении двух пучков частиц с одинаковыми массами и одинаковыми энергиями центр масс будет оставаться неподвижным (такой метод встречных пучков предложен Г. Будкером (1918–1977)). Однако, чтобы при этом сталкивающиеся пучки эффективно взаимодействовали, необходимо создать в области столкновения высокую плотность частиц. Ускорители такого типа были созданы и получили название ускорителей на встречных пучках, или коллайдеров. Самый крупный электрон-позитронный коллайдер — это LEP (Large Electron-Positron collider) лаборатории ЦЕРН, расположенный на территории сразу двух стран, Швейцарии и Франции. Его окружность составляет 27 км, и в настоящее время он работает на энергии центра масс сталкивающихся частиц 200 ГэВ. Эта цифра и является пределом для циркулярных электроно-позитронных коллайдеров.

В декабре 1991 года Совет ЦЕРН одобрил проект ускорителя нового поколения — Большого адронного коллайдера (LHC). В настоящее время LHC является самой большой «сверхпроводящей» установкой в мире с удерживающим магнитным полем величиной 10 Тесла (для сравнения: магнитное поле Земли составляет около $2 \cdot 10^{-5}$ Тл). Около 4000 тонн металла будет охлаждено до температуры на 291° ниже комнатной (-271° по Цельсию, всего на 2° выше

абсолютного нуля температур). За одну секунду на экспериментальных установках LHC будет происходить более одного миллиарда соударений! Кроме протонов на LHC планируется разгонять и тяжелые ядра атомов, например свинца. В работе над созданием LHC принимают участие много российских ученых. Этот ускоритель уже вступил в работу и продолжает совершенствоваться.

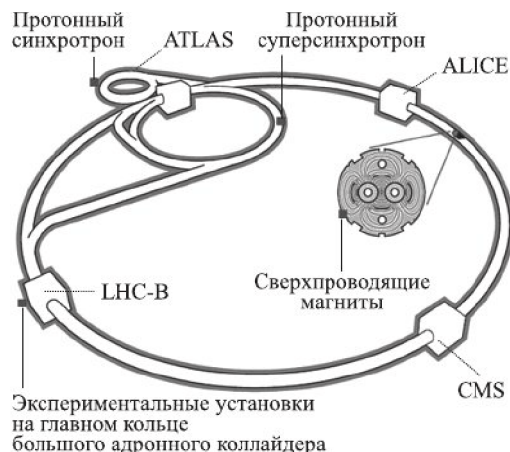


Рис. 31.9. Большой адронный коллайдер (с сайта «Популярная механика»)

Большой адронный коллайдер — это самая большая в мире экспериментальная установка подобного типа. Она многоступенчатая, каждая ступень разгоняет протоны до больших

энергий, пока системы магнитов в специальных камерах не сведут частицы с их крутовых путей по главному кольцу и не направят их навстречу друг другу.

Новый ускоритель рассчитан на энергии, прежде не подвластные человечеству. С его помощью можно будет получить новые частицы, которые сейчас неизвестны, новые состояния вещества.

На кольце ускорителя установлены четыре детекторные станции: ATLAS, CMS, ALICE и LHCb. Это своего рода ловушки и суперсовременные исследовательские лаборатории одновременно. Они призваны помочь ученым обнаружить и инструментально зарегистрировать ожидаемые (предсказанные) теоретиками эффекты при столкновении частиц сверхвысокой энергии, идентифицировать их. А также, вполне возможно, выявить и попытаться объяснить абсолютно новые явления и состояния.

Каждый такой детектор — высотой с многоэтажный дом и в буквальном смысле напичкан электроникой. Достаточно сказать, что CMS весит 12,5 тыс. тонн, спроектирован и построен при сотрудничестве 2250 физиков из 33 стран, в том числе и из России.

Многие из открытых частиц в ускорителях были крайне неустойчивы. За исключением протона и электрона, все эти частицы нестабильны, то есть очень скоро распадаются на другие элементарные частицы (за пределами ядра быстрому распаду подвержен даже нейтрон). Мир элементарных частиц оказался устроенным очень сложно, и для их описания помимо характеристик, заимствованных из классической физики, таких как электрический заряд, масса, момент количества движения, потребовалось ввести много новых специальных характеристик. Много сил потратили физики, чтобы навести порядок в мире элементарных частиц, классифицировать их наподобие таблицы Менделеева для атомов. Пока полностью решить эту задачу не удалось, хотя кое-какие закономерности обнаружены.

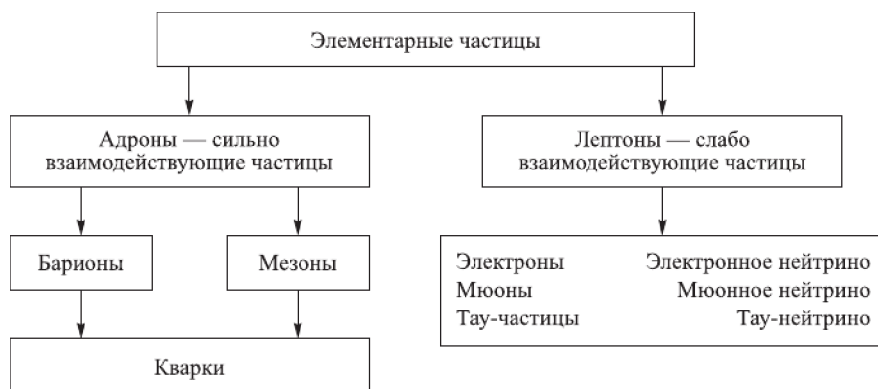
Почти все наблюдаемые частицы принадлежат одному из двух семейств: лептонам или адронам. Основное различие между ними состоит в том, что адроны участвуют в сильном взаимодействии, а лептоны не участвуют.

Лептоны. Слово «лептон» происходит от греческого *leptos*, что значит «маленький». К этому семейству наряду с электроном относятся мюоны и тау-частицы, которые похожи на электрон, но массивнее его. Обе эти тяжелые частицы нестабильны и со временем распадаются на несколько продуктов, включая электрон. Также имеется три электрически нейтральные частицы с нулевой (или близкой к нулю, на этот счет ученые до конца не определились) массой, получившие название «нейтрино». Каждая из трех разновидностей нейтрино парна одной из трех частиц электронного семейства. Верхний предел размера лептонов составляет около 10^{-18} м.

Адроны. Термин «адрон» происходит от греческого *hadros* («большой»). К адронам относят частицы, существующие внутри атомного ядра. Самые известные из них — это протон и нейтрон, но быстро распадающихся родственников у них сотни (в буквальном смысле). За исключением протона, все они нестабильны, и их можно классифицировать по составу частиц, на которые они распадаются. Если среди конечных продуктов распада частицы имеется протон, ее называют «барион» (от греческого *barys* — «тяжелый»); если же протона среди продуктов распада нет, частица называется «мезон» (от греческого *mesos* — «средний»). Эксперименты показали, что адроны обладают внутренней структурой.

М. Гелл-Манн и Г. Цвейг в 1963 году независимо высказали идею, согласно которой адроны построены из трех более фундаментальных объектов, названных кварками. Кварки, по их мнению, представляют собой истинно элементарные частицы. Кварки обладают дробным электрическим зарядом: $1/3$ или $2/3$ заряда электрона или протона. Кварки не могут пребывать в свободном (не связанном друг с другом внутри элементарных частиц) состоянии. О самом факте существования кварков можно судить только по свойствам, проявляемым адронами, в состав которых они входят. Сегодня, согласно теории, предсказывается существование шести разновидностей кварков и в лабораториях уже открыты элементарные частицы, содержащие все шесть типов.

Всю вышеприведенную классификацию можно представить в виде следующей схемы.



Стандартной моделью назвали современную теорию строения и взаимодействий элементарных частиц. Эта теория базируется на очень небольшом количестве постулатов и позволяет теоретически предсказывать свойства тысяч различных процессов в мире элементарных частиц. Рабочим инструментом Стандартной модели является квантовая теория поля — теория, приходящая на смену квантовой механике при скоростях, близких к скорости света.

Помимо частиц (кварков, протонов, нейтронов...) в Стандартной модели существуют частицы, которые обеспечивают взаимодействие. Самое известное из них — электромагнитное. Ему соответствует фотон. Есть другие частицы, отвечающие за взаимодействия, — бозоны (частицы открыты давно, с известными свойствами). Должен быть гравитон, который экспериментально не обнаружили, но сомнений, что такая частица должна существовать, почти ни у кого нет.

Бозон Хиггса до последнего времени — единственное недостающее звено в Стандартной модели. В рамках этой модели он отвечает за инертную массу элементарных частиц. Эта частица была постулирована британским физиком Питнолмом Хиггсом. Предсказанный первоначально в теории, после нескольких десятков лет поисков, 4 июля 2012 года, в результате исследований на Большом адронном коллайдере был обнаружен кандидат на его роль. В марте 2013 года появились сообщения от отдельных исследователей ЦЕРНа, что найденная полугодом ранее частица действительно является бозоном Хиггса. Бозон Хиггса — последняя найденная частица Стандартной модели.

И все же Стандартная модель не может считаться окончательной теорией элементарных частиц. Физики уверены, что она должна быть частью некоторой более глубокой теории строения микромира. Что это за теория — достоверно пока неизвестно.

Изучение внутреннего строения материи и свойств элементарных частиц с первых своих шагов сопровождалось радикальным пересмотром многих устоявшихся понятий и представлений. Так что много интригующих открытий впереди!

Казалось, физики могли быть довольны: они построили мощное научное здание, стоящее на твердом фундаменте классической физики. Однако действительность, а точнее физические эксперименты, сильно поколебали уверенность физиков в своих теориях.

Новые пути древней науки

Новый век — новые взгляды. Все относительно. Как теперь смотреть на время? Объяснение необъяснимого: взгляд на гравитацию Эйнштейна. Чудеса новых теорий. Странности квантового мира. Эволюция Вселенной.

32. *А всегда ли прав Ньютон? «Год чудес». Опыт Майкельсона—Морли. Лоренцово сокращение. Абсолютное время Ньютона и время в СТО. Преобразования Лоренца. Парадокс близнецов. В перекрестиях пространства и времени. Чем быстрее, тем тяжелее. mc^2 — что это?*

К концу XIX века на счету физики было немало успехов. Удалось достичь глубокого понимания природы электричества и магнетизма, были открыты радиоволны, на твердую основу встала атомистическая теория. И хотя это заставило физику выйти за пределы доступных человеку непосредственных восприятий, новые идеи формулировались путем простой экстраполяции привычных представлений. Молекулы, атомы рассматривались как крохотные подобию бильярдных шаров. Электромагнитные поля мыслились как напряжения в гипотетической среде, названной эфиром, а световые волны — как колебания эфира. Таким образом, хотя атомы ввиду их слишком малых размеров были недоступны непосредственному наблюдению, а таинственный эфир невидим и неосязаем, с помощью аналогий с хорошо известными объектами им удавалось придавать наглядность. Предполагалось также, что этими невидимыми конструкциями управляют те же законы, которые действуют в мире более конкретных, знакомых физических систем.

Несмотря на новые открытия, в основе физики все еще лежала механика Ньютона. Сам Максвелл пробовал объяснить результаты своих исследований с механистической точки зрения, считая поле напряженным состоянием эфира — очень легкой среды, заполняющей все пространство, а электромагнитные волны — колебаниями эфира. Это было вполне естественно, так как в волнах обычно видели колебание какой-либо среды: воды, воздуха и так далее.

Итак, в начале двадцатого века физика располагала двумя признанными теориями, каждая из которых объясняла природные явления лишь в одной разновидности: механикой Ньютона и электродинамикой Максвелла.

В начале прошлого века казалось, что мир в основном познан. Генрих Герц однажды написал в письме к родителям, что ему попала в руки научная книга, изданная в конце XVII века, и что вот тогда ученому было что делать, не то что теперь, в конце XIX века. «Мне иногда действительно жаль, — писал он, — что не жил тогда, когда еще столь многое не было открыто; правда, и теперь еще имеется много неизвестного, однако я не верю, что сейчас может быть легко найдено что-нибудь такое, что может подействовать столь преобразующе на все ми-

ровозрение, как в то время, когда телескоп и микроскоп были еще только изобретены!»

Но Герц ошибался. «Героический век физики стоял у порога».

Неожиданно на рубеже XX века произошел величайший переворот в физике. Именно в это время великие принципы классической физики обнаружили свою несостоятельность перед лицом новых фактов. Внезапно была обнаружена нестыковка двух областей физики: проверенной временем и практикой механики Ньютона и сравнительно молодой науки электродинамики, в том числе описывающей распространение электромагнитных волн. Распространение электромагнитных волн описывалось уравнениями Максвелла, которые тоже были многократно проверены экспериментом и сомнений не вызывали.

Тогда уже было известно, что свет — это тоже электромагнитная волна и, следовательно, скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света. Но вот попытка поместить на движущийся поезд фонарик и посчитать, с какой скоростью будет распространяться свет этого фонарика, заканчивалась неудачей. В механике Ньютона скорости поезда и света надо было бы складывать, но уравнения Максвелла такого описать не могли, а попытки подправить ситуацию не удавались. Например, если лететь вдогонку за светом с такой же скоростью — со скоростью света, — то этот свет, по уравнениям Максвелла... исчезал. Совершенно неотличимая ситуация становилась от того, как если бы никакого света и не было.

Великолепное здание физической науки, воздвигнутое в XIX веке, в следующем веке красовалось недолго. Рухнуло оно в 1905 году. Это был год публикации одного из самых замечательных творений человеческого гения — теории относительности, созданной двадцатипятилетним Альбертом Эйнштейном. Выводы, изложенные в статьях нескольких выпусков немецкого физического журнала «Annalen der Physik» («Анналы физики») мало кому известного молодого физика, выпускника Цюрихского политехникума, ломали существовавшие дотоле представления, разрушали фундамент физики.

Журнал «Annalen der Physik» был в то время одним из наиболее авторитетных физических журналов не только в Европе, но и во всем мире. Выводы, приведенные в статьях, приводили читающих, несмотря на их внутренний протест, к парадоксальным результатам. Работы 1905 года затронули самые основы физической науки и впоследствии принесли их автору бессмертную славу. Эти статьи открыли так называемый Annus Mirabilis («Год чудес»), дав начало теории относительности и перевернув представления о строении вещества.

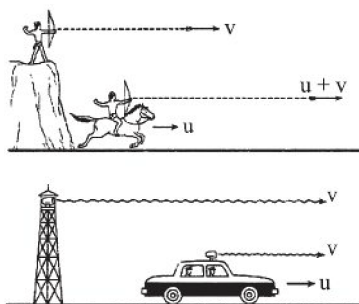


Рис. 32.1. Иллюстрация к принципу постоянства скорости света (www.nkj.ru/archive/articles/5250)



Рис. 32.2. Титульный лист семнадцатого номера, в котором была помещена статья Эйнштейна



Рис. 32.3. А. Эйнштейн, 1905 г.

При изучении механики мы рассмотрели принцип относительности, который впервые был установлен Галилеем, но окончательную формулировку получили лишь в механике Ньютона. Для его понимания нам потребуется ввести понятие системы отсчета, или координат. Как известно, положение движущегося тела в каждый момент времени определяется по отношению к некоторому другому телу, которое в совокупности с системой координат и часами образует систему отсчета. Среди систем отсчета особо выделяют инерциальные системы, которые находятся относительно друг друга либо в покое, либо в состоянии равномерного и прямолинейного движения. Особая роль инерциальных систем заключается в том, что именно для них выполняется

принцип относительности, суть которого в том, что во всех инерциальных системах все механические процессы происходят одинаковым образом. В таких системах законы движения тел выражаются той же самой математической формой, или, как принято говорить в науке, они являются инвариантными.

Принцип относительности Галилея и теория Максвелла. Действительно, два разных наблюдателя, находящихся в инерциальных системах, не заметят в них никаких изменений по отношению к иной системе, хотя различные наблюдатели по-разному воспринимают действительность, включая столь фундаментальные величины, как расстояния и время.



Рис. 32.4. Путь шарика различен для разных наблюдателей

Например, если вы находитесь внутри равномерно движущегося тела, скажем в вагоне поезда, закрытом со всех сторон так, что не виден проносящийся мимо пейзаж, то не существует такого механического эксперимента, с помощью которого вы могли бы доказать, что вы движетесь. (При этом, конечно, предполагается, что равномерное движение происходит совершенно гладко, без толчков или раскачки вагона, которые могли бы служить показателями движения.) Это то, о чем говорил Галилей в своих мысленных экспериментах, описанных в «Диалогах». Если вы подбросите шарик пря-

мо вверх, он упадет прямо вниз. Все происходит в точности так же, как если бы поезд стоял. Наблюдатель, стоящий на земле, вне движущегося вагона, если бы он мог видеть сквозь его стены, увидел бы путь шарика кривым (см. рис. 32.4). Таким образом, реальные траектории оказываются различными в разных системах. Но это не нарушает принципа относительности: законы физики остаются неизменными во всех инерциальных системах отсчета. И закон всемирного тяготения, и законы движения Ньютона будут справедливы в обеих системах отсчета.

Правда, оставался до конца невыясненным вопрос: как скрестить механику Ньютона с уравнениями Максвелла (электродинамикой)?

Речь идет о принципе относительности Галилея (в механике), его законе сложения скоростей, когда брошенный в движущемся вагоне шарик имел сум-

марную скорость относительно платформы $w = v + u$. Но оказалось, что уравнения Максвелла не удовлетворяют принципу относительности. Они не одинаковы в разных системах отсчета. Наиболее простой вид они принимали в системе отсчета, в которой $c = 3,0 \cdot 10^8$ м/с, то есть в системе отсчета, покоящейся относительно эфира. В любой другой системе отсчета в уравнения Максвелла было необходимо вводить добавочные члены, которые учитывали бы относительную скорость. Казалось, что уравнения Максвелла предпочитают одну выделенную систему отсчета другим, а именно ту, которую можно было считать абсолютно покоящейся системой отсчета. Да и с эфиром не все было ясно: как может Земля двигаться сквозь упругую среду, какой по существу является светоносный эфир?

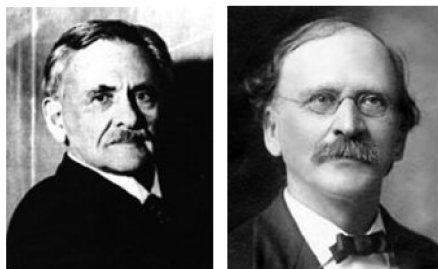


Рис. 32.5. Альберт Майкельсон и Эдвард Морли

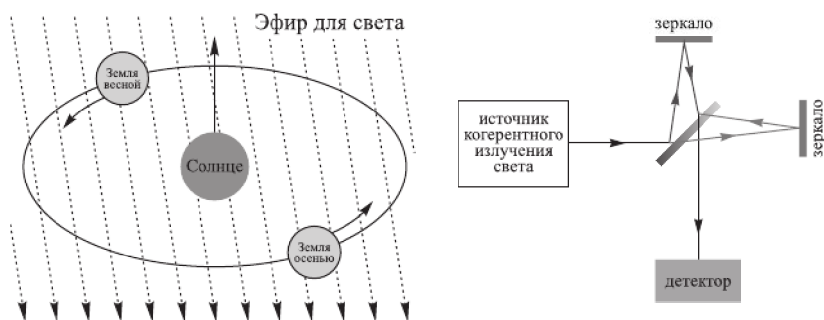


Рис. 32.6. Движение Земли вокруг Солнца и через эфир.
Схема экспериментальной установки

Физики принялись определять скорость Земли относительно этой абсолютной системы отсчета. Альберт Майкельсон (1852–1931) и Генри Морли (1838–1923) решили совместно провести эксперимент, призванный раз и навсегда доказать скептикам, что *светоносный эфир* реально существует, наполняет Вселенную и служит средой, в которой распространяются свет и прочие электромагнитные волны. Как-то Майкельсон сказал: «То, что скорость света является категорией, недоступной человеческому воображению, и что, с другой стороны, ее возможно измерить с необыкновенной точностью, делает ее определение одной из самых увлекательных проблем, с которыми может столкнуться исследователь». Схема установки и поясняющий рисунок (рис. 32.6) дают лишь общее представление об очень сложном прецизионном опыте двух замечательных физиков. Майкельсон и Морли использовали *интерферометр* — оптический измерительный прибор, в котором луч света расщепляется надвое полупрозрачным зеркалом (стеклянная пластина посеребрена с одной стороны ровно настолько, чтобы частично пропускать поступающие на нее световые лучи, а частично отражать их (аналогичная технология сегодня используется в зеркальных фотоаппаратах). В итоге луч расщепляется, и два получившихся *когерентных* луча расходятся

под прямым углом друг к другу, после чего отражаются от двух равноудаленных от полупрозрачного зеркала — зеркал-отражателей — и возвращаются на полупрозрачное зеркало, результирующий пучок света от которого позволяет наблюдать интерференционную картину и выявлять малейшую *десинхронизацию* двух лучей (запаздывание одного луча относительно другого). Весь аппарат был помещен на подушку из жидкой ртути и мог свободно вращаться; он был настолько чувствителен, что легко регистрировал движение проезжающих мимо конных экипажей. Опыт Майкельсона–Морли был принципиально направлен на то, чтобы подтвердить (или опровергнуть) существование мирового эфира посредством выявления эфирного ветра (или факта его отсутствия).

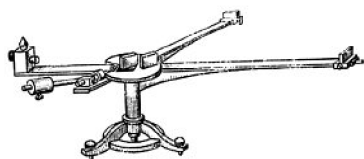


Рис. 32.7. Внешний вид первого интерферометра Майкельсона. m — полупрозрачная пластина, m' — пластина-компенсатор. Вторая пластина m' вырезалась из того же куска стекла, что и пластина m , однако, в отличие от нее, была полностью прозрачной. Использование дополнительной пластины связано с необходимостью скомпенсировать разность хода, возникающую из-за того, что одному из лучей приходится дважды проходить через полупрозрачную пластину, а другому — только один раз (physiclib.ru)

Действительно, двигаясь по орбите вокруг Солнца, Земля совершает движение относительно гипотетического эфира полгода в одном направлении, а следующие полгода — в другом. Следовательно, полгода эфирный ветер должен обдувать Землю и, как следствие, смещать показания интерферометра в одну сторону, полгода — в другую. Однако, наблюдая в течение года за своей установкой, Майкельсон и Морли не обнаружили никаких смещений в интерференционной картине! Они получили результат, который английский ученый Дж. Бернал назвал величайшим из всех отрицательных опытов в истории науки. Эксперименты Майкельсона–Морли закончились ничем. Так называемый нулевой результат глубоко отразился на мировоззрении физиков.



Рис. 32.8. Скорость Земли, измеряемая в одном направлении, изменяется на протяжении полугода примерно на 60 км/с. Если пространство абсолютно и в нем существует неподвижный светоносный эфир, то в экспериментах, проведенных на Земле, скорость света должна была бы изменяться на 60 км/с. Эксперимент Майкельсона–Морли такого изменения не обнаружил, что поставило под вопрос существование эфира (Encyclopaedia.big.ru)

Современные эксперименты подобного рода, проведенные с максимальной точностью (современные варианты эксперимента Майкельсона используют оптические и криогенные микроволновые резонаторы и позволяют обнаружить отклонение скорости света, если бы оно составляло несколько единиц на 10^{-16}), дали аналогичные результаты.

Итак: эфирного ветра, а стало быть, и эфира не существует. Опыт Майкельсона–Морли окончательно показал, что абсолютной системы отсчета в природе не существует.

Лоренцово сокращение. Отрицательный результат эксперимента Майкельсона–Морли был неожиданным и непонятным. Теория эфира не была отвергнута после опыта Майкельсона–Морли, уж очень она прижилась в физике. И большинство физиков того времени не приняло в расчет опыты Майкельсона по определению скорости эфира, хотя восхищалось точностью измерений скорости света в различных средах. В течение нескольких лет было предложено несколько объяснений. Попытку спасти положение предпринял в 1892 году Джордж Фицджеральд (1851–1901), который показал, что отрицательные результаты опыта Майкельсона можно объяснить, если принять, что размеры тел, движущихся со скоростью v , сокращаются в направлении их движения в $\sqrt{1 - \beta^2}$ раз, где $\beta = v/c$ (c — скорость света). Это было всего лишь блестящей гипотезой, но Лоренц предложил ее обоснование. По Лоренцу, причиной такого сокращения линейного размера («линейки») могло быть влияние эфира на силы взаимодействия между молекулами вещества. А эти силы определяются исключительно кулоновским взаимодействием. В такой картине скорость света менялась на самом деле, но измерить этот эффект было невозможно, потому что менялась и длина самой линейки под воздействием все того же эфира, причем в том же направлении и точно в такой же степени. Впоследствии появилась критика этой интерпретации (в роли «линейки» могут выступать не твердые тела, а сами электромагнитные волны, а они вовсе не состоят из атомов).

Теория Лоренца–Фицджеральда вскоре уступила место специальной теории относительности А. Эйнштейна. Толчком к созданию этой теории, однако, послужили не опыты Майкельсона–Морли, а рассуждения Эйнштейна над проблемами электромагнитной теории света и измерения времени.

Абсолютное время Ньютона. По-настоящему изучение времени как понятия физики началось с Галилея, то есть в семнадцатом веке — в эпоху становления физики как науки. Ньютон использовал доводы Галилея, придав им математическую формулировку в своем втором законе: ускорение (a) прямо пропорционально силе (F), действующей на тело ($F = ma$). Отсюда формально вытекает закон инерции (когда ускорение при прямолинейном движении равно нулю), открытый фактически Галилеем. Итак, если действующие на тело силы в сумме (точнее — векторная сумма) равны нулю, то тело движется равномерно с постоянной скоростью. То есть за равные промежутки времени проходит один и тот же путь. Но что это за время, о котором идет речь в этом законе? Это время каких-то определенных часов? Если да, откуда мы знаем, какие это часы? Мы должны, конечно, определиться, потому что, как мы уже знаем, все реальные часы в конечном счете выйдут из синхронизации друг с другом (нет идеальных часов: какие-то с течением времени отстают, какие-то спешат и т. п.). Или же предпочтительнее закон, который отсылает к идеальному, абсолютному времени? И Ньютон вводит некое абсолютное время таким определением: *«Абсолютное, истинное математическое время, само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью»*. Такое определение времени Ньютон дает в самом начале своих знаменитых «Начал», отделяя его от того времени, которое показывают реальные часы, или, по определению Ньютона, «обыденные» часы. Действительно, ведь воспринимаемый нами настоящий момент времени не является таковым. Выстрел пушки в отдалении мы воспринимаем

вначале по дыму, а затем слышим звук. Скорость света неизмеримо больше скорости звука, так что первым как раз виден дым, а лишь потом звук от выстрела. Иными словами, информация, воспринимаемая нашими органами чувств, размазана во времени. Поэтому то, что мы считаем настоящим моментом времени, вовсе не настоящий и субъективное восприятие одновременности не существует. А как же осуществить объективную оценку времени?

Существование единого мирового времени, не зависящего от системы отсчета, которое принималось как очевидный факт в классической физике, эквивалентно неявному допущению о возможности синхронизации часов с помощью сигнала, распространяющегося с бесконечно большой скоростью.

Итак, если выбрать ту точку зрения, что упомянутый закон движения относится к абсолютному времени, то кажется, что проблема со временем, выбором часов решена. Увы, это не так, так как возникает другая проблема. Как «достучаться» до этого абсолютного идеального времени? Ведь у нас нет абсолютно точных часов, а значит, и доступа к этому абсолютному времени. Поэтому можно быть уверенным, что изменение в движении тела, происходящее в эксперименте, связано с нарушением закона или дефектом используемых часов. Резюмируя, можно сказать, что время Ньютона есть время измеряемое, тогда как время абсолютное есть его математическая модель со свойствами, выводимыми из относительного времени при помощи абстрагирования. Сам Ньютон, говоря о времени, пространстве и движении, постоянно подчеркивает, что они постигаются нашими чувствами и тем самым являются обыденными (относительными), то есть суть лишь результаты измерений.

Итак, в разных точках выбранной системы отсчета можно расположить синхронизованные часы. Теперь можно дать определение понятия одновременности событий, происходящих в пространственно разобщенных точках: эти события одновременны, если синхронизованные часы показывают одинаковое время. В пространстве-времени мы в какой-то конкретный момент времени — это точка. Потом мы движемся. При этом мы смещаемся по осям пространства, и по оси времени тоже. То есть мы идем в пространстве-времени по наклонной линии. Если мы «сидим на месте», то мы смещаемся только по оси времени — по вертикальной линии. Совсем никуда не смещаться мы не можем, потому что время всегда идет. Таков наш привычный мир.

Чтобы синхронизировать события, происходящие в двух разных системах отсчета по времени, нужно иметь возможность передавать сигналы о показаниях часов в этих разных системах. Как это сделать наилучшим образом? Для этого необходимо, например, выбрать какой-то сигнал, передающий информацию самым быстрым способом, в идеале имеющим бесконечную скорость. Но такого сигнала в природе нет. А что имеется?

Время в СТО. В своей специальной теории относительности (термин «теория относительности» ввел Макс Планк) А. Эйнштейн впервые озаботился проблемой времени. В одной из своих статей Альберт Эйнштейн писал, что «цель Ньютона заключалась в том, чтобы дать ответ на вопрос: существует ли простое правило для полного вычисления движений небесных тел нашей планетной системы по заданному состоянию движения всех этих тел в один определенный момент времени? И Ньютон дал простой ответ на этот вопрос. Но для этого ему

пришлось абстрагироваться, то есть от реальности перейти к идеалу — к абсолютному идеальному времени. И его теория верой и правдой служила практике многие десятки лет. Против концепции абсолютного пространства и абсолютного времени ополчился пользовавшийся тогда большим авторитетом физик и философ Эрнст Мах (1838–1916). Именно это привлекло внимание А. Эйнштейна.

В конечном же итоге оказалось, что нет никакого абсолютного ньютоновского времени. Но если это так, то ньютоновские законы движения не имеют смысла. То, что должно заменить их, должно быть законом, который может иметь смысл, если вы измеряете время какими-нибудь часами. Таким образом, закон, в котором время любых часов, какими бы несовершенными они не были, столь же верно, как и любых других». Результат состоит в том, что о времени нельзя говорить вообще или абстрактно; мы можем только описать, как Вселенная изменяется во времени, если мы сначала точно обговариваем, *какие именно реальные физические процессы будут использоваться в качестве часов для измерения течения времени.*

Свет, имеющий скорость, максимальную в природе. Эйнштейновское определение процедуры синхронизации часов основано на независимости скорости света в пустоте от направления распространения. Рассмотрим пример. Пусть из точки А в момент времени t_1 по часам А отправляется короткий световой импульс (рис. 32.9). Пусть время прихода импульса в В и отражения его назад на часах В есть t' . Наконец, пусть отраженный сигнал возвращается в А в момент t_2 по часам А. Тогда, по определению, часы в А и В идут синхронно, если $t' = (t_1 + t_2)/2$.

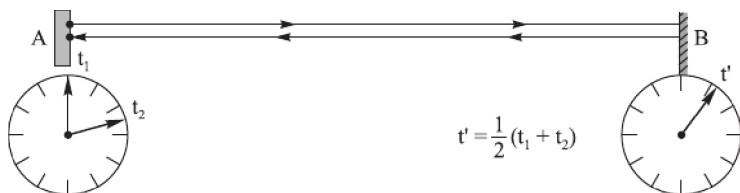


Рис. 32.9

Когда утверждают, что скорость света максимальна, имеют в виду, что принцип максимальной скорости света распространяется лишь на такие сигналы, которые могут быть средством причинной связи явлений. Хотя в принципе движение каких-то объектов со скоростью, большей скорости света в вакууме, вполне возможно. Представим себе, например, вращающийся вокруг вертикальной оси прожектор, испускающий в горизонтальном направлении узкий, резкий пучок света. Если в достаточном удалении от этого устройства поставить неподвижный экран, то по нему будет скользить световой зайчик, и притом тем быстрее, чем быстрее вращается прожектор и чем дальше поставлен экран. Можно подсчитать, например, что при удалении экрана на 500 км и вращении прожектора со скоростью 100 оборотов в секунду (при расчете скорости не забудьте про 2π), зайчик будет скользить уже со сверхсветовой скоростью. Но он никак не может быть использован для передачи информации с такой скоростью от одной точки стены к другой, а потому сверхсветовая скорость зайчика не имеет отношения к закону причинности и принцип максимальной скорости света на подобное движение не распространяется.

Этот зайчик часто фигурировал в распространенных когда-то попытках опровержения теории Эйнштейна (см. подробнее: Кузнецов Б. Г. Эйнштейн. Жизнь. Смерть. Бессмертие. 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука).



Рис. 32.10. Эйнштейн и Лоренц (1921)

Все мы живем в трехмерном мире — три размерности пространства. А время течет независимо от этих пространственных координат, никак с ними не связано. Но в специальной теории относительности не так: там пространство и время тесно взаимосвязаны. «Нам приходится принять, что время не отделено полностью от пространства и не независимо от него, но вместе с ним образует единый объект, который называется пространством-временем». На первый взгляд это может показаться странным. Но этот четырехмерный мир отражает то, что любое тело или событие характеризуется четырьмя величинами, из которых *три указывают, где в пространстве, а четвертая — когда во времени находится тело или происходит событие*.

Выводы, о которых мы говорили выше, являются неизбежными следствиями двух аксиом или постулатов СТО.

Первый постулат (принцип относительности). Законы физики имеют одинаковую форму во всех инерциальных системах отсчета (то есть в которых справедлив закон инерции).

Второй постулат (постоянство скорости света) согласуется с первым. Свет распространяется в пустом пространстве с вполне определенной скоростью c , не зависящей от скорости источника или наблюдателя. *Скорость света выделяется и играет особую роль универсальной константы, что вытекает из уравнений Максвелла.*

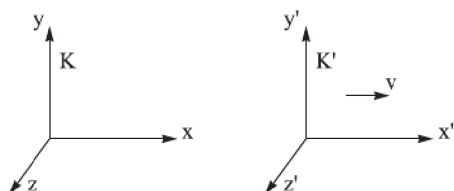


Рис. 32.11. Преобразования Лоренца в случае, когда система K' движется относительно K со скоростью v вдоль оси x

При этом в новой теории нашли свое применение найденные Х. Лоренцем в 1904 году преобразования, оставляющие неизменными электромагнитные явления при равномерном движении системы координат (преобразования Лоренца).

Преобразования Лоренца отражают равноправие всех инерциальных систем отсчета в описании законов природы. Если инерциальная система отсчета K' движется относительно инерциальной системы отсчета K с постоянной скоростью v вдоль оси x (рис. 32.11), то преобразования Лоренца имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \frac{t' + vx' / c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = \frac{t - vx / c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{array} \right.$$

($\beta = v/c$, c — скорость света в вакууме). Формулы, выражающие x' , y' , z' , t' через x , y , z , t получаются из приведенных соотношений заменой v на $-v$. Вывод

этих соотношений дан также Эйнштейном в 1917 году как следствие постулатов СТО (см.: Эйнштейн А. Физика и реальность. М. Наука, 1965). При $v \ll c$ преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея: $x = x' + vt$, $y = y'$, $z = z'$, $t = t'$ и $\Delta t = \Delta t'$.

Длины отрезков в двух системах отсчета связаны соотношением $\Delta l = \Delta l' / \sqrt{1 - \beta^2}$, то есть из преобразований Лоренца следует, что промежутки времени Δt и отрезки длины Δl зависят от движения системы отсчета.

Если мы хотим сравнить длины двух стержней, когда они неподвижны, достаточно совместить одни из их концов. А как сравнить длины двух стержней, если они параллельны и один из них движется по отношению к другому концом вперед (рис. 32.12), т. е. стержни все время параллельны направлению их относительного движения? Теперь такое сравнение стержней можно произвести только в некоторый определенный момент времени, не раньше и не позже.

Сравнивая стержни, мы употребили понятие одновременности событий. Но «один и тот же момент времени» с точки зрения системы отсчета, где стержень движется, не будет являться одним и тем же моментом с точки зрения системы отсчета, связанной со стержнем. События, одновременные в одной инерциальной системе, не будут такими в другой. Следовательно, если оба конца стержней в некоторой инерциальной системе совпадают в один и тот же момент времени, то в других инерциальных системах это не имеет места.

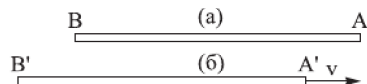


Рис. 32.12 Сравнение длин движущихся стержней, когда стержни параллельны направлению относительного движения. Такие стержни можно сравнивать в тот момент, когда концы A и A' совпадают (www.all-fizika.com)

Преобразования Лоренца явились математическим фундаментом для развития основных принципов теории относительности.

Таким образом, величина временного интервала (промежуток времени) и длина зависят от скорости движения относительно системы отсчета, в которой они измеряются. Чем ближе эта скорость к скорости света, тем больше величина временного интервала (на быденном языке говорят: время замедляется).

Вот характерный пример, демонстрирующий эффекты изменения пространственных и временных интервалов в СТО.

Предположим, что в поезде, мчащемся с очень большой скоростью, например 0,65c (с — скорость света), едет пассажир. По часам на стене вагона-ресторана пассажир приступает к обеду в 7:00 и заканчивает в 7:15. Эти два события (начало и конец обеда) в поезде происходят в одной и той же точке, поэтому собственное время между этими двумя событиями равно 15 мин. С точки зрения наблюдателей на земле, обед пассажира длится 20 минут (в полном соответствии с СТО). Предположим, что официант подал пассажиру блюдо на тарелке диаметром 20 см. Для наблюдателей на земле размер блюда в направлении движения поезда вследствие сокращения длины равен 15 см. Таким образом, с точки зрения наблюдателей на земле, порция была меньше, а обед длился дольше (пример из книги Джанколи Д. Физика. Т. 2. М.: Мир, 1989)!

Во все рассказанное трудно поверить, потому что оно столь непривычно, что просто не укладывается в голове. И не укладывалось почти у всех людей, даже, кажется, не укладывалось и у самого автора теории. Здесь уместно привести еще воспоминание Х. Вейцмана (1874–1952) от 1929 года: «Эйнштейн объяс-

нял мне свою теорию каждый день, и вскоре я уже был совершенно уверен, что он ее понял». Впрочем, кажется, на рассказанное стоит смотреть, конечно, лишь как на исторический анекдот, не более того.

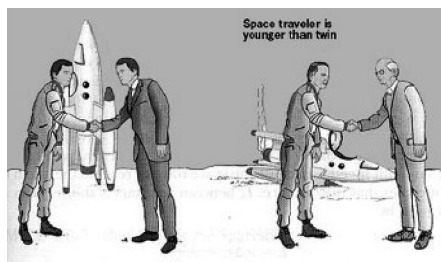


Рис. 32.13. Иллюстрация к «парадоксу близнецов»

Одно из ряда удивительных следствий — парадоксов времени — это известный *парадокс близнецов*. Парадокс часов, он же парадокс близнецов, был сформулирован в 1912 году французским физиком Полем Ланжевеном (1872–1946) (кстати, много сделавшего для распространения теории относительности во Франции) через семь лет после создания специальной теории относительности. Парадокс близнецов — это мысленный эксперимент, с помощью которого пыта-

лись объяснить возникшие противоречия в СТО. Чаще всего парадокс формулируется следующим образом: пусть один из двух братьев-близнецов становится космонавтом и отправляется в космическое путешествие на релятивистской ракете (т. е. летящей со скоростью, близкой к световой). Пропутешествовав в космосе, например, десять лет по своим часам и вернувшись на Землю, космонавт-близнец найдет своего брата, оставшегося на Земле, старше, чем он. В «Популярной физике» Дж. Орира (Орир Дж. Популярная физика. М.: Мир, 1964) приводится даже точный расчет, насколько вы будете моложе.

Если один из близнецов в возрасте 20 лет отправится в космическое путешествие к звезде Арктур на корабле, летящем со скоростью 0,99 скорости света, то, преодолев два раза расстояние в 40 световых лет (до звезды и обратно), он вернется на Землю через 11,4 года по корабельному времени. На Земле же за это время пройдет 80,8 года. Так что брат, оставшийся на Земле, должен очень постараться, чтобы дожидаться возвращения межзвездного путешественника. Ведь ему к моменту возвращения корабля стукнет больше ста лет! Космический путешественник окажется моложе его на целую жизнь — 69,4 года! Самое трудное состоит, кажется, вот в чем. Ведь представляется, что для близнецов, вообще говоря, задача симметрична. Почему же они стареют с разной скоростью? Было выдвинуто большое число версий, как объясняющих такое неодновременное старение близнецов, так и возражающих против такого эффекта. Как результат бурных дискуссий, Эйнштейн в работе «Диалог по поводу возражений против теории относительности» признал, что в вопросе близнецов системы не являются эквивалентными. Сам факт придания скорости одной из систем отсчета уже делает их неэквивалентными по Эйнштейну, уничтожая посылки, а вместе с этим и все выводы специальной теории относительности. В том числе уничтожаются и все заключения о сокращении длин и времени. Ну а раз системы не эквивалентны, то и применять к ним выводы СТО нельзя. Но не всех такой вывод убеждает.

Резюмируя изложенное выше, можно утверждать, что постулаты Эйнштейна выполняются лишь в том случае, если свойства пространства и времени для каждого наблюдателя свои, т. е. если наблюдатели в разных системах видят разную длину и продолжительность одного и того же промежутка времени. Одинаковой

для всех остается только особая комбинация длины и промежутка времени, интервал, и это означает, что пространство и время неразрывно связаны друг с другом в единый континуум.

Иными словами, СТО продемонстрировала, что определить пространственные координаты тела или события независимо от временной координаты невозможно. Немецкий математик Герман Минковский (1864–1909) в 1907 году предложил геометрическое представление кинематики теории относительности, введя четырехмерное псевдоевклидово пространство (известное сейчас как пространство Минковского). Минковский провозгласил: отныне время само по себе и пространство само по себе становятся пустой фикцией, и только единение их сохраняет шанс на реальность. Построение Минковского отличается простотой и прозрачностью. Эйнштейн впоследствии отметит, что без четырехмерной математики Минковского теория относительности «могла надолго остаться в пленках». Таким образом, в 1908 году Г. Минковский вслед за А. Пуанкаре развил идею объединения трех измерений пространства и времени в одно четырехмерное и развил современный четырехмерный аппарат специальной теории относительности.

Математический аппарат такого представления был создан Германом Минковским в 1908 году, когда он жил в Геттингене. В Геттингене любили математические тонкости. Эйнштейн как-то пошутил: «Меня иногда удивляют геттингенцы своим стремлением не столько помочь ясному представлению какой-либо вещи, сколько показать нам, прочим физикам, насколько они превышают нас по блеску». Минковский показал, что принцип постоянства скорости света может быть выражен в чисто геометрической форме. Он ввел понятие события (пребывания частицы в данный момент в данной пространственной точке) и представил событие в виде точки с четырьмя координатами (три пространственные координаты — место события — и четвертая координата, обозначающая время события, измеренное особыми единицами). Такую точку Минковский назвал мировой точкой. Движение изображается последовательностью мировых точек — мировой линией, а совокупность всех возможных событий, т. е. все, что происходит или может произойти во Вселенной, соответствует всем четырехмерным, мировым точкам — четырехмерному пространству-времени, которые Минковский назвал миром. Минковский писал: «Теперь и навсегда пространство и время растворились до состояния легчайших теней, и только их союз сохранит хоть какую-то реальность».

Идея абсолютного пространства и времени И. Ньютона соответствовала определенной физической картине мира. Свойства подобного пространства, по Ньютону, определяются геометрией Евклида. Для Галилео Галилея и Исаака Ньютона пространство было бесконечно и евклидово (т. е. не кривое), а время текло равномерно и бесконечно. Все изменения в мире распространялись бесконечно быстро во всей Вселенной и у всех наблюдателей одно и то же время. Так явилась кинематика, в которой упрощенный взгляд на время стал главенствовать в механике. Теория относительности продемонстрировала невозможность определения пространственных координат тела или события независимо от временной координаты и наоборот.

Необходимо отметить, что с успехом теории относительности напрямую связано имя А. Пуанкаре (1854–1912). Пуанкаре также дал обобщенную формулировку принципа относительности, охватывающего и электродинамику. Тем не менее он продолжал признавать эфир, хотя придерживался мнения, что его нико-

гда не удастся обнаружить. В докладе на физическом конгрессе (1900) Пуанкаре впервые высказывает мысль, что одновременность событий не абсолютна, а представляет собой условное соглашение. Было высказано также предположение о предельности скорости света.

Релятивистская масса и релятивистский импульс. Чтобы завершить переход к теории относительности, нужно найти замену второму закону Ньютона. Мы должны перейти к релятивистской динамике, рассматривающей влияние сил на движение тел. Второй закон Ньютона в обычном виде не согласуется с теорией относительности. В самом деле, допустим, что тело движется под действием постоянной силы. Тогда его скорость меняется по закону равноускоренного движения, т. е. растёт линейно с течением времени. Поэтому спустя достаточное время может оказаться больше скорости света! В СТО длина, интервал времени относительно: их значения зависят от того, в какой системе отсчёта они измерены. В СТО масса тоже оказалась величиной относительной. Необходимо внести во второй закон Ньютона такие изменения, чтобы увеличение скорости тела под действием любой силы затруднялось по мере ее приближения к скорости света. Это удалось сделать, изменив надлежащим образом зависимость массы от скорости тела: $m = m_0\gamma$, где m_0 — масса покоя тела (т. е. масса, измеренная в системе отсчёта, относительно которой тело покоится), m — масса тела, измеренная в системе отсчёта, относительно которой тело движется со скоростью v , а $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ (так называемый фактор Лоренца).

СТО кладет предел для скорости объекта, и этот предел равен скорости света. При приближении к скорости света масса тела неограниченно возрастает (это прямо следует из уравнений СТО), что и кладет предел на максимальную скорость тела.

Импульс частицы в СТО определяется формулой $p = mv/\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Обнаружили ли правильность формул СТО на опыте?

СТО нашла свое подтверждение, например, в ускорителях заряженных частиц или в экспериментах, проделанных учеными Мичиганского университета. В одном из самых показательных опытов ученые поместили сверхточные атомные часы на борт авиалайнера, совершавшего регулярные трансатлантические рейсы, и после каждого его возвращения в аэропорт приписки сверяли их показания с контрольными часами. Выяснилось, что часы на самолете постепенно отставали от контрольных все больше и больше (если так можно выразиться, когда речь идет о долях секунды). Вот еще пример: радиоактивное атомное ядро, летящее с большой скоростью относительно неподвижных приборов, установленных в лаборатории, живет дольше другого такого же ядра, неподвижного в лабораторной системе отсчёта. Этот факт подтверждается ежедневно в сотнях экспериментов, проводимых во всем мире, хотя здравый смысл очень хочет предположить, что что-то случилось не с самим временем, а с часами, в данном случае с радиоактивным ядром. Чем ближе скорость объекта к скорости света, тем медленнее идут там часы относительно стороннего наблюдателя. Что означает замедление хода часов на быстро движущемся объекте? Это значит, что у нас прошел час, а на этом объекте, допустим, минута. Что произойдет, если какой-то объект превысит скорость света? Тогда возникнет парадокс времени. Ну, например, такой парадокс: объект уже здесь, а образ его еще где-то далеко. Но это уже

тема для писателей-фантастов. Здесь речь шла только о том, что подтверждается фактами, экспериментами, наблюдениями.

Теперь можно изменить и сами выражения для энергии и импульса тела: если частица с массой m движется со скоростью v , то ее импульс и энергия имеют следующую зависимость от скорости:

$$\mathbf{p} = mv/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}, \quad E = mc^2/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}.$$

Используя эти две формулы, найдем связь между полной энергией E частицы и ее импульсом p .

$$E = mc^2, \quad p = mv/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}.$$

Тогда $E^2 = m^2 c^4 = m^2 c^2 (c^2 + v^2 - v^2) = m^2 c^2 v^2 + m^2 c^2 (c^2 - v^2) = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 (1 - v^2/c^2)$, или $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$.

Как мы видели, с увеличением скорости тела происходит увеличение его массы. Следовательно, производимая над телом работа приводит к увеличению не только его скорости (как в обычной динамике), но и массы тела. Это заключение приводит нас к идее, что масса есть форма энергии, — замечательному выводу СТО!

Вначале это было просто следствием математических преобразований с физическими величинами, в основу которых были положены два приведенных выше постулата. Действительно, при скоростях много меньше скорости света приведенное выше выражение для энергии E в результате разложения в ряд по v^2/c^2 дает

$$E \approx mc^2 + mv^2/2 + \dots$$

При нулевой скорости энергия частицы называется энергией покоя: $E = mc^2$. Таким образом, энергия тела равна массе тела, умноженной на квадрат скорости света в вакууме.

Полученная формула может быть интерпретирована двояко.

I. С одной стороны, результат означает, что масса неподвижного тела (так называемая масса покоя) является мерой внутренней энергии этого тела.

II. С другой стороны, можно утверждать, что любому виду энергии соответствует некая масса.

Итак, если частица покоится, то ее полная энергия равна $E_0 = m_0 c^2$, это энергия покоя. Чтобы поверить в существование такой зависимости, надо убедиться на практике в возможности превращения массы в энергию и наоборот. Оказалось, что масса вещества может не сохраняться, частично превращаясь в энергию.

Эйнштейн высказал предположение о возможности таких превращений массы в различные формы энергии. Но в двадцатых годах прошлого столетия настоящее утверждение было всего-навсего одной из многочисленных гипотез и некоторое время рассматривалось как курьезное следствие. И только взрыв бомбы над Хиросимой показал, какое явление природы описывает такая простая формула.

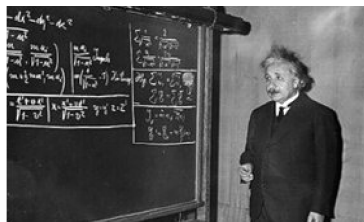


Рис. 32.14. А. Эйнштейн (1879–1955)

В общем-то, этому превращению мы обязаны своим существованием, так как приходящая на Землю энергия в виде светового излучения (фотонов) образуется внутри звезд в результате термоядерных реакций синтеза ядер водорода

в ядра гелия (см. с. 453). Энергия, вырабатываемая на атомных электростанциях, обусловлена уменьшением массы уранового топлива в процессе, известном под названием «деления ядер урана». Об этом мы говорили в части 32. В лабораторных условиях наблюдается и обратный процесс превращения электромагнитного излучения в материальные частицы-электроны.

Необходимо отметить, что специальная теория относительности, хотя она внешне и противоречит законам классической ньютоновской механики, на самом деле практически в точности воспроизводит все обычные уравнения законов Ньютона, если ее применить для описания тел, движущихся со скоростью значительно меньше, чем скорость света. То есть специальная теория относительности не отменяет ньютоновской физики, а расширяет и дополняет ее.

33. *«Вездесущее дыхание Господне». Путь Эйнштейна к созданию ОТО. Геометрическая теория тяготения. Черные дыры. Красное смещение. Нестационарная Вселенная. Большой взрыв. Обнаружение реликтового излучения. Рождение и гибель Вселенной. Почему небо темное? Парадоксы времени в ОТО. Эффект Мёссбауэра и ОТО. Гравитационные волны.*

После создания СТО Эйнштейн вскоре осознал, что одно из основных следствий специальной теории относительности (утверждение, что ничто не может превысить скорость света) оказалось несовместимым с ньютоновской теорией всемирного тяготения, сформулированной во второй половине XVII века. В теории тяготения Ньютона одно тело притягивает другое силой, которая зависит только от масс этих тел и расстояния между ними. Связав силу притяжения тела с его массой, Ньютон увидел в гравитации «невидимый клей», соединяющий мир в единое целое. Поэтому, подвинув какой-нибудь предмет на столе, мы вызвали возмущение (нарушение) в поле гравитации, которое, слабая по мере удаления, распространяется по Вселенной. Вездесущая гравитация сводит на нет шансы найти хоть что-нибудь, что было бы абсолютно изолировано. При этом сила гравитации никак не зависит от того, насколько долго тела находились рядом друг с другом. Это означает, что если их массы или расстояния между ними изменятся, то тела, согласно Ньютону, немедленно почувствуют изменение взаимного гравитационного притяжения. Например, если Солнце внезапно взорвется, то в соответствии с ньютоновской теорией тяготения Земля, расположенная на расстоянии примерно 150 млн км от него, мгновенно сойдет со своей обычной эллиптической орбиты. И это несмотря на то, что вспышка света от взрыва дойдет от Солнца до Земли только через восемь минут. Но в теории Ньютона сведения о том, что Солнце взорвалось, будут переданы на Землю мгновенно, посредством внезапного изменения силы тяготения, управляющей движением планеты.

Не странно ли? Еще как странно! Конечно, Ньютона тоже занимал вопрос о природе тяготения. Особенно часто возникал вопрос: почему сила тяготения действует бесконечно быстро? Никакого вразумительного объяснения Ньютон не дал, разве что назвал эту силу «вездесущим дыханием Господним». Но согласиться с таким объяснением трудно. Мгновенная передача силы тяготения между телами находится в прямом противоречии со специальной теорией относитель-

ности, поскольку последняя утверждает, что никакая информация не может быть передана со скоростью, превышающей скорость света. Мгновенное распространение тяготения совершенно нарушает этот принцип. Поэтому Эйнштейн, невзирая на огромное количество экспериментальных данных, подтверждающих теорию Ньютона, стал работать над новой теорией гравитации, которая была бы совместима со специальной теорией относительности. Это в конечном счете привело его к открытию общей теории относительности (ОТО), в которой характер пространства и времени претерпел поразительные изменения.

Посмотрим, каким путем Эйнштейн шел в своих рассуждениях. Эйнштейн высказал предположение, что в отсутствие материи и энергии пространство будет плоским. На языке двумерных моделей это означает, что форма пространства должна быть подобна поверхности гладкого стола. Это соответствует пространственной структуре нашей Вселенной, которая была общепринятой в течение тысяч лет, то есть евклидовой.

Евклидово пространство является ареной физических явлений классической физики, основы которой были заложены Галилеем и Ньютоном. Именно геометрия Евклида, классический геометрический метод древних, был основным орудием математических изысканий Ньютона. А классическая механика, лежащая в основе естествознания XVII–XIX вв., описывает мир как находящийся в абсолютном пространстве, устроенном по законам этой геометрии. «В истории западного мира, — пишет математик Д. Л. Стройк, — «Начала» после библии, вероятно, наибольшее число раз изданная и более всего изучавшаяся книга. После изобретения книгопечатания появилось более тысячи изданий, а до того эта книга, преимущественно в рукописном виде, была основной при изучении геометрии. Большая часть нашей школьной геометрии заимствована буквально из первых шести книг «Начал», и традиция Евклида до сих пор тяготеет над нашим элементарным обучением». Только в XIX веке было показано, что аксиомы Евклида не являются универсальными и верны не во всяких обстоятельствах. Основные открытия геометрических систем, в которых аксиомы Евклида не верны, были сделаны Н. И. Лобачевским и Георгом Риманом. О них говорят как о создателях неевклидовой геометрии.



Рис. 33.1. Титульный лист первого русского издания «Начал» Евклида

Принцип эквивалентности. ОТО — это физическая теория, в основе которой лежит ясный физический принцип, твердо установленный экспериментальный факт. Что это за факт?

В классической механике Ньютона существует два понятия массы: первое относится ко второму закону Ньютона, а второе — к закону всемирного тяготения. Первая масса — инертная (или инерционная) — есть отношение *негравитационной* силы, действующей на тело, к его ускорению. Вторая масса — гравитационная (или, как ее иногда называют, *тяжелая*) — определяет силу притяжения тела другими телами и его собственную силу притяжения. Вообще говоря, эти две массы измеряются в различных экспериментах, поэтому совершенно не обязаны быть пропорциональными друг другу. Их строгая пропорциональность

позволяет говорить о единой массе тела как в негравитационных, так и в гравитационных взаимодействиях.

Подходящим выбором единиц можно сделать эти массы равными друг другу. Такое равенство двух масс рассматривалось как некий принцип в механике, выдвинутый еще Исааком Ньютоном. Он же выполнил и первую косвенную проверку принципа, предположив, что гравитационное ускорение Луны не зависит от характеристик самой Луны, а только от гравитационного поля Земли в точке ее нахождения. В конце XIX века тонкие эксперименты по сравнению двух типов масс провел венгерский физик барон фон Этвеш (1848–1919). В этих экспериментах использовались все те же крутильные весы, которые он позаимствовал у Шарля Кулона и Кавендиша. В основе его опыта лежало то обстоятельство, что на тело, покоящееся вблизи поверхности Земли, действует (кроме реакции опоры) гравитационная сила $F_{\text{грав}}$, а также центробежная сила инерции $F_{\text{инерц}}$, направленная перпендикулярно к оси вращения Земли. В опытах Этвеш измерял момент закручивания нити для разных тел, находящихся на концах стержня. Он использовал тела из разных материалов (включая дерево) и сравнивал результаты измерений с платиновым шаром, принятым за эталон. Если соотношение гравитационной и инерционной масс у разных образцов различно, то возникнет крутящий момент (что было бы нарушением принципа эквивалентности). Этвеш

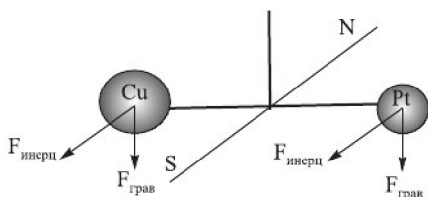


Рис. 33.2. Схема опыта Этвеша

не обнаружил такого вращения и заключил, что для всех обследованных веществ отношение инертной и гравитационной масс равно единице с точностью не хуже 10^{-8} . В более позднее время Этвеш в серии весьма точных опытов, проведенных с 1887 по 1910 гг. и продолженных в 1922 году, показал, что эта эквивалентность тяжелой и инертной масс соблюдается с еще большей точностью.

В течение XX века экспериментальная техника позволила подтвердить равенство масс с относительной точностью 10^{-12} – 10^{-13} (Брагинский, Дикке и т. д.). Для элементарных частиц равенство гравитационной и инертной масс экспериментально подтверждено только для нейтрона.

Таким образом, в равенстве тяжелой и инертной масс сомневаться невозможно. Иногда принцип равенства гравитационной и инертной масс называют слабым принципом эквивалентности.

Классическая механика в этом и не сомневалась, но она принимала этот факт как случайный, даже не пытаясь как-нибудь его объяснить. А Альберт Эйнштейн положил его в основу общей теории относительности. Независимость гравитационного ускорения от массы пробного тела связана с особым характером закона всемирного тяготения: в силу взаимодействия двух точечных масс входит ровно та же масса, которая входит во второй закон Ньютона.

С другой стороны, под словом «эквивалентность» понимается неотличимость инерционных явлений от гравитационных внутри достаточно маленькой лаборатории в течение достаточно малого времени (т. е. локально).

В работе 1907 года Эйнштейн показал с помощью наглядных соображений, что равенство тяжелой и инертной масс совсем не случайный факт, что оно носит

особый характер, проявляясь как внутреннее свойство гравитационного поля. Эйнштейн пришел к этому выводу с помощью мысленного опыта, ставшего теперь классическим — опыта со свободно падающим лифтом. Представим себе гигантский небоскреб высотой 1000 км и физика, находящегося внутри *свободно падающего* (т. е. с ускорением свободного падения) лифта в этом небоскребе. Физик выпускает из рук платок или часы и убеждается, что они не падают на пол лифта. Если он сообщает этим вещам толчок, то они движутся равномерно и прямолинейно, пока не столкнутся со стенками лифта. Физик приходит к выводу: я нахожусь в ограниченной галилеевой системе.

Из равенства инертной и гравитационной масс следует эквивалентность сил инерции и гравитации. Условие ограниченности необходимо для того, чтобы можно было считать, что все тела испытывают одинаковое ускорение.

Но физик, наблюдающий извне за падением лифта, будет судить о вещах совершенно иначе. Он видит, что лифт и все находящиеся в нем тела движутся ускоренно в соответствии с законом тяготения Ньютона. Сказанное иллюстрирует рис. 33.3. Действительно, рассмотрим по примеру Эйнштейна, два лифта: один — покоящийся у поверхности Земли, а другой — вдали

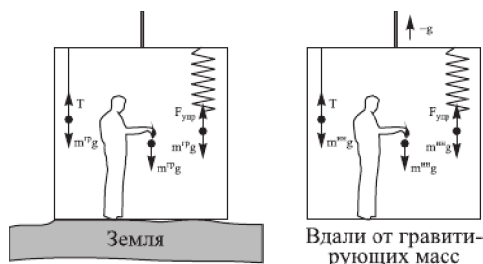


Рис. 33.3

от гравитирующих тел, который тянут за трос с ускорением $a = -g$. Тела в лифте подвергаются действию земного притяжения: $F_{гг} = m_{гг}g$, тела в ускоренно движущемся лифте — действию поступательной силы инерции: $F_{ин} = m_{ин}a$. Так как инертная и тяжелая масса неотличимы друг от друга и равны ускорения, то неотличимы и силы инерции и гравитации. Поэтому все физические процессы в обоих лифтах будут протекать одинаковым образом.

Этот пример показывает, что можно перейти от галилеевой системы к ускоренной, если учесть гравитационное поле. Иными словами, гравитационное поле (в котором проявляется тяжелая масса) эквивалентно ускоренному движению (в котором проявляется инертная масса). Таким образом, Эйнштейн пришел к принципу эквивалентности, который он так сформулировал в своей автобиографии: *«В поле тяготения (малой пространственной протяженности) все происходит так, как в пространстве без тяготения, если в нем вместо «инерциальной» системы отсчета ввести систему, ускоренную относительно нее»*. Таким образом, в свободно движущейся в гравитационном поле системе отсчета в малой области пространства-времени гравитации нет. Последнее утверждение — это одна из формулировок принципа эквивалентности.

Принцип эквивалентности можно сформулировать и иначе: наблюдатель никакими опытами в своей системе отсчета не может различить, находится ли он в гравитационном поле или же ускоренно движется.

Геометрическая теория тяготения. Далее Эйнштейн делает важные выводы, расширяет принципы СТО на произвольные (а не только инерциальные) системы отсчета. Если кинематическое изменение переопределяет или уничтожа-

ет гравитацию в какой-либо системе отсчета, то ясно, что между гравитацией и кинематикой существует тесная связь. А поскольку кинематика — это геометрия, к которой добавлена еще одна, четвертая, переменная — время, то Эйнштейн интерпретирует явления гравитации как геометрию пространства-времени. Отсюда вытекает, что согласно общей теории относительности наш мир не является евклидовым; его геометрические свойства определяются распределением масс и их скоростями. Примерно так можно охарактеризовать путь к ОТО.

Принцип эквивалентности послужил отправной точкой для переработки теории относительности в новую теорию, которую Эйнштейн назвал общей теорией относительности. Создание современной теории тяготения было немыслимо без специальной теории относительности, без глубокого понимания структуры классической электродинамики, без осознания единства пространства-времени.

Эйнштейн начал работать над ОТО с 1907 года. Его путь к ОТО продолжался около десяти лет. Это был путь проб и ошибок, который хотя бы отчасти можно проследить по публикациям Эйнштейна в эти годы. Окончательно задача была решена им в двух работах, доложенных на заседаниях Прусской академии наук в Берлине 18 и 25 ноября 1915 года. В них были сформулированы уравнения гравитационного поля в пустоте и при наличии источников. На последнем этапе создания ОТО принял участие Давид Гильберт (1862–1943), который одновременно и независимо сформулировал уравнения поля с источниками. И тут не обошлось без борьбы за первенство, связанного с выводом основного уравнения гравитационного поля в ОТО (см. далее). (Об этой истории см. в книге «На кого упало яблоко».)

В локальном масштабе опытов, проводимых в лабораториях (10–20 м) до нашей Солнечной системы, то есть примерно 100 миллионов километров, пространство может быть описано евклидовой геометрией. Это самое простое представление плоской поверхности без кривизны. В этом пространстве Евклида сумма углов треугольника на плоскости равна 180° и две параллельных линии никогда не пересекаются. Свет распространяется здесь по прямой линии, а потому изображение звезды не может ни удваиваться, ни быть скрытым. В этом масштабе Вселенная напоминает простую конструкцию. Евклидово пространство обладает двумя примечательными свойствами: оно изотропно и однородно, т. е. свойства пространства не зависят от направления наблюдения и местоположения точки отсчета, которую можно отождествить, например, с началом координат. Именно допущение того, что пространство изотропно и однородно, выражает факт, что физические наблюдения дают один и тот же результат независимо от того, в какой точке пространства мы проводим эксперимент. В рамках привычной геометрии Ньютон и Лейбниц разработали математический аппарат (дифференциальное и интегральное исчисление), с помощью которого можно описать движение Луны, планет и множество других явлений физики и астрономии.

Но вот в случае пространства масштаба Вселенной евклидовой геометрией уже воспользоваться не удастся. В отличие от электромагнитного поля, где существуют незаряженные, нейтральные тела, которые электромагнитного поля вообще не чувствуют, в гравитационном поле нейтральных тел нет, не существу-

ет ни линеек, ни часов, которые не чувствовали бы гравитационного поля. Любой эталон прямой, например луч света, не обладает в поле тяготения свойствами прямой линии. Нет объектов, которые в этом поле можно было бы отождествить с прямыми, как в евклидовой геометрии. Поэтому геометрию нашего пространства естественно считать неевклидовой. Проявляется так называемая кривизна пространства.

Влияние массивных тел на геометрию пространства.

А как повлияет на геометрию пространства наличие в нем тел большой массы? Что произойдет с пространством, если в нем присутствует массивный объект, подобный Солнцу? Не сразу, после долгих рассуждений Эйнштейн пришел к блестящей догадке: присутствие массивного тела, подобного нашему Солнцу, приводит к тому, что структура пространства вокруг этого тела искривляется, как показано на рис. 33.4. Полезная и часто используемая аналогия состоит в том, что структура пространства деформируется в присутствии массивных тел, таких как наше Солнце, подобно резиновой пленке, на которую положили шар для боулинга.

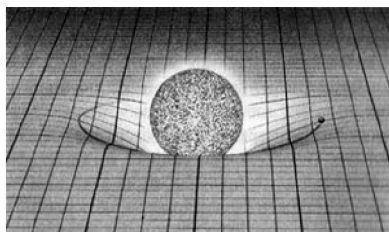


Рис. 33.4. Земля остается на орбите вокруг Солнца потому, что катится по ложбине в искривленной структуре пространства

Солнце, подобно шару для боулинга, искривляет структуру окружающего его пространства, а движение Земли, как и движение шарика, определяется этой кривизной.

Чем ближе к Солнцу, тем больше кривизна. Иными словами, структура пространства-времени в окрестности больших материальных тел становится неевклидовой. В этом неевклидовом пространстве тела продолжают выбирать при своем движении наиболее прямые пути, но эти пути уже не прямые линии.

То, что гравитация искривляет пространство, можно понять из мысленного эксперимента с упомянутым выше свободно падающим лифтом. Человек в таком лифте будет испытывать чуть разное тяготение в левой и правой руках, потому что направленные к одному и тому же центру гравитации стрелки тяготения будут направлены под углом друг к другу. На большом расстоянии от центра гравитации эти стрелки практически параллельны, но чем ближе к центру, тем больше наклонены и в конце концов сходятся в центре. Стало быть, гравитация оказывает такой же эффект, как шарообразность (сферичность) Земли на ее меридианы: они тоже параллельны на экваторе и сходятся на полюсах. Отсюда следует, что ускоренное движение под воздействием гравитации можно трактовать просто как движение в сферическом искривленном пространстве.

Общая теория относительности дает новый способ рассмотрения и описания тяготения, оставаясь при этом малопонятной для непосвященных.

Таким образом, в отличие от Ньютона Эйнштейн указал механизм, с помощью которого действует гравитация. Этим механизмом является кривизна пространства. С позиций Эйнштейна, гравитационная привязь, удерживающая Землю на орбите, не связана с каким-то мистическим мгновенным воздействием,

оказываемым Солнцем; на самом деле это кривизна структуры. Согласно Эйнштейну гравитация вовсе не является силой! Солнце не притягивает планеты. Земля не притягивает вниз падающее яблоко. Просто большое материальное тело, например такое, как Солнце, приводит к искривлению пространства-времени в окружающей его области и тем самым определяет характер движения тел.

В 1912 году Эйнштейну, когда он решил обобщить частную теорию относительности и ввести в нее гравитацию, пришлось поменять и математический инструмент. К счастью, такой инструмент в математике уже существовал. Это был тензорный анализ, или абсолютное дифференциальное исчисление, развитое Григорио Риччи (1853–1925) и Туллио Леви-Чивитой (1873–1941). Друг Эйнштейна, математик Гроссман, познакомил его с этой техникой. Кроме этого, при разработке общей теории относительности Эйнштейн решил использовать четырехмерную риманову геометрию, где в качестве четвертого пространственного измерения Эйнштейн выбрал время.



Рис. 33.5

Георг Фридрих Бернхард Риман родился 17 сентября 1826 года в семье бедного пастора. Был вторым из шести его детей. Школу смог начать посещать лишь в 14 лет. Мать Римана, Шарлотта Эбелль, умерла от туберкулеза, когда он еще учился в школе; от этой же болезни умерли две его сестры. Наклонности к математике проявлялись у молодого Римана еще в детстве, но, уступая желанию отца, Риман поступил в 1846 году в Геттингенский университет для изучения филологии и богословия. Однако здесь он слушает лекции Гаусса и принимает окончательное решение стать математиком. В 1847 году он переходит в Берлинский университет, слушает лекции Дирихле, Якоби и Штейнера.

За свою короткую жизнь (всего 10 лет трудов) он преобразовал сразу несколько разделов математики. В 1866 году Риман в Италии скончался от туберкулеза в возрасте неполных 40 лет. Посмертный сборник трудов Римана, подготовленный Дедекиндом, содержал всего один том. Могила Римана в Италии была заброшена и позже уничтожена при перепланировке кладбища, но надгробная плита уцелела и в наши дни установлена у стены кладбища. Альберт Эйнштейн писал: «Риман первый распространил цепь рассуждений Гаусса на континуумы произвольного числа измерений, он пророчески предвидел физическое значение этого обобщения евклидовой геометрии».

Геометрия Римана, которой воспользовался А. Эйнштейн, так далека от наших привычных представлений, основанных на аксиомах Евклида, что объяснить ее доходчиво невозможно. Причина понятна: плоскость — плоская, и фигуры наши тоже плоские, а шар — изогнутый, поверхность его имеет кривизну. Кривизна есть количественная характеристика, описывающая отклонение того или иного геометрического объекта от соответствующего плоского объекта. Радиус кривизны — это величина, обратная кривизне. Например, чем больше радиус кривизны кривой, тем она больше похожа на прямую. Евклидова поверхность имеет нулевую кривизну и бесконечную площадь.

Если кривые и поверхности имеют сложную форму, то кривизна их может меняться от точки к точке. Поэтому, чтобы описывать такие кривые, надо или иметь величину радиуса кривизны в каждой точке, или знать закон, по которому эта величина меняется.

Риман предлагает общий универсальный принцип для определения метрики пространства: метрические отношения следует искать и фиксировать в бесконечно малой области пространства. Иными словами, пространство надо мерить бесконечно малыми шагами. Если перейти к проблеме геометрии Вселенной, то надо учесть, что она весьма сложная. В ней само трехмерное пространство изгибается во всех направлениях с постоянной кривизной. Эйнштейну пришлось освоить новый даже для математиков тензорный анализ. Докладывая в ноябре 1915 года в Прусской академии наук, он обнаруживал в своих лекциях ошибки и лишь в последней, четвертой, лекции сумел написать на доске точные тензорные уравнения своей теории.

Тензор — объект линейной алгебры. Часто тензор представляют как многомерную таблицу, заполненную числами — компонентами тензора. Длина элемента линии в римановом пространстве n измерений определяется выражением $ds^2 = g_{11}dx_{12} + g_{22}dx_{22} + \dots + 2g_{12}dx_1dx_2 + 2g_{13}dx_1dx_3 + \dots$ (g_{ik} — компоненты тензора). В случае если все $g_{ik} = 0$, пространство будет плоским, или n -мерным евклидовым пространством. В других случаях пространство будет искривленным и кривизна его определяется коэффициентами g_{ik} .

Поскольку метрический тензор содержит всю необходимую информацию для определения внутренней кривизны пространства-времени, то в общей теории относительности тяготение выступает как проявление кривизны пространства-времени. В ОТО геометрические свойства пространства-времени зависят от характера распределения в нем материи, что учитывается g_{ik} . Вот такая цепочка, связывающая геометрию пространства с распределением в ней материи.

Уравнение гравитации Эйнштейна внешне имеет простой вид:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G/C^4 T_{\mu\nu}.$$

Кроме обычных постоянных вроде π , скорости света c и гравитационной постоянной G присутствует буква T — тензор энергии-импульса. Именно он описывает массу и энергию вещества в данной точке пространства такую, чтобы создавать гравитацию и гнуть ею пространство, дабы соответствовать левой части уравнения. Слева стоят два слагаемых. Первое — это тензор Эйнштейна (величина, описывающая кривизну пространства). Таким образом, это уравнение дает связь между массой тел в пространстве и кривизной этого самого пространства, о чем говорилось выше. В левой части уравнения находится еще один член — так называемый лямбда-член, или космологическая постоянная. Именно он вызывает самые большие споры ученых. Причина, по которой Эйнштейн ввел космологическую постоянную в уравнение, следующая.

Пытаясь использовать новую теорию для описания Вселенной, Эйнштейн хотел получить конечное стационарное решение. Его Вселенная искривлялась подобно поверхности шара. В масштабе Солнечной системы космологический член не поддавался физическому обнаружению, но в более крупных масштабах он должен был создавать космическое «расталкивание», препятствующее гравитационному притяжению удаленных тел. Когда Эйнштейн добавил космологический член, он поместил его в левой части уравнения, считая его свойством самого пространства. Но если переставить этот член в правую часть, он получит совершенно иное значение — то самое, которое ему приписывают сегодня. Теперь он представляет загадочную новую форму плотности энергии, которая остается постоянной даже при расширении Вселенной, а итоговая гравитация оказывается силой отталкивания, а не притяжения.

Однако интерес Эйнштейна к космологическому члену быстро погас. В 1922 году советский физик Александр Фридман построил модели расширяющейся и сжимающейся вселенных, обойдясь без космологической постоянной (см. ниже). В настоящее время существует множество решений уравнения Эйнштейна как в предположении наличия лямбда-члена, так и при его отсутствии.

Не стоит обольщаться простотой приведенной выше формулы. В более развернутом варианте там 10 независимых формул, а в полном — две страницы математических символов мелким шрифтом. Но физики, занимающиеся ОТО, давно во всем этом разобрались.

Что подтверждает ОТО. Была ли подтверждена экспериментальными данными общая теория относительности? Да, хотя и не так полно, как специальная теория относительности. Одно подтверждение было получено при изучении орбиты Меркурия, ближайшей к Солнцу планеты. Орбита Меркурия представляет собой эллипс, но сам эллипс медленно поворачивается.

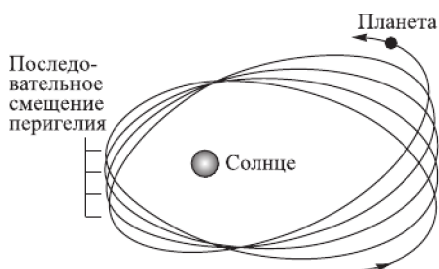


Рис. 33.6. Смещение перигелия планеты — это изменение положения ее эллиптической орбиты относительно Солнца. С давних пор известно расхождение между предсказаниями ньютоновской теории и результатами наблюдений за перигелием Меркурия. То, что это отклонение удалось объяснить воздействием на планету сильного гравитационного поля Солнца, явилось одним из важнейших свидетельств в пользу ОТО (Encyclopaedia.bigau.ru)

С помощью уравнений тяготения Ньютона можно объяснить этот поворот, если учесть влияние других планет, но предсказываемое при этом вращение получается немного более медленным, чем наблюдаемое в действительности. Уравнения Эйнштейна предсказывают вращение эллиптической орбиты планеты даже в отсутствие других планет; в случае Меркурия предсказанная орбита значительно ближе к действительной, чем орбита, предсказанная Ньютоном.

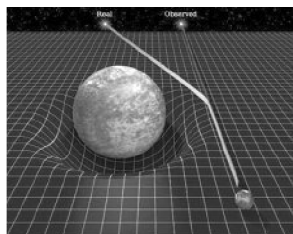


Рис. 33.7. Как отклонение луча объясняется в ОТО

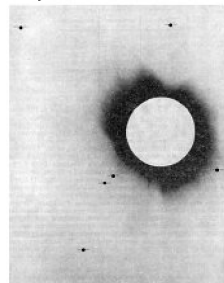


Рис. 33.8

Самая известная ранняя проверка ОТО стала возможна благодаря полному солнечному затмению 1919 года. 29 мая 1919 года Артур Эддингтон наблюдал полное солнечное затмение на Принсипи, небольшом острове у западного побережья Африки в Гвинейском заливе; еще одна команда, которую возглавил Эндрю Кроммелин (1865–1939), отправилась в Собраль, на север Бразилии. Он воспользовался этим затмением и обнаружил, что свет от звезды искривлялся вблизи Солнца (см. рис. 33.7) в точном соответствии с предсказаниями ОТО. (Правда, надо отметить, что имеются претензии к самому проведению этих наблюдений. Об этом имеется довольно обширная литература.) Сравнение результатов наблюдений с расчетными, приведенными ниже в таблице, позволяет оценить эффективность ОТО.

Негатив, полученный с помощью четырехдюймового телескопа в Собраль приведен на рис. 33.8 (черными точками отмечено положение звезд при полном солнечном затмении 1919 года).

В таблице приведены результаты радиальных смещений отдельных звезд.

Звезды	Вычисления	Наблюдения
11	0",32	0",20
10	0",33	0",32
6	0",40	0",56
5	0",53	0",54
4	0",75	0",84
2	0",85	0",97
3	0",88	1",02

Известие о благоприятном исходе для ОТО Эйнштейн узнал в начале сентября. В конце этого месяца он отправил открытку в Швейцарию, в которой писал: «Дорогая мама! Сегодня я получил радостное известие. Х. А. Лоренц телеграфировал мне, что английские экспедиции действительно доказали отклонение света вблизи Солнца...»

Что творилось в ученом мире Великобритании в ноябре 1919 года, лучше всего передать словами известного американского физика-теоретика и историка науки Абрахама Пайса: «После 1905 года, совершив два первоклассных чуда, Эйнштейн стал «блаженным». Состоявшееся 6 ноября 1919 года совместное заседание Королевского общества и Королевского астрономического общества напоминало обряд конгрегации. В качестве постулятора выступал Дайсон, которому помогали адвокаты-прокуроры Кроммелин и Эддингтон. Выступавший первым Дайсон в заключение сказал: «После тщательного изучения фотопластинок я готов заявить, что расчеты Эйнштейна подтверждены. Получен совершенно определенный результат, в соответствии с которым свет отклоняется согласно закону тяготения Эйнштейна». Имя Эйнштейна стало известно широкой общественности.



Рис. 33.9. Жители Нью-Йорка радостно приветствуют Эйнштейна, май 1921 г. (Олег Акимов
«Критика теории относительно-

В 1936 году Альберт Эйнштейн предсказал явление гравитационного линзирования, которое появляется, когда на прямой линии находятся три галактики: галактика-источник, галактика-линза и наша галактика. Свет от источника, проходя вблизи галактики-линзы, испытывает влияние ее гравитационного поля, поэтому лучи света двигаются по искривленному пространству и формируется круг, который получил название «кольцо Эйнштейна». В результате гравитационного линзирования астрономы могут увидеть искаженное и усиленное изображение источника. Если между галактикой-источником и нашей галактикой имеются две галактики-линзы, то появляется двойное кольцо Эйнштейна.

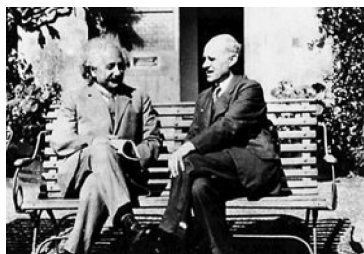


Рис. 33.10. Альберт Эйнштейн и Артур Эддингтон (Sloan Lens Survey — SLACS) (см. Gavazzi R. et al. The Sloan Lens ACS Survey. VI: Discovery and analysis of a double Einstein ring // astro-ph, 10 Jan 2008; arXiv:0801.1555)

В 2007 году команда ученых из Университета Калифорнии во главе с Рафаэлем Гаваззи и Томом Треу обнаружила такое кольцо Эйнштейна.

Геометрия двойного кольца Эйнштейна позволила ученым впервые измерить массу средней карликовой галактики.

Итак, подведем итог. Искривленное пространство не действует никакими силами. Просто в нем кратчайшее расстояние между двумя точками может отличаться от прямой линии. Луч света, пролетая мимо массивного тела (как при наблюдениях Эддингтона):

- 1) не испытывает действия никаких сил и летит равномерно и прямолинейно;
- 2) но расстояние между ним и массой меняется из-за наличия искривляющей пространство-время массы, что приводит к тому, что путь света как бы отклоняется от прямой линии (см. рис. 33.7).

И стало ясно, почему тела падают в гравитационном поле с одинаковым ускорением, независимо от массы. А вот почему: никакого падения нет, просто пространство искривлено, а двигаясь в нем равномерно и прямолинейно, при одинаковых начальных условиях тела полетят одинаково. Никакой зависимости от массы равномерное прямолинейное движение не имеет. А вот что пространство искривлено и понять это очень сложно — так что делать? Никто не обещал, что в природе все явления можно объяснить «на пальцах».

Удивительные следствия из ОТО. Довольно быстро на основе предложенной Эйнштейном модели гравитации были проведены расчеты этого самого искривления пространства. Произошло это в период Первой мировой войны. Немецкий астроном Карл Шварцшильд, находясь в 1916 году в составе германской армии на русском фронте, куда он попал добровольцем, в перерывах между расчетом траекторий артиллерийских снарядов знакомился с работами Эйнштейна в области гравитации. Шварцшильд сумел, используя эту теорию, получить полную и точную картину того, как искривляются пространство и время в окрестности идеально сферической звезды. Шварцшильд послал полученные им результаты с фронта Эйнштейну, который по его поручению представил их Прусской академии.



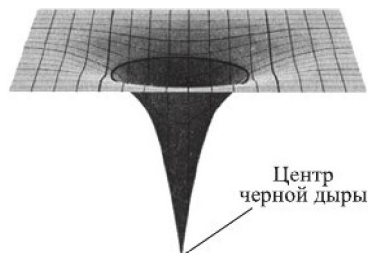
Карл Шварцшильд (1873–1916) уже к шестнадцати годам опубликовал две статьи о расчетах орбит двойных звезд, в двадцать восемь лет стал профессором в Геттингене, а через восемь лет был назначен на престижный астрономический пост — директором Потсдамской обсерватории. Тем не менее он пошел добровольцем на фронт (хотя ему уже был сорок один год и он имел право оставаться в тылу).

Решение Шварцшильда касалось так называемых черных дыр. Правда, описанное Шварцшильдом явление черной дырой стало называться гораздо позже. Этот термин ввел американский ученый Джон Уилер только в 1969 году.

Черные дыры имеют много весьма экстравагантных свойств, которыми не обладают другие звезды, даже очень экзотические, вроде нейтронных. Хотя черные дыры известны своей «прозорливостью», тела, которые проходят мимо них на безопасном расстоянии, отклоняются точно так же, как они отклонились бы под действием обычной звезды, и следуют дальше своей дорогой. Но тела любой

природы, подошедшие слишком близко, ближе, чем на расстояние, равное горизонту событий черной дыры, приговорены — они будут неуклонно падать к центру черной дыры, подвергаясь действию все более интенсивных и становящихся в конце концов разрушительными гравитационных деформаций. Эта односторонняя дверь из нашей Вселенной. «Вы сможете выйти, но больше никогда не войдете обратно», — говорит исследователь Шеп Доулемен из MIT Haystack Observatory. Горизонт событий — это граница, чтобы вернуться обратно, потребуется больше вечности. Сама по себе эта граница никаких особенных свойств не имеет. Просто этой ситуации соответствует некоторое критическое состояние, которое и рассчитал Шварцшильд. В честь него появился термин «радиус Шварцшильда», или «гравитационный радиус».

Рис. 33.11. Черная дыра искривляет структуру окружающего пространства-времени настолько сильно, что любой объект, пересекающий ее «горизонт событий» (своеобразный рубез, с которого любое тело (газ, звезда, свет и т. п.), будет двигаться только внутрь черной дыры. После прохождения горизонта событий материя начинает падать внутрь черной дыры и, однажды попав туда, уже не может вернуться обратно, не может ускользнуть из ее гравитационной ловушки



Вот что интересно. Еще в XVIII веке английский клирик Джон Мичелл (в 1783 г.) и Лаплас независимо заметили, что могут существовать звезды, обладающие совершенно необычным свойством: свет не может покинуть их поверхность. В труде «Изложение системы мира» (1796 г.) Лаплас писал: «Светящееся небесное тело, обладающее плотностью, равной плотности Земли, и диаметром, в двести пятьдесят раз превосходящим диаметр Солнца, из-за силы своего притяжения не даст своему свету достигнуть нас. Таким образом, возможно, что самые большие светящиеся тела во Вселенной именно по причине своей величины остаются невидимыми».

Рассуждение выглядело примерно так. Тело, обладающее радиальной скоростью u , может покинуть поверхность звезды радиуса R и массы M при условии, что кинетическая энергия этого тела $mu^2/2$ превышает энергию притяжения GMm/R , то есть при $u^2 > 2GM/R$. Отсюда легко получается радиус тела r_g заданной массы M , при котором скорость убегания равна скорости света: $r_g = 2GM/c^2$. Это значит, что звезда, сжатая в сферу радиусом $r_g < 2GM/c^2$, перестанет излучать — свет покинуть ее не сможет. Несложно рассчитать, что Солнце (его масса $2 \cdot 10^{33}$ г) превратится в черную дыру, если сожмется до радиуса примерно 3 километра. Радиус Земли, сжатой до состояния черной дыры, уменьшился бы примерно до одного сантиметра. Понятно, что во времена Лапласа казалось невероятным, что в природе могут найтись силы, способные сжать звезду до столь ничтожных размеров. Да и сам Лаплас не очень верил в такую возможность и изъясил из третьего издания своей книги соответствующий раздел.

Поэтому выводы из работ Мичелла и Лапласа более ста лет считались чем-то вроде математического парадокса, не имеющего физического смысла.

Необходимо заметить, что применение приведенного выше неравенства к свету, как мы теперь понимаем, совершенно не обоснованное, хотя и приводит к правильному выводу: если радиус звезды массы M меньше некоторого критического, то свет не может покинуть ее поверхность, такая звезда не светит! Последовательное применение ОТО приводит к такому же выводу, причем поразительно, что правильный критерий количественно совпадает с наивным, необоснованным.



Рис. 33.12. Так выглядела бы Земля, превратившись в черную дыру. Ее диаметр составил бы 1,8 сантиметра (wsyachina.narod.ru/.../recent_astronomy.html)

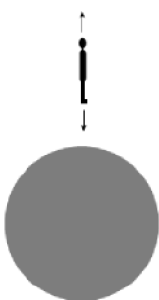


Рис. 33.13. Из книги Леонарда Сасскинда «Битва при черной дыре»

Например, для Солнца радиус Шварцшильда составляет 3 км, то есть чтобы превратить наше Солнце в черную дыру, нужно уплотнить всю его массу до размера небольшого городка! Если бы Землю сжали до такого состояния, что она превратилась бы в черную дыру, то она имела бы размер небольшого шарика. И всё, включая гору Эверест, огромное железное ядро Земли и всё прочее, что известно человечеству, втискивается в сферу, которая без труда умещается в вашей ладони! Сколь бы удивительным это ни казалось, но такой странный объект действительно может существовать. Многочисленные результаты астрономических наблюдений дают серьезные основания полагать, что черные дыры — это не просто игра ума физиков-теоретиков, а реальные объекты, существующие по крайней мере в ядрах галактик. Поэтому и рассуждают о различных эффектах, связанных с черной дырой.

Занятно выглядит падение пробного тела на черную дыру. Если, например, вы подплываете к центру черной дыры ногами вперед, то при пересечении горизонта событий вы будете ощущать растущее чувство дискомфорта. Гравитационное притяжение черной дыры возрастет столь значительно, что оно будет притягивать (ваши ноги гораздо сильнее, чем голова (ведь ноги будут несколько ближе к центру черной дыры, чем голова) настолько сильно, что сможет быстро вас разорвать. Безрадостная перспектива, что и говорить! (Хокинг С. Мир в ореховой скорлупке. СПб.: Амфора, 2007). Если же представить себе, что человек очень маленький и очень прочный и что приливные силы ему нипочем, то тогда горизонт событий он не почувствует.

В некоторый момент собственного времени тело пересечет горизонт событий. И хотя с точки зрения наблюдателя, падающего вместе с телом, этот момент ничем не выделен, однако возврата теперь нет.

Рассмотрим теперь процесс падения тела в черную дыру с точки зрения удаленного наблюдателя. Пусть, например, тело будет светящимся и, кроме того, будет посылать сигналы назад с определенной частотой. Вначале удаленный наблюдатель будет видеть, что тело, находясь в процессе свободного падения, постепенно разгоняется под действием сил тяжести по направлению к центру. Цвет тела не изменяется, частота детектируемых сигналов практически постоянна. Однако, когда тело начнет приближаться к горизонту событий, фотоны, идущие от тела, будут испытывать все большее и большее гравитационное красное смещение. Кроме того, из-за гравитационного поля и все физические процессы с точки зрения удаленного наблюдателя будут идти все медленнее и медленнее. Будет казаться, что тело — в чрезвычайно сплюсненном виде — будет замедляться, приближаясь к горизонту событий и в конце концов практически остановится. Частота сигнала будет резко падать. Длина волны испускаемого телом света будет стремительно расти, так что свет быстро превратится в радиоволны и далее в низкочастотные электромагнитные колебания, зафиксировать которые уже бу-

дет невозможно. Пересечения телом горизонта событий наблюдатель не увидит никогда, и в этом смысле падение в черную дыру будет длиться бесконечно долго. Вот такой удивительный факт: в черных дырах время может... остановиться. Луч света, посланный вслед этому телу, его либо вообще никогда не догонит, либо догонит уже за горизонтом. Аналогично будет выглядеть для удаленного наблюдателя и процесс гравитационного коллапса.

Гравитационный коллапс — это гидродинамическое сжатие астрофизического объекта под действием собственных сил тяготения, приводящее к значительному уменьшению его размеров. Для развития гравитационного коллапса необходимо, чтобы силы давления внутри объекта были недостаточны для противодействия силам гравитации. Для того чтобы гравитационное поле стало заметным, необходимо сжать тело до колоссальных плотностей. Так, например, для того, чтобы произошел гравитационный коллапс Земли, ее плотность должна возрасти до 10^{27} г/см³, т. е. в триллионы раз превысит ядерную плотность. Однако с ростом массы внутреннее поле гравитационного притяжения также растет и достаточное для коллапса значение плотности уменьшается. Гравитационный коллапс массивных звезд с массами, превышающими 5–10 масс Солнца, переходит в релятивистский гравитационный коллапс, и образуется черная дыра.

Вначале вещество ринется к центру, но вблизи горизонта событий оно станет резко замедляться, его излучение уйдет в радиодиапазон, и в результате удаленный наблюдатель увидит, что звезда погасла. Свет оказывается у черной дыры в плену! Вот так совместное действие Доплер-эффекта⁷ и замедления времени в сильном поле тяготения ведет к тому, что с приближением поверхности звезды к сфере Шварцшильда далекий наблюдатель видит свет все более покрасневшим и все меньшей интенсивности — звезда становится невидимой. Ее яркость стремится к нулю, и ни в какие телескопы ее нельзя уже обнаружить. При этом потухание происходит для далекого наблюдателя практически мгновенно. Так, звезда с массой Солнца после того, как она сожмется до размеров удвоенного гравитационного радиуса, потухнет для внешнего наблюдателя за сотысячную долю секунды. Черная дыра — это своеобразная воронка, откуда нет выхода и где происходят удивительные физические процессы. Черные дыры никак не укладываются в рамки обычных понятий. Это совершенно необычные объекты, о которых американский

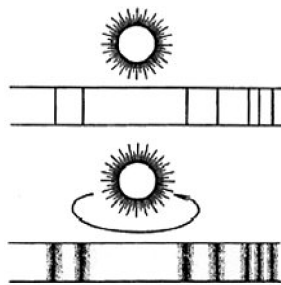


Рис. 33.14. Иллюстрация уширения спектральных линий, вызванная вращением звезды (рис. из статьи на сайте www.astronos.ru/3-3.html)

⁷ Эффект Доплера — изменение частоты и длины излучения, регистрируемых приемником, вызванное движением их источника и/или движением приемника (см. рис. 16.32, где этот эффект рассмотрен для звуковых волн). Эффект Доплера используется в спектроскопии, где по смещению спектральных линий можно определить скорость источника волн. В обоих случаях доплеровского эффекта параметр смещения z определяется как $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, где λ и λ_0 — значения длины волны в точках наблюдения и испускания излучения соответственно. Смещение линий в красную сторону (обусловленное удалением объекта) и называется красным смещением.

Эффект Доплера нашел многочисленные применения в астрономии для измерений скоростей движения звезд вдоль луча зрения (приближения или удаления от наблюдателя) и их вращения вокруг оси.

физик К. Торн сказал так: «Из всех измышлений человеческого ума, от единорогов и химер до водородной бомбы, наверное, самое фантастическое — это образ черной дыры, отделенной от остального пространства определенной границей, которую ничто не может пересечь; дыры, обладающей настолько сильным гравитационным полем, что даже свет задерживается его мертвой хваткой; дыры, искривляющей пространство и тормозящей время. Подобно единорогам и химерам, черная дыра кажется более уместной в фантастических романах или в мифах древности, чем в реальной Вселенной. Еще в самом начале появления теории черных дыр большинство физиков было уверено, что такие объекты во Вселенной невозможно обнаружить. Так, Эддингтон говорил: «Должен существовать какой-то закон природы, который не давал бы звезде вести себя подобным абсурдным образом». И тем не менее законы современной физики фактически требуют, чтобы черные дыры существовали. Возможно, только наша Галактика содержит миллионы их».

И все же остается вопрос: а есть ли эти черные дыры в реальности? Для С. Хокинга это не вопрос. Следуя примеру Больцмана (формула Л. Больцмана для энтропии выгравирована на надгробии ученого), а может, и без всякой связи с ним, Хокинг завещал, чтобы на его надгробии была выгравирована формула энтропии черной дыры. И тем не менее вопрос законный. Как распознать эту невидимку? Черные дыры могут сигнализировать о своем существовании. Несмотря на то, что черная дыра удерживает всякое излучение внутри себя, ученые-астрономы способны их обнаружить благодаря ярким вспышкам, которые возникают в окрестностях дыры, в то время, когда она «пожирает» галактические газы или звезду, которая неосторожно к ней приблизилась. Также возможно фиксировать приборами вспышку гамма-лучей, взрыв, который выделяет огромное количество энергии, происходящий во время взрыва звезды, после чего она превращается в черную дыру. Так что косвенным образом черную дыру можно обнару-



Рис. 33.15. Если звезда подойдет слишком близко к черной дыре, она будет «растянута» приливными гравитационными силами, а затем буквально разорвана. Большая часть вещества звезды сможет «убежать», образуя вокруг дыры вращающийся диск. Рентгеновское излучение испускается веществом диска за счет разогревания газа при падении в черную дыру (antwpr.gsfc.nasa.gov)

жить. И не только саму дыру. Несмотря на то что горизонт событий в черной дыре является воображаемой линией, которую невозможно наблюдать, ученые смогли приблизительно определить ее местонахождение и вычислить самую близкую стабильную орбиту, где вещество пересекает рубеж (горизонт событий) и навсегда пропадает внутри черной дыры. Для своего исследования ученые выбрали предполагаемую сверхмассивную черную дыру, которая находится в центре галактики М87. Масса этой черной дыры составляет 6 солнечных масс. Используя новый телескоп Event Horizon Telescope, ученые смогли определить, что горизонт событий этой черной дыры находится на расстоянии, равном около 750 расстояниям от Земли до Солнца. А расстояние от Земли до Солнца, напомним, составляет 150 миллионов километров.

Но если вспомнить, что мы говорили о парадоксе близнецов, то надо признать, что и черные дыры есть результат решений уравнений, а как их реально «пощупать», никто не скажет. До гипотетической черной

дыры вряд ли можно будет долететь. Остается сослаться на обычное в таких случаях предположение, что сила науки безгранична и невозможное когда-нибудь станет возможным.

Происхождение и модели вселенной. В 1925–1930 гг. Эдвин Хаббл и Милтон Хамсон при исследовании галактик (спиралевидных туманностей Млечного пути) установили, что свет, испускаемый ими, смещен в красную область спектра тем больше, чем дальше они от нас. Это послужило основанием (с учетом эффекта Доплера) для заключения о разбегании галактик со скоростями, пропорциональными их расстояниям до наблюдателя.



Рис. 33.16. Эдвин Пауэлл Хаббл (1889–1953)

В основополагающей статье Хаббла скорость разбегания галактик описывалась формулой $v = Hr$, где v — скорость галактики, r — расстояние до нее, а H — коэффициент пропорциональности, сегодня называемый постоянной Хаббла. Такому выводу предшествовала беседа Хаббла с астрономом де Ситтером (1872–1934), которая состоялась во время его поездки в 1928 году в Голландию. В этой беседе Хаббл ознакомился с утверждением собеседника, что общая теория относительности Эйнштейна предсказывает расширяющуюся Вселенную с очень простым соотношением между расстоянием и красным смещением (Митио Каку, «Космос Эйнштейна». АНФ, 2016).

Не все приняли закон Хаббла. Уж очень не хотелось расставаться с привычной и понятной схемой стационарной (неизменной во времени) Вселенной. Такое поведение довольно обычно в научном мире, да и не только в нем. Человеку трудно расставаться с привычными представлениями, и он всеми путями старается сохранить их, изыскивая всевозможные объяснения. И тем не менее такое удаление, или, как говорят, разбегание, галактик возможно. Ведь в бесконечной Вселенной любую точку можно считать центром, так как по обе стороны от нее число звезд бесконечно. Все наблюдатели (и мы с вами не исключение) считают себя находящимися в центре Вселенной. Лучшее всего это сформулировал мыслитель XV века Николай Кузанский: «Любая точка есть центр безграничной Вселенной». И распределены звезды там в общем равномерно (ведь их число бесконечно велико). Поэтому, по закону Ньютона, все эти звезды должны падать к центру в выделенной области. Сколько бы звезд мы ни добавили, они всегда будут стремиться к центру. Отсюда теперь понятно, что такая статическая (неподвижная) модель Вселенной невоз-

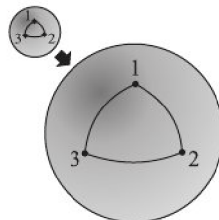


Рис. 33.17. Вселенная на воздушном шарике. Далекие галактики убегают от нас, как если бы весь космос находился на поверхности гигантского воздушного шарика

можно, если действуют постоянно силы гравитационного притяжения. Такие вроде бы простые рассуждения не приходили никому в голову вплоть до начала XX века. После эпохального открытия Хаббла стало ясно, что Вселенная расширяется. Оказалось, что в какой бы части неба ни велись наблюдения, все далекие галактики быстро удаляются от нас. Правда, то, что мы наблюдаем (картина кажущаяся, это не галактики движутся), — это само пространство распухает. Удачный пример, иллюстрирующий расширение Вселенной, предложил в 1931 году уже упоминавшийся английский астроном Артур Эддингтон (1882–1944). Он уподобил Вселенную поверхности надуваемого резинового шарика, а все галактики — точкам на его поверхности. Возникающая при расширении шарика картина ясно показывает, почему дальние галактики удаляются быстрее, чем ближние. Например, если радиус шара увеличивается вдвое каждый час, то и расстояние между двумя галактиками на шаре будет каждый час удваиваться. Если в какое-то время «галактики», скажем, были в дюйме друг от друга, то через час они окажутся в двух дюймах друг от друга. То есть они будут выглядеть удаляющимися одна от другой со скоростью дюйм в час. Но если начальное расстояние между ними было вдвое больше, то час спустя между ними будет расстояние вдвое больше — уже четыре дюйма, то есть скорость их взаимного удаления будет равна двум дюймам в час (Хокинг С., Млодинов Л. Высший замысел. СПб.: Амфора, 2012). Важно отметить, что расширение пространства не влияет на размер материальных объектов, таких как галактики, звезды, яблоки, атомы и другие тела, удерживаемые вместе той или иной силой.



А. Фридман
Рис. 33.18.
А. Фридман

Одновременно подтверждаются выводы российского математика А. А. Фридмана (1888–1925) о нестационарности окружающего мира. Фридман в 1922–1924 гг. применяет уравнения Эйнштейна (без так называемой космологической постоянной лямбда, о которой говорилось выше) ко всей Вселенной и получает нестационарные (то есть зависящие от времени) решения.

Два года спустя после публикации работ А. Фридмана, в 1927 году, бельгийский профессор астрофизики, римско-католический священник Жорж Леметр (1894–1966) выдвинул идею, очень похожую на ту, что предлагал А. Фридман. Если продолжить историю мира назад, в прошлое, то Вселенная будет становиться все меньше и меньше, пока не наступит событие, приводящее к ее творению, то, что сегодня мы называем Большим взрывом (так окрестил теорию Леметра космолог Фред Хол в ходе дискуссии на радио BBC в 1949 г.). Ну, а Леметр, понятно, интерпретировал сей факт в соответствии со своими воззрениями. И на это указывает закон Хаббла, который помогает оценить возраст Вселенной.

Для решения вопроса о возрасте требуется знание не только значения постоянной Хаббла, но также космической плотности вещества в современную эпоху. Постоянная Хаббла (H) — коэффициент, входящий в закон Хаббла, имеет размерность, обратную времени. Определить постоянную Хаббла с высокой точностью очень непросто. Галактики часто имеют довольно высокие скорости (до тысяч км/с), не связанные с космологическим расширением. По современным данным, значение H лежит в интервале 60–80 км/(с·Мпк). Определить из наблюдений истинную плотность материи еще слож-

нее. Плотность наблюдаемого вещества во Вселенной меньше критической, поэтому Вселенная должна неограниченно расширяться. Критическая плотность в соответствии с моделью Эйнштейна–Фридмана, зависит от H . При значении постоянной Хаббла в современную эпоху $H = 70,4 \pm 2,5$ (км/с)/Мпк (или $2,282 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$), наилучшим образом описывающем доступные на 2012 год наблюдательные данные, критическая плотность ρ_c равна $9,31 \cdot 10^{-27} \text{ кг/м}^3$ (менее десяти атомов водорода на кубический метр).

Иными словами, у Вселенной было начало во времени. И вообще говоря, к такому заключению нетрудно подойти. Достаточно взять и мысленно прокрутить назад условную кинокартину наблюдаемого нами расширения Вселенной, и мы дойдем до точки, когда все вещество мироздания было сжато в плотный комок некоей первичной материи, заключенный в совсем небольшом в сопоставлении с нынешними масштабами Вселенной объеме.

Величина этого времени превышает 13 миллиардов лет. Этот возраст является характерным временем расширения Вселенной. Этот вывод следует из уравнений Фридмана–Леметра: Вселенная расширяется экспоненциально.

В настоящее время имеющиеся методы не позволяют заглянуть дальше $z = 9$ (для доплеровского эффекта параметр смещения z определяется как $(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, где λ и λ_0 — значения длины волны в точках наблюдения и испускания излучения соответственно): более древние световые волны растягиваются так, что свет из видимого становится невидимым, инфракрасным, для которого нет пока мощных телескопов. На рис. 33.20 любознательный пилигрим добрался до «края света» и пытается увидеть: а что же там, за краем? За прошедшие столетия взгляд на Вселенную кардинально изменился. А вопрос остался.

Чем дальше в прошлое, тем больше плотность этой среды. До каких же пор продолжается, если смотреть в прошлое, это возрастание плотности? Согласно теории Фридмана плотность мира возрастает в прошлое неограниченно и в определенный момент становится сколь угодно большой, или, выражаясь математически, бесконечной. Иными словами, если проэкстраполировать закон Хаббла назад во времени, то в итоге возникнет точка! Этот момент берется в теории Фридмана за начало отсчета — за нуль времени. Эту точку называют гравитационной или космологической сингулярностью. Точка — что это означает? Точка — это вообще большая проблема в физике. В точке не только пасует здравый смысл, но и весь аналитический аппарат физики становится бесполезным. Действительно, ну что можно посчитать в точке? Что тут можно поделаться? Физик Георгий Гамов (1904–1968)

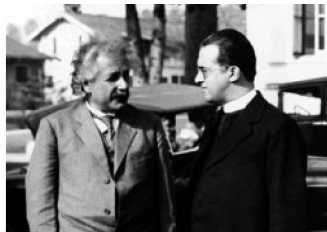


Рис. 33.19. Во время встречи с бельгийским священником и математиком Жоржем Леметром Альберт Эйнштейн заявил: «Ваши вычисления верны, но ваше понимание физики отвратительно!»



Рис. 33.20. Библейская картина строения небес. Изображена по рассказу средневекового монаха, который будто бы нашел «край Земли» (такое место, где «небо сходится с Землей»), просунул голову в трещину «небесной тверди» и таким образом увидел, как движутся небесные светила (по «Астрономии» Фламариона)

предложил выход: экстраполировать назад данные можно лишь до того момента, пока работают законы физики (известные на то время). Предполагается, что этот момент по величине равен планковскому времени. Планковское время — это единица времени в планковской системе единиц, величина, имеющая размерность времени и, как и другие планковские единицы, составлена из произведения фундаментальных констант (постоянная Планка \hbar , G — гравитационная постоянная, скорость света в вакууме в соответствующих степенях). Физический смысл этой величины — время, за которое частица, двигаясь со скоростью света, преодолеет планковскую длину. Планковская длина, составленная из тех же констант, равна примерно $1,6 \cdot 10^{-35}$ м. В масштабе менее 10^{-35} метров пространство-время имеет совсем другую природу, нежели на больших расстояниях. На таких крошечных расстояниях наши традиционные понятия пространства и времени уже не применимы из-за квантово-механических флуктуаций. На данном уровне для описания пространства и времени физика должна одновременно включать как квантовую теорию, так и общую теорию относительности.

Планковское время — порядка 10^{-43} с. Можно сказать, что это наименьший миг времени, который требуется для протекания любого мыслимого физического события. И вот что интересно: некоторые современные теории утверждают, что на уровне планковских времен время уже... квантуется, то есть имеет дискретный характер. Это никак не укладывается в обыденное сознание, ведь мы в жизни привыкли, что время представляется нам чем-то непрерывно текущим. Умножив планковское время на скорость света, получим для размера Вселенной, близкого к моменту рождения, чудовищно малую величину (то есть порядка планковской длины). Ну просто точку. И сразу возникает естественный вопрос: насколько все описываемое здесь могло происходить реально? Ответ пришел с неожиданной стороны. В 1946–1949 гг. Г. Гамов (1904–1968), пытаясь объяснить происхождение химических элементов, применяет законы ядерной физики к началу расширения Вселенной. В результате десятилетней работы, по выражению Гамова — по «скрещиванию космологии с ядерной физикой», им впервые в мире была обоснована ныне общепризнанная теория горячей Вселенной, именуемая на Западе теорией Big Bang (теория большого взрыва). А вместе с этой теорией — и гипотеза об изотропном реликтовом (то есть возникшем еще в период начала формирования Вселенной, от лат. *Relictum* — остаток) излучении с температурой в несколько градусов Кельвина. Обнаружение такого излучения, «эха творения», имело бы важное значение для утверждения идеи Гамова о Большом взрыве. По поручению Гамова два члена его группы, Роберт Херман и Ральф Альфер, вычислили еще в 1948 году остаточную температуру этого излучения — примерно 5 К. И такое излучение было открыто. История открытия этого излучения такова. Вначале результаты Гамова широко не обсуждались. Однако они были вновь получены Робертом Дикке (1916–1997) и Яковом Зельдовичем (1914–1987) в начале 60-х годов. И это в 1964 году подтолкнуло двух коллег Дикке к созданию так называемого радиометра Дикке для измерения реликтового излучения. В 1965 году Арно Пензиас и Роберт Вудроу Вильсон также построили прибор, аналогичный радиометру Дикке, который они намеревались использовать не для поиска реликтового излучения, а для экспериментов в области радиоастрономии и спутниковых коммуникаций. При калибровке установки выяснилось, что антенна имеет избыточную шумовую температуру T около 3,5 °К (абсолютная температура T

является мерой средней кинетической энергии молекул, см. с. 135), которую они не могли объяснить. (Согласно легенде они подумали, что видят помехи от птичьего помета, который покрывал в ту пору антенну их радиотелескопа.)

Вот примерно как они рассказывали об этом в декабре 1978 года перед вручением им Нобелевской премии по физике:

... — Что вы делали?

— Мы измеряли шум, который исходит из-за пределов Млечного пути.

— Что за шум?

— Шум — это нагревание. Чем больше нагревание, тем интенсивнее шум. Мы получали много шума, что значит и много нагревания. Намного больше, чем мы должны были получать от Млечного пути. В этом и заключалась наша работа. День ото дня.

— Насколько больше?

— Нагревание, которое мы получали, должно было быть на 2 градуса ниже, но оно было выше, выше на 3 градуса. Выше, чем оно могло бы исходить от Млечного пути. Выше, чем оно могло исходить даже от далеких галактик. И мы подумали, что это исходит от чего-то, что находится ближе к нам...

— У вас была хоть какая-нибудь идея о том, что это могло быть? Или вы думали, что знали это?

— Этот шум — звук начала времени. Остаточное нагревание от Большого взрыва. Те 3 градуса, которые до сих пор не остыли. Он везде. Везде и вокруг нас. Ему 13,7 миллиардов лет. И мы обнаружили его. Вот наше открытие.

— Это должно быть возвращение к самому началу. (Оригинал взят из universal inf в 1.1 «Большой взрыв. Рождение и развитие Вселенной».)



Рис. 33.21

Получив звонок из Холмдейла (там, в штате Нью-Джерси, располагается знаменитая лаборатория Белла), Дикке остроумно заметил: «Парни, наш куш сорвали!» После совместного обсуждения группы исследователей из Принстона и Холмдейла заключили, что такая температура антенны была вызвана реликтовым излучением. В 1978 году Пензиас и Вильсон за свое открытие получили Нобелевскую премию.

Реликтовое излучение появилось тогда, когда после Большого взрыва в связи с расширением плотность упала, и Вселенная стала прозрачной для излучения. В этот момент излучение оторвалось от вещества, и мы наблюдаем его сейчас в виде реликтового фона. Гипотеза Гамова подтвердилась. Теория горячей Вселенной получает подтверждение, а в космологию приходит физика элементарных частиц.

Недавно NASA опубликовало результаты исследования фонового СВЧ-излучения, которое несет в себе информацию о начальном периоде существования Вселенной, являясь своеобразным отголоском Большого взрыва. Данные были получены космическим аппаратом WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), который находится в точке, где гравитационные поля Земли и Солнца уравновешивают друг друга (в так называемой второй точке Лагранжа). Полу-

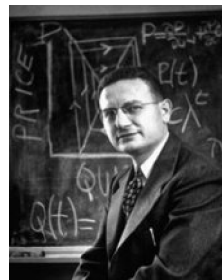


Рис. 33.22. Георгий Гамов

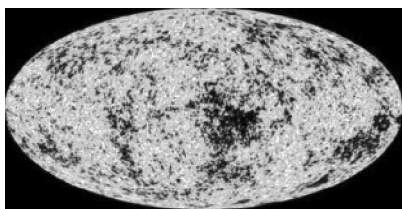


Рис. 33.23. Карта фонового космического излучения

ченная WMAP карта фонового космического излучения (рис. 33.23) является самой подробной за все время наблюдения Вселенной.

Картина мира, воссозданная с помощью космического аппарата, соответствует состоянию Вселенной всего через 380 тысяч лет после Большого взрыва. Температура СВЧ-фона Вселенной составляет от 2,7251 К до 2,7249 К, однако даже столь небольшая разница способна многое рассказать о «мла-

денчестве» Вселенной. На иллюстрации красный цвет соответствует более горячим, а синий — более холодным областям Вселенной. Собранные WMAP данные позволили уточнить возраст Вселенной: он составляет 13,7 млрд лет с погрешностью около 1 %. Звезды во Вселенной появились через 200 млн лет после Большого взрыва, то есть намного раньше, чем предполагалось до этого. К этому времени Вселенная достаточно охладилась, чтобы в ней образовались сгустки водородных атомов, из которых затем образовались первые галактики и звезды. Не менее важно и то, что WMAP получил доказательства в пользу теории быстрого расширения Вселенной. Согласно полученным данным в момент своего образования Вселенная всего на 4 % состояла из обычной материи, в основном из атомов водорода. Еще 23 % вещества приходилось на темную материю неизвестной природы, а основу Вселенной — 73 % — составляла тоже загадочная темная энергия, которая противодействует гравитации и заставляет Вселенную постоянно расширяться, причем ускоренно. Недавно, в 2013 году, ученым удалось впервые заглянуть уж в совсем «раннее детство» Вселенной, когда ей было всего от 100 до 300 лет отроду! Изучению подверглось все то же реликтовое излучение, но существенно очищенное от шумов и других помех. Данные получены с помощью чувствительной аппаратуры орбитальной обсерватории Planck и все того же космического аппарата NASA — WMAP. «Мы действительно отодвинули границу и заглянули глубже в историю Вселенной в области физики высоких энергий, к которым не могли получить доступа ранее», — цитирует журнал *Physical Review Letters* физика-теоретика Эрика Линдера. Согласно теории Большого взрыва мы ничего не можем сказать про Вселенную в начальный момент времени, хотя предполагается, что в ней присутствуют все фундаментальные взаимодействия (напомню, их известно четыре: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое; последние два — сильные и слабые ядерные силы — не знакомы большинству людей, потому что они действуют только внутри мельчайших невидимых атомных частиц, удерживая их вместе), а также все виды материи и энергии. А до Большого взрыва не было ни пространства, ни времени, ровным счетом ничего. Именно Большой взрыв стал источником всего — и пространства и времени. Воистину в момент Большого взрыва произошло рождение мира. Что происходило в это время? Если мы хотим понять природу ранней Вселенной, когда вся материя и энергия были сжаты в малом объеме, то для этого потребуются квантовая версия общей теории относительности. Вот так, и не меньше!

Однако можно быть уверенным, что в тот момент происходило нечто совсем особенное. Тогда пространство-время начинает расширяться из одной точки. Спустя одно планковское время после этого события согласно современной тео-

ретической физике гравитационные силы отделяются от остальных сил. Расчет даст, что время, прошедшее с момента Большого взрыва ($4,3 \cdot 10^{17}$ с), примерно равняется $8 \cdot 10^{60}$ планковским временам. То, что мы видим, что окружает нас: наша планета, небо, звезды над нами и сама Вселенная — всего этого около 14 миллиардов лет назад не существовало.

Надо сказать, что теория Большого взрыва всего лишь гипотеза, хотя и подкрепленная фактами. И помимо других остается еще вопрос: что произойдет при равномерной (или почти равномерной) скорости расширения, когда будут исчерпаны все запасы энергии?

Этот этап развития соответствует так называемой тепловой смерти Вселенной.

А если скорость будет все нарастать, то, начиная с определенного момента, сила, расширяющая Вселенную, сначала превысит гравитационные силы, удерживающие галактики в скоплениях. За ними распадутся галактики и звездные скопления. И наконец, последними распадутся наиболее тесно связанные звездные системы. Спустя некоторое время электромагнитные силы не смогут удерживать от распада планеты и более мелкие объекты. Мир вновь будет существовать в виде отдельных атомов. На следующем этапе распадутся и отдельные атомы. Что последует за этим, точно сказать невозможно: на этом этапе перестает работать современная физика. Получается довольно безрадостная картина!

Но гарантирую — до такого «страшного суда» мы все не доживем. Тем более что существует и более оптимистический сценарий. Если расширение Вселенной замедляется, то в будущем оно прекратится и начнется сжатие. Сегодня возраст Вселенной с момента Большого взрыва превышает 13 миллиардов лет, и, в связи с ее расширением, предполагается, что через 500 миллиардов земных лет размеры Вселенной достигнут максимального значения (120 млрд световых лет), после чего она начнет сжиматься. Какие причины заставят Вселенную остановить свое расширение? Одно из предположений заключается в том, что у Вселенной имеется некоторая критическая масса, ей соответствует минимальная плотность материи, которая требуется Вселенной, чтобы остановить расширение. Расширение космоса, начавшееся в результате взрыва при его творении, тормозится притяжением массивных объектов, его составляющих. Все как объяснил Ньютон: массивные тела стремятся притягивать друг друга. Чем больше масса Вселенной, тем больше эффект торможения. После сжатия начнется новый цикл расширения.



Рис. 33.24. Изображен сектор общей панорамы, который поясняет, как развивалась наша Вселенная (Метагалактика) от Большого взрыва до ее современного состояния



Рис. 33.25. Два сценария развития Вселенной. Изменение расстояний в расширяющемся мире: 1 — неограниченное расширение, 2 — расширение, сменяющееся сжатием

Второй случай — это так называемая пульсирующая модель Вселенной.

В космологии вопрос о конечности или бесконечности Вселенной имеет большое значение: если Вселенная конечна, то, как показал Фридман, она не может находиться в стационарном состоянии и должна либо расширяться, либо сжиматься. В пульсирующей модели в некоторый момент плотность вещества Вселенной достигает бесконечно большого значения. Так достигается новая сингулярность. Полное время жизни Вселенной в этом случае ограничено. Оно заключено в пределах между двумя сингулярностями, начальной и конечной.

Большинство специалистов склоняется к тому мнению, что даже с учетом скрытых масс⁸ космическая плотность еще не достаточна, чтобы остановить разбегание галактик. Но, конечно, окончательное решение зависит от более точных измерений.

Если же Вселенная бесконечна, то всякие предположения о ее сжатии или расширении теряют какой бы то ни было смысл. В бесконечной Вселенной время, очевидно, длится неограниченно и не имеет конца. Для случая бесконечной Вселенной снимаются многие теоретические трудности.

В *бесконечной* Вселенной, размеры которой не могут быть выражены никаким, сколь угодно большим числом, равномерно заполненной веществом при ненулевой его плотности, величина сил тяготения, действующих в любой точке Вселенной, равна нулю — это и есть истинный гравитационный парадокс бесконечной Вселенной. Таким образом, все возражения, или парадоксы, направленные, как считают, против возможности существования бесконечной во времени и пространстве Вселенной, по существу, направлены против возможности существования именно конечной Вселенной. В действительности Вселенная бесконечна и в пространстве, и во времени; бесконечна в том смысле, что ни размеры Вселенной, ни количество заключенного в ней вещества, ни время ее жизни не могут быть выражены никакими, сколь угодно большими, числами — бесконечность — она и есть бесконечность. Бесконечная Вселенная никогда не возникала ни как результат внезапного и необъяснимого расширения и дальнейшего развития некоторого «доматериального» объекта, ни как результат Божественного творения. Но представить себе такое невозможно! Ну как представить, что Вселенная всегда была, что не имеет ни начала, ни конца?.. Уж легче в парадокс близнецов поверить. В заключение книги «Мир как пространство и время» А. А. Фридман поместил такие знаменательные строки: «Наши потомки, без сомнения, узнают характер Вселенной, в которой мы обречены жить... И все же думается, что

«Измерить океан глубокий,
Сочечь пески, лучи планет,
Хотя и мог бы ум высокий —
Тебе числа и меры нет!»

(Г. Р. Державин, «Бог»)

⁸ Скрытая масса (также темная материя, темное вещество) — общее название совокупности астрономических объектов, недоступных прямым наблюдениям современными средствами астрономии (то есть не испускающих электромагнитного или нейтронного излучения достаточной для наблюдений интенсивности и не поглощающих их), но наблюдаемых косвенно по гравитационным эффектам, оказываемым на видимые объекты. Ученые считают, что количество темной материи как минимум в 5 раз больше количества видимой.

Наш ограниченный опыт не дает возможности представлять себе бесконечности. Поэтому невозможно человеку принять факт, что Вселенная ниоткуда не взялась, существовала всегда и всегда будет существовать. Тут здравый смысл бессилён. Сама мысль о бесконечности нестерпима для человека. Она заводит в умственный тупик. Против бесконечности Вселенной выдвигалось множество возражений. Мы не можем не рассказать об одном из них. В 1744 году дотошный швейцарский астроном Жан Филипп де Шезо высказывает первое сомнение в правильности ньютоновской концепции о бесконечности Вселенной. Только сомнение, не более. Прошло всего лишь семнадцать лет после смерти великого физика, и слава его ослепляла. И все-таки... «Если количество звезд во Вселенной бесконечно, — размышляет де Шезо, — то почему все небо не сверкает как поверхность единой звезды? Почему небо темное? Почему звезды разделены черными промежутками?» Скромный астроном, а поднял серьезнейшую проблему. Он пытается найти объяснения и выдвигает довольно интересное объяснение, основанное на астрономических наблюдениях: «Скорее всего, это пылевые облака заслоняют от нас свет дальних звезд. Земным наблюдателям доступны лишь лучи самых близких светил...» Ответа он не нашел, и на целых восемьдесят два года его возражения тонут, неспособные противостоять авторитету великого Ньютона. В дальнейшем предположение де Шезо оформилось как парадокс Ольберса.

Генрих Вильгельм Матеус Ольберс (1758–1840) был врачом в городе Бремене. У доктора Ольберса была частная обсерватория, в которой он производил самые различные наблюдения над небесными светилами. Славу ему принесли открытия двух малых планет, Паллады и Весты, и объемистый труд, посвященный способу вычисления кометных орбит. Однажды Ольберс задумался: примем, что Вселенная безгранична и неизменна во времени и число звезд, равномерно распределенных в однородном пространстве, подчиняющемся геометрии Эвклида, бесконечно, а все звезды в среднем имеют одинаковую светимость. Потому яркие светила можно считать расположенными ближе, то выходит, что Земля получала от любого слоя Вселенной одно и то же количество света. А так как количество слоев бесконечно, то все небо без всякого промежутка должно сиять как поверхность единого Солнца. Как по де Шезо.



Рис. 33.26. Генрих Ольберс

Оформим математически эти рассуждения. Рассмотрим, сколько света поступает от звезд. Разделим Вселенную на отдельные слои. Количество звезд N в слое: $N \sim 4\pi R^2$. Но светимость $Q \sim 1/R^2$. Рассмотрим два слоя на расстоянии R_1 и R_2 от Земли. В первом слое N_1 и общая светимость $Q_1 \sim N_1/R_1^2$. Светимость второго слоя $Q_2 \sim N_2/R_2^2$. Ясно, что $Q_1 = Q_2$.

Поскольку слоев бесконечно много, то и света должно быть бесконечно много. Ночью должно быть светло как днем — вот о чем говорит парадокс Ольберса.

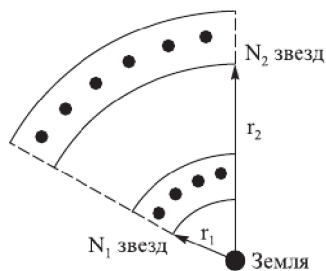


Рис. 33.27

Фотометрический парадокс Ольберса (так в дальнейшем он стал именоваться) сыграл едва ли не решающую роль в том, что почти целое столетие идея бесконечной Вселенной не могла оправиться от удара. Но пришел А. Эйнштейн... В соответствии со сказанным выше свет от далеких галактик по мере их удаления становится всё более и более длинноволновым. Когда излучение галактик перейдет в инфракрасную область, мы их перестанем видеть. На еще большем расстоянии излучения далеких галактик доходят до Земли уже в виде радиоволн, длины которых всё больше и больше увеличиваются. Скорость разбегающихся галактик, как уже сказано, возрастает с увеличением расстояния до них. Что же будет, когда их скорость достигнет скорости света — предельно возможной скорости движения в пространстве? Галактики станут для нас невидимыми, их излучение уже никогда не сможет дойти до Земли (то есть именно конечность скорости света и ставит предел видимости «края» Вселенной). Расстояние, на котором это происходит, и определяет собою доступную наблюдениям границу Вселенной. Но, возможно, одного разбегания галактик недостаточно для объяснения рассматриваемого парадокса. Может быть, более важным является ограничение возраста Вселенной: за время, прошедшее с начала расширения нашего мира (около 14 млрд лет), до нас дошел свет лишь от ограниченного числа галактик (порядка 10 млрд). Далекие звезды, которые мы можем наблюдать, расположены от нас на расстоянии не более 15 млрд световых лет. Звезд бесконечно много, и они располагаются на любом, сколь угодно большом, расстоянии от нас. На расстояниях более 15 млрд световых лет звезды в нашей Вселенной просто еще не успели образоваться, оставляя, таким образом, в ней достаточно пустого пространства, а этого слишком мало, чтобы сделать ночное небо светлым. И небо, как ему и положено ночью, остается темным.

Кажется, нет теории, которая могла бы описать Вселенную во всех ее проявлениях. Предполагается, что существует совокупность теорий, объединяемые в так называемые М-теоремы. Каждая из них пригодна для описания явлений в определенных границах. Но здесь мы остановимся, а заинтересованный читатель может обратиться к литературе, где описаны разнообразные модели настоящего и будущего Вселенной (Хокинг С., Млодинов Л. Высший замысел. М.: Амфора, 2012).

Парадоксы времени в ОТО. А что со временем, которое, как мы видим, неотделимо от пространства? Пространство и время оказываются в неразрывной связи с эволюцией Вселенной. Были события, шли разнообразные процессы — значит было время. А вот что было до Большого взрыва, обычно физиками не обсуждается, поскольку общепринятой теории, способной на них ответить, как уже говорилось, пока нет. А раз физика не имеет ответа, то открывается простор для других сценариев, относящихся к сфере философии и религии. Популяризация теории относительности вселила в сердца физиков надежду на возможность путешествий и «туда», и «обратно» во времени. Физик и астроном Кип Стивен Торн (род. 1940) из Калифорнийского технологического института пишет: «Когда-то путешествия во времени были исключительной прерогативой писателей-фантастов. Теперь в серьезных научных журналах можно обнаружить ученый анализ путешествий во времени, принадлежащий перу выдающихся физиков-теоретиков... Причина всей этой суесуды и путаницы в том, что уравнения Эйнштейна

допускают существование множества разных типов машины времени. (Правда, пока неясно, устоят ли они перед проверкой при помощи квантовой теории.)». В теории Эйнштейна мы часто встречаем нечто под названием «замкнутая времяподобная кривая»; это технический термин для путей, которые позволяют путешествия в прошлое. Если следовать вдоль замкнутой времяподобной кривой, то можно вернуться из путешествия раньше, чем мы в него отправились. Уравнения Эйнштейна имеют немало решений, соединяющих две удаленные точки пространства. Но поскольку время и пространство в теории Эйнштейна тесно переплетены, то может существовать некая нора (названная впоследствии кротовой — достаточно вольный перевод английского слова *wormhole* — «червоточина»), которая может соединять эти две точки во времени. Общая теория относительности допускает возможность существования таких кротовых нор. Действительно, если пространство кривое (а в ОТО материя искривляет, «прогибает» пространство), то почему бы ему не принять, к примеру, форму трубы, накоротко соединяющей области, разделенные сотнями тысяч световых лет.

Это нечто вроде туннелей (возможно, очень коротких), соединяющих удаленные области в пространстве. Вход в туннель может быть размером со звезду, с планету, с дом, с пылинку. Разрабатывая теорию кротовых нор, физики К. Торн и М. Морис заметили, что если перемещать один конец (А) короткой норы с большой скоростью, а потом приблизить его к другому концу (Б), то в силу парадокса близнецов объект, попавший в момент времени T во вход А, может выйти из Б в момент, предшествующий T . Упав в кротовую нору, можно переместиться (по крайней мере математически) в прошлое.

Вроде бы после этого можно вновь переместиться в первоначальную точку и встретить там самого себя перед стартом.

Но кротовая нора в центре черной дыры — это дорога в один конец. «Не думаю, что вопрос в том, может ли человек, находясь в черной дыре, попасть в прошлое, — говорит физик Ричард Готт. — Вопрос в том, сможет ли он выбраться оттуда, чтобы похвастаться». Но самая многообещающая схема машины времени — так называемые обратимые кротовые норы. Это дыры в пространстве-времени, где человек может свободно перемещаться вперед и назад во времени. Теоретически обратимые кротовые норы — это возможность не только путешествовать быстрее света, но и перемещаться во времени. Стивен Хокинг полагает, что если кротовые норы существуют, то они могли бы решить проблему предельной скорости в космосе. Согласно теории относительности, чтобы пересечь Галактику, требуются десятки тысяч лет, но через кротовую нору можно слетать на другой край Галактики и вернуться обратно за время ужина (Хокинг С. Мир в ореховой скорлупке. СПб.: Амфора, 2007).

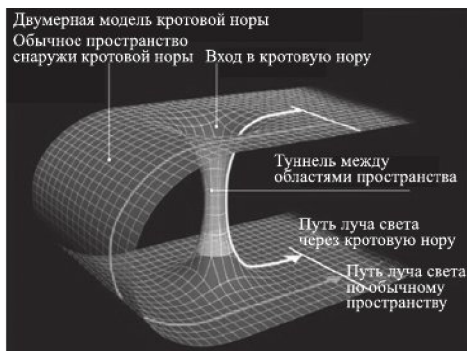


Рис. 33.28. Стандартная кротовая нора схематически может быть представлена как соединительный туннель между двумя точками трехмерного пространства (Википедия)

Все сказанное выше есть следствие решений уравнений ОТО. Как мы видим, они дают такие решения, которые не может принять самое богатое воображение. А потому и воспринимаются как фантастика. Поэтому завершим такую волнующую тему путешествия во времени коротким стихотворением С. Я. Маршака, который удивительно точно понял описанную ситуацию:

Сегодня в полдень пущена ракета.
Она летит быстрее света
И в цель прибудет ровно в семь утра...
ВЧЕРА.

Но проблемой путешествия во времени физики не перестают заниматься, так что рассказанное лишь какая-то веха на долгой дороге познания времени.

Все, что рассказано выше, находится за пределами здравого смысла. Так что создается впечатление, что СТО, ОТО являются лишь плодами умов физиков, и не более того. Чтобы развеять это ощущение, поговорим о том, что дали эти теории практике, как реализуются результаты этих теорий.

В начале нашего века, когда Эйнштейном была создана специальная и общая теории относительности, никто не был готов к их восприятию, включая крупных ученых: слишком сильно на всех давил здравый смысл. Но прошедшие десятилетия сделали свое дело: специальную теорию относительности изучают даже средней школе, а в обычном разговоре то и дело можно услышать: «Все в мире относительно».

Общая теория относительности (ОТО) была востребована современной технологией сравнительно недавно, два десятилетия назад — в высокоточной позиционной астрономии. Сейчас ОТО используется в высокоточной навигации (система космической навигации GPS, ГЛОНАСС): поправки, следующие из СТО и ОТО, используются в системах спутниковой навигации (GPS). В настоящее время формулы для редукции (введение поправок) за счет эффектов ОТО приводятся во всех астрономических справочниках. И, возможно, это только начало использования результатов ОТО.

Открытие Эйнштейном кривизны пространства «физики приветствовали взрывом аплодисментов, какие до тех пор можно было слышать только на бейсболе». Действительно, до Эйнштейна никто не мог понять, как могут тела в природе действовать друг на друга на расстоянии. Это была загадка загадок, а ньютоновская механика ее не разрешила. Блестящий ученый сэр Артур Эддингтон говорил, что без этой кривизны в пространстве разобраться вообще невозможно. «Признайте кривизну пространства, — писал Эддингтон в 1927 году, — и таинственная сила исчезнет. Эйнштейн изгнал этого демона».

Но представить себе эту кривизну обыденный здравый смысл отказывается. Да и вообще кажется, что теории эволюции Вселенной навсегда останутся гипотезами, так как ни одно из предположений (даже об изотропности и однородности) не может быть проверено.

Как известно, красное смещение является доказательной базой расширения Вселенной. Поставить под сомнение природу красного смещения — значит убирать доказательную базу Большого взрыва и всю модель расширяющейся Вселенной. Подобно тому как в СТО ставится под сомнение опыт Майкельсона–Морли, в случае со Вселенной ставится под сомнение причина эффекта Доплера.

А что если причина наблюдаемого красного смещения не эффект Доплера? И появился ряд альтернативных объяснений этого эффекта. Например, предполагается, что свет смещается в красную область при преодолении огромных расстояний, а галактики никуда не разбегаются. Может быть предложена следующая гипотеза: гравитация, по мере удаления фотонов от массивного тела, действует против направления движения и на передний конец волны — с меньшей силой, чем на задний, что волну растягивает. По мере приближения к массивному телу гравитация действует в направлении движения, на передний конец волны сильнее, чем на задний, что опять волну растягивает. Результат: длина волны возрастает пропорционально градиенту гравитации по пути следования.

Эта версия могла бы объяснить, почему красное смещение одинаково для всех направлений и почему с ростом расстояния до наблюдаемых объектов красное смещение увеличивается. Ведь вряд ли Земля находится в центре расширения Вселенной. Эти предположения позволяют, в частности, отказаться от экзотической темной материи в модели Вселенной.

Если в самом хаббловском эффекте красного смещения не сомневались, то искали для него менее грандиозное объяснение. Таким объяснением попроще стало предположение о «старении» фотонов. Концепция впервые была предложена астрономом Фрицем Цвикки в 1929 году, который предположил, что фотоны теряют энергию в столкновениях с другими частицами. При этом изменяется частота фотонов.

Но вот весьма кстати подоспело открытие очень важного физического эффекта Р. Мёссбауэром (род. 1929). Открытие эффекта Мёссбауэра создало возможность экспериментальной проверки общей теории относительности (ОТО) в лабораторных условиях, а именно возможность показать влияние гравитационного поля Земли на частоту фотона.

Эффект Мёссбауэра, или ядерный гамма-резонанс, открытый в 1957–1958 году Рудольфом Мёссбауэром в Институте им. М. Планка в Гейдельберге (ФРГ), состоит в резонансном испускании или поглощении гамма-лучей без отдачи. Эффект имеет существенно квантовую природу и наблюдается при изучении кристаллических, аморфных и порошковых образцов, содержащих один из 87 изотопов 46 элементов. Резонансное поглощение может иметь место только в том случае, когда энергия отдачи ядра R меньше ширины ядерного уровня. Р. Мёссбауэр, исследуя явление резонансного поглощения γ -квантов, понизил температуру источника и обнаружил, что число поглощенных фотонов существенно увеличилось, то есть наблюдалось резонансное поглощение γ -квантов. Качественно это можно объяснить тем, что в этом случае импульс отдачи получало не отдельное ядро, а весь кристалл, в котором находились ядра, испускающие γ -кванты. То есть ситуация меняется при переходе от свободных атомов к атомам, связанным в кристаллической решетке. С уменьшением температуры источника увеличивается относительное число ядерных переходов с передачей импульса отдачи всему кристаллу. Условия для этого тем благоприятнее, чем ниже температура кристалла и энергия перехода E_γ .



Рис. 33.29

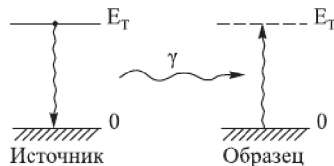


Рис. 33.30

В 2000 году в одном журнале Мёссбауэр дал наглядную интерпретацию эффекта: ситуация... *напоминает человека, прицельно бросающего камень из лодки. Большую часть энергии согласно закону сохранения импульса получает легкий камень, но меньшая часть энергии броска переходит в кинетическую энергию получающей отдачу лодки. Летом лодка просто приобретет некоторое количество движения, соответствующее отдаче, и отплывет в направлении, противоположном направлению броска. Однако зимой, когда озеро замерзнет, лодку будет удерживать лед, и практически вся энергия броска будет передана камню, лодке (вместе с замерзшим озером и его берегами) достанется ничтожная доля энергии броска. Таким образом, отдача будет передаваться не одной только лодке, а целому озеру, и бросок будет производиться «без отдачи».*

Вообще говоря, изменение частоты фотона (и замедление времени) создается гравитацией даже на крыше здания: там время течет чуть быстрее, чем у его основания, хотя эффект слишком мал, чтобы его можно было заметить. А вот с помощью эффекта Мёссбауэра его можно было «отловить».

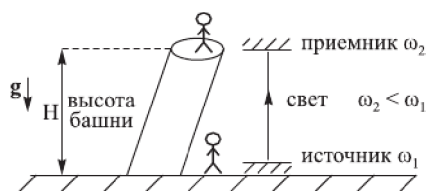


Рис. 33.31. Паунд и Ребка провели эксперимент, в котором приемник гамма-излучения был расположен на высоте $H = 22,5$ м над источником (также проводился эксперимент, когда источник находился сверху, приемник — внизу)

И такие эксперименты были проведены в 1959 году Паундом и Ребкой. Эксперименты Паунда–Ребки являются первыми наземными экспериментальными тестами общей теории относительности. Соответствующее изменение гравитационного потенциала должно было привести к гравитационному смещению спектральных линий в красную сторону на величину $Z = 2,5 \cdot 10^{-15}$ — величина ничтожная. Сдвиг линий испускания и поглощения оказался в соответствии с теорией. Последующие опыты по наблюдению гравитационного красного смещения только уточнили их результаты. В 1976 году группой физиков Смитсоновского института под руководством М. Вессо были проведены эксперименты по измерению гравитационного смещения на баллистической ракете — Gravity Probe A. Предварительная обработка результатов дала погрешность 0,04 % от теоретического значения.

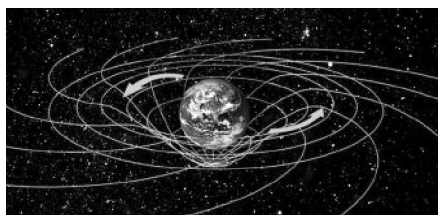


Рис. 33.32. Теория относительности Эйнштейна предсказывает, что вращающаяся масса буквально «увлекает пространство за собой», заставляя его вращаться вместе, словно воронка некоего гигантского водоворота

И такие эксперименты были проведены в 1959 году Паундом и Ребкой. Эксперименты Паунда–Ребки являются первыми наземными экспериментальными тестами общей теории относительности. Соответствующее изменение гравитационного потенциала должно было привести к гравитационному смещению спектральных линий в красную сторону на величину $Z = 2,5 \cdot 10^{-15}$ — величина ничтожная. Сдвиг линий испускания и поглощения оказался в соответствии с теорией. Последующие опыты по наблюдению гравитационного красного смещения только уточнили их результаты.

Гравитационные волны. Уравнения Эйнштейна помимо замедления времени вблизи массивных тел предсказывали, что при ускоренном движении массивных тел в окружающем их гравитационном поле должны появляться особые — гравитационные — волны. Это должно происходить вследствие изменения кривизны пространства, например при резком изменении положения тела. При этом изменения сначала происходят в ближайших точках, а затем эти изменения повлекут за собой соответствующие изменения в точках более дальних, ины-

ми словами, в пространстве пройдет «волна изменения кривизны». Аналогично: этот резкий сдвиг тела вызовет изменение скорости течения времени в прилегающих точках поля, и отсюда это изменение тоже начнет распространяться во все стороны. Такое совместное распространяющееся изменение кривизны пространства и скорости течения времени и называется гравитационной волной. Изменения, вызываемые гравитационными волнами, чрезвычайно малы. При действии на приборы гравитационная волна должна вызывать в приборах микроскопические изменения. В 1974 году физики обнаружили пару нейтронных звезд, которые кружились по орбитам вокруг общего центра тяжести, и при этом их орбиты всё время сближались, причем как раз с такой скоростью, какая должна была быть, если учесть, что гравитационные волны, непрерывно порождаемые ускоренным движением этих звезд, каждую секунду уносят определенную энергию (причем именно такую, которую предсказывают уравнения Эйнштейна). Так было получено косвенное подтверждение реальности гравитационных волн.

Гигантские черные дыры, образовавшиеся в результате столкновения массивных черных дыр, также должны порождать гравитационные волны, которые можно зарегистрировать современными приборами (хотя волны от такого столкновения могут изменить размеры достаточно больших приборов на десятые доли размера протона, т. е. порядка 10^{-16} м). В установке LIGO (Advanced

Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) такие волны были зарегистрированы. В этой установке свет от источника попадает на зеркало, где расщепляется на два пучка, идущих по двум взаимно перпендикулярным тоннелям длиной 4 км к двум отражательным зеркалам. Там они отражаются, возвращаются к центральному зеркалу, и от него отражается в детектор, где оба световых луча складываются (интерferируют), создавая некую определенную картину на экране. Если за время наблюдения прошла гравитационная волна, немного изменившая размер туннелей, картина на экране должна измениться. И 14 сентября 2015 года такое изменение было зафиксировано. Расчеты показали, что гравитационная волна пришла с расстояния 1,4 млн световых лет и была результатом столкновения двух черных дыр массой 37 и 29 масс Солнца. При этом возникла черная дыра массой 62 массы Солнца. Энергия, эквивалентная 3 массам Солнца, была унесена гравитационными волнами. Обнаружение гравитационных волн лишний раз демонстрирует мощь науки: предсказывали и открыли. Вычисляли сложный процесс, проистекающий при огромном искривлении пространства, — все оказалось правильно. Таким образом, можно полагать, что наука получила еще одно орудие для изучения Вселенной.



Рис. 33.33. Обсерватория LIGO
(caltech.edu)

Оглядывая пройденный путь

Новая физика и крушение здравого смысла. Еще остаются вопросы.

- 34.** *«Абсолютного покоя нет!» Парадоксальные свойства эфира в классической физике. Борьба за эфир. Аргументы противников квантовой механики. Борьба против ОТО. В петле здравого смысла. Роль математики в современной физике. «Там, внизу, полным-полно места». «Теория всего».*

Все, окружающее нас, является непостижимой тайной. Мы должны пытаться раскрыть эту тайну, даже не надеясь добиться этого.

Карлос Кастанеда (1925–1998),
американский антрополог и писатель.



Рис. 34.1. Если истинность релятивистского учения Эйнштейна представить в виде велосипеда, то известная фотография 1933 года «Велосипедная прогулка» (см. слева) будет выглядеть иначе (см. справа) (фото из статьи Олега Акимова «Феномен Эйнштейна»)

В предыдущих разделах было рассказано о теориях, на которых держится вся современная физика: специальной и общей теории относительности и квантовой механике. Из рассказанного могло создаться впечатление, что эксперименты, наблюдения и применения названных теорий не должны оставить сомнений в их справедливости. Но действительность оказалась иной, и начались главные неприятности именно с Эйнштейна. В 1905 году он объявил, что абсолютного покоя нет, и с тех пор его не стало. «Эйнштейн нокаутировал пространство и время так же, как Резерфорд нокаутировал вещество» (Ликок С. Физики продолжают шутить. М.: Мир, 1968). Однако сомнения, возникшие еще на заре упомянутых теорий, не только не развеяны, но в последнее время полемика вокруг этих теорий вспыхнула с необычайной силой и размахом.

Поэтому следует рассказать и об аргументах противников СТО, ОТО и квантовой механики.

В начале прошлого века казалось, что найден выход из великого кризиса классической физики. Принято считать, что началу кризиса в физике положил отрицательный результат опыта Майкельсона–Морли, похоронивший эфир. Но еще задолго до постановки этого эксперимента ученые стали осознавать парадоксальность эфира.

Понятие эфира развили древние греки две с половиной тысячи лет назад. Много веков после этого, в 1618 году, французский философ, физик и математик Рене Декарт предложил рассмотреть эфир в качестве материального переносчика света. По его представлениям, свет является сжатием, распространяющимся в идеально упругой среде (эфире), которая заполняет все пространство. С тех пор идея эфира прочно вошла в научный оборот, особенно в трудах Ньютона, Френеля, Максвелла, Лоренца. Вторая, после ньютоновской, великая теория Максвелла тоже опиралась на концепцию эфира. Именно на основе созданной им модели эфира были получены уравнения электродинамики. Максвелл рассматривал его натяжения и сжатия, потоки и завихрения. Вот почему математический аппарат электродинамики Максвелла во многом сходен с математическим аппаратом физики сплошной среды, в качестве которой и рассматривался эфир.



Рис. 34.2. Рене Декарт (Википедия)

До начала XX века никто и не сомневался, что вокруг вещества что-то должно быть, все считали, что вещество окружает эфир — пятая субстанция после газа, жидкости, твердого и плазменного состояния.

Эфир проникал в физические модели, был тканью Вселенной. Однако в начале двадцатого века от идеи эфира пришлось отказаться. Что же произошло тогда? Но все произошло не тогда, а раньше и началось еще... с Ньютона. С открытием Ньютоном закона всемирного тяготения эфир рассматривался (в том числе и самим Ньютоном) в качестве материального агента между тяготеющими друг к другу телами (массами). Эфир необходим был и для объяснения других сил дальнего действия — электрических и магнитных. Без преувеличения можно сказать, что без участия промежуточной материальной среды действие, например, магнита на кусок железа на расстоянии было в высшей степени загадочно.

Всё было бы ничего, но возникли фундаментальные трудности. Ну как можно было объяснить отсутствие тормозящего действия эфира на движущиеся в пространстве планеты и другие небесные тела? Пришлось защитникам эфира наделять его свойствами чрезвычайно разреженной субстанции, не препятствующей движению. Получалось, что эфир, с одной стороны, должен обладать огромной жесткостью (чтобы обеспечить огромную скорость света), а с другой — крайней разреженностью и легко, без сопротивления, проникать сквозь любые тела. Эта эфемерная субстанция должна быть абсолютно неподвижной и в то же время легко возмущаться движением зарядов. При этом эфир должен быть совершенно лишенным вязкости: лишь так можно объяснить, что свет далеких звезд приходит к нам практически без ослабления. Ну как можно все это было совместить в одном «лице»?

К началу XX века сложились два взгляда на эфир: либо он увлекается движением тел, либо не увлекается (неподвижен). Из концепции неувлекаемого эфира следовало неравноправие инерциальных систем и существование привилегированной (связанной с эфиром) системы отсчета, называемой абсолютной. Когда же был поставлен опыт Майкельсоном и Морли, то уже окончательно выяснилась несостоятельность концепции эфира: распространение света и электромагнитных воздействий носит не абсолютный, а относительный

характер. То есть не существует никакой абсолютно неподвижной среды типа эфира.

Таким образом, от концепции эфира пришлось отказаться. А. Пуанкаре и А. Эйнштейн предложили чисто формальный путь выхода из кризиса. Дабы совместить электродинамику Максвелла с результатом опыта Майкельсона, они предложили видоизменить саму механику так, чтобы, во-первых, все явления выглядели одинаково во всех инерциальных системах, обладая лишь относительным, а не абсолютным характером (1-й постулат СТО), а во-вторых, чтобы скорость света всегда была равна константе c и не зависела бы от движения источника или приемника (2-й постулат СТО). Эти два утверждения-постулата и стали основой новой неклассической механики теории относительности. То есть классическая механика заменялась релятивистской механикой СТО, которая уже не противоречила теории Максвелла. Избавившаяся от эфира релятивистская механика просуществовала с начала XX века до сего дня, на ее основе делают многочисленные практические расчеты, упомянутые ранее.

Как же удалось Эйнштейну создать теорию, заменившую классическую механику, без эфира? На то и нужен был гений Эйнштейна, чтобы одним ударом решить противоречия. Если Лоренц и Пуанкаре интерпретировали эти преобразования как результат сжатия тел постоянным давлением эфира, то есть динамически в рамках классических представлений о пространстве и времени, то Эйнштейн интерпретировал преобразования Лоренца кинетически, то есть как характеризующие свойства движения в пространстве и времени, тем самым заложив основы теории относительности. Он снял проблему эфира, просто упразднив его. Тем самым радикально изменил классические представления о пространстве и времени. Эйнштейн обошел проблему структуры материи и направил свое внимание на теорию измерения. Теория Эйнштейна занимается только кажущимися изменениями; и эти изменения не зависят от микроскопической структуры и скрытых механизмов, определяющих структуру материи. Более того, в отличие от постулировавшихся ранее реальных изменений эти кажущиеся изменения являются взаимными: как наблюдателю А кажется, что измерительный стержень наблюдателя В испытывает сжатие в направлении движения, так же и наблюдателю В кажется, что стержень А испытывает точно такое же сжатие. Как наблюдателю А кажется, что часы В идут медленнее, так и наблюдатель А, в свою очередь, полагает, что часы В отстают от его собственных. В силу этой взаимности или относительности наблюдателей А и В Эйнштейн отбросил идею о светоносном эфире как преимущественной системе отсчета. О том, что эфир не нужен физике, Эйнштейн предполагал задолго до создания СТО. Вот что он писал своей первой жене Милеве Марич (1875–1948) еще в августе 1899 года: «Я все более и более убеждаюсь в том, что электродинамика движущихся тел в том виде, в каком она существует сегодня, не соответствует действительности и что в будущем будет возможно представить ее в более простом виде. Введение «эфира» в электрические теории привело к понятию среды, о движении которой мы можем говорить только без приписывания этому понятию какого-либо физического смысла...»

Эфир был выброшен за ненадобностью, но вот борьба за его жизнь не прекращается уже более ста лет!

То, что открыл и внес в физику Эйнштейн, было поистине революционно. Однако бороться со здравым смыслом было очень непросто. Сторонники здрав-

го смысла негодовали по поводу выводов СТО, возмущались, требовали «других доказательств». А в этих «других доказательствах» недостатка не было. Они появились в совершенно неограниченном числе много времени спустя, когда физики начали работать с частицами, движущимися с околосветовой скоростью.

Ниспровергатели СТО в основном били по трем целям: по экспериментам, результаты которых мотивировали выбор постулата независимости скорости света от системы отсчета (Майкельсона—Морли), по экспериментам, которые якобы подтверждали ее следствия (лоренцево сплющивание эквипотенциальной поверхности движущегося электрона, обнаружение мюонов у поверхности Земли благодаря замедлению времени), а также по внутренней противоречивости (парадокс близнецов).

В двадцатом веке ученые обнаружили, что помимо стабильных частиц, таких как электрон, позитрон, протон, фотон, мир наполнен частицами, живущими миллионные и миллиардные доли секунды. За это время до распада частица может пройти расстояние в несколько см. Оказывается, однако, что частицы с таким характерным временем распада успевают пролететь гораздо большее расстояние, пока не распадутся на более легкие. С точки зрения теории относительности это связано с замедлением времени в системе отсчета, связанной с движущейся частицей. Получается, что в этой, сопутствующей, системе отсчета частица распадается за привычное характерное время распада, по часам же наблюдателя проходит большее время. Конечно, последний результат не является доказательством релятивистского характера замедления времени: он всего лишь говорит, что парадокс глубокого проникновения мюонов в атмосферу успешно разрешается с помощью специальной теории относительности. И, конечно же, чтобы избежать ощущения искусственности замедления времени, сразу скажем, что оно измерялось напрямую с помощью точнейших атомных часов, и результаты подтвердили предсказания теории относительности.

Опыт Майкельсон—Морли оппоненты СТО считают чуть ли не основным камнем в основании СТО. Это связано с тем, что опыт Майкельсона—Морли в момент становления СТО был проинтерпретирован в соответствии с принципом относительности, а именно: скорость света в любой системе координат имеет одинаковую величину с и не зависит от направления распространения волны (то есть изотропна). Однако в ряде работ пытаются доказать, что из опыта Майкельсона—Морли такой результат не вытекает. Из их опытов вытекает лишь изотропия времени двустороннего распространения света. Так что борцы за эфир считают, что эфир хоронить рано!

Не раз экспериментаторы (Морли, Миллер и др.) пытались опровергнуть опыт Майкельсона, увеличивая точность измерения. Ловля эфира стала для них сбором улики против теории относительности.

В начале 30-х годов физик Георг Иосс предпринял новые опыты и еще раз развеял легенду о пойманном эфире. При этом он без всякой вежливости высмеял другого физика — Миллера: на свою беду, тот всерьез указал, что в стене его высокогорной лаборатории, через которую должен был «дуть эфирный ветер», имелось стеклянное окно, дабы этому ветру было легче дойти до прибора! «К сожалению, — издевался Иосс, — Миллер не указывал, было ли в противоположной стене другое окно, чтобы эфирный сквозняк стал сильнее».

Стоит напомнить высказывание Р. Фейнмана: «Главный принцип — не дурачить самого себя. А себя как раз легче всего одурачить».



Рис. 34.3. Домик Дэйтона Миллера для эфирных измерений на Моунт-Вилсон, 1920-е годы. Окна, закрытые бумагой, были расположены в плоскости светового пути интерферометра

Однако вплоть до настоящего времени предпринимаются попытки спасти эфир. Замедление времени в движущейся системе отсчета особенно раздражает непосвященных, видимо задевая их глубже, чем другие странности СТО. Примерно половина статей, поступающих в физические журналы от таких адресатов, касается проблемы времени и относительности, и авторы упорно ищут изъяны в рассуждениях Эйнштейна или противоречия в теории СТО. С особыми ухищрениями они пытаются опровергнуть знаменитый парадокс близнецов. Уж очень он не укладывается в здравый смысл. Но, правится это или нет, замедление времени вполне реаль-

но и наблюдаемо. Одно из самых сильных замедлений времени, которое удалось создать человеку, происходит на установке в Дарсбери (графство Чешир, Великобритания). Называется эта установка «электронный синхротрон» и предназначена для ускорения пучка электронов, который проходит по кольцу диаметром 30 м три миллиона раз в секунду. Большие магниты отклоняют электроны от естественного движения по прямой, и каждый оборот по кольцу сопровождается испусканием электромагнитного излучения, называемого синхротронным. Электроны движутся со скоростью лишь на одну десятитысячную процента меньше скорости света; при этом масштаб времени растягивается, по сравнению с нашим, примерно в десять тысяч раз. Именно это расхождение масштабов времени используют инженеры, для этого главным образом и был построен ускоритель. Хотя частота испускаемого излучения в собственной системе отсчета электронов (напомню, что собственное время — это пространственно-временной интервал между двумя событиями, происходящими в объекте (с объектом), то есть двумя точками, взятыми на траектории движения материального объекта (тела); в этом случае собственное время тела измеряется по часам, совмещенным с телом (по часам системы отсчета, относительно которой тело покоится), или по часам инерциальной системы, относительно которой движется тело) составляет всего лишь несколько килогерц (то есть лежит в диапазоне радиочастот), в лабораторной системе отсчета вследствие замедления времени частота увеличивается в тысячи раз. Поэтому испускаемое электронами излучение мы воспринимаем как ультрафиолетовое или рентгеновское. Таким образом, с помощью синхротрона эффект замедления времени используется для генерации интенсивного коротковолнового излучения в широком диапазоне частот. Такие установки немногочисленны и находят ряд практических применений, даже в областях далеких от физики.

Однако представляется, что подтверждение замедления времени наблюдается лишь в экспериментах микромира. А вот в реальных, «человеческих» условиях реализовать его невозможно (огромные перегрузки и т. п.). Поэтому эффект замедления времени в парадоксе близнецов и воспринимается как игра ума в лучшем случае.

В общем случае релятивистских скоростей парадокс остается неустранимым и является примером нарушения причинно-следственных связей, и до сих пор сильная козырная карта — в руках антирелятивистов.

Также считается, что знаменитая формула $E = mc^2$ ничем не доказана. Действительно, она формально получена из разложения в ряд известного релятивистского выражения для энергии при $v/c \ll 1$. В этом разложении знаменитая формула будет первым членом ряда, соответствующим случаю $v = 0$, откуда и получила название энергии покоя. Вроде как-то странно, что покоящаяся масса обладает энергией. Получается, что «из-за эквивалентности массы и энергии энергия, связанная с движением, проявляется как дополнительная масса». Чудеса, да и только. Для уверовавших в СТО здесь нет проблем, а примирить здравый смысл с подобным утверждением нелегко.

Заметим сразу, что соотношение между массой и энергией следует понимать не как буквальную возможность превращения массы в энергию или наоборот, а лишь как основание для *количественного сопоставления* этих величин. Например, в 1 грамме угля содержится энергия $E_1 = 1 \text{ г} \times (3 \times 10^{10} \text{ см/с})^2 = 9 \times 10^{20} \text{ эрг}$. В то же время при сжигании 1 г угля выделяется 7000 кал, или $2,9 \times 10^{11} \text{ эрг}$.

Говорить о *превращении массы в энергию* можно, только связав массу с частицей, имеющей массу покоя, а энергию — с фотоном. Тогда при превращении фотона в пару частиц происходит переход энергии в массу этих частиц, и при аннигиляции пары частиц их масса превращается в энергию фотона. Появившаяся на свет формула $E = mc^2$ получила блестящее подтверждение, когда было открыто деление урана U235, при котором одна тысячная часть полной массы исчезает, чтобы вновь целиком обнаружиться в виде атомной энергии. Это действительно одна из самых блестящих и лаконичных формул за всю историю физики. Как тут не процитировать Е. Леца: «Когда видишь уравнение $E = mc^2$, становится стыдно за свою болтливость».

Ни сама СТО, ни физики, ни математики не дают никакого описания механизма действия второго принципа (постулата) СТО. Каким образом происходит явление, что скорость света не зависит от скорости источника? Оппоненты полагают, что в общем СТО не добавила в физику простоты, а лишь создала непреодолимое препятствие в виде отсутствия физических механизмов осуществления ее постулатов и вытекающих из них парадоксов.

Теория Эйнштейна не была окончательным ударом по здравому смыслу, потому что за теорией относительности появилась квантовая механика, которая оперировала уже совсем непредставимыми объектами. Здравый смысл подвергся новому испытанию.

Когда появилась квантовая механика, философы всюду запаниковали: «Мы оказались в мире, в котором не работает здравый смысл». И было от чего паниковать. Такие факты, как способность света наблюдаться и в виде частицы, и в виде волны, как соотношение неопределенностей, утверждающее, что мы никогда не сможем одновременно узнать, с какой точно скоростью движется электрон и где точно он находится, и, наконец, квантовое понятие суперпозиции, требуют совершенно иного способа понимания мира, отличного от представлений классической физики, в которой тела ведут себя предсказуемым и детерминированным образом. И большинство ученых оказались к этому не готовы. Достаточно вспомнить неприятие квантового описания явлений А. Эйнштейном, который утверждал: «Квантовая механика действительно впечатляет. Но внутренний голос говорит мне, что это еще не идеал. Эта теория говорит о многом, но все же не приближает нас к разгадке тайны Всевышнего». В ресторане отеля, где

жили участники Брюссельского конгресса физиков, во время спора с Нильсом Бором он припечатал «принцип неопределенности» своей знаменитой фразой: «Господь Бог не играет в кости». Или: «По крайней мере, я уверен, что Он не бросает кости». (Эта цитата часто перефразируется как «Бог не играет в кости» или «Бог не играет в кости со Вселенной» и т. п.). И еще: «...Я... беспрестанно искал другой путь для решения квантовой загадки... Эти поиски обусловлены глубокой, принципиального характера неприязнью, которую мне внушают основы статистической квантовой теории».

Позже Гейзенберг пытался оправдать упрямство Эйнштейна, который до конца жизни не принял квантовой теории, хотя она уже стала составной частью физики: «Эйнштейн посвятил труд своей жизни исследованию объективного мира физических процессов, которые в пространстве и времени протекают независимо от нас по своим незыблемым законам. А тут вдруг стали утверждать, что если углубиться в атомы, то такого объективного мира в пространстве и времени вовсе и нет... Он не мог позволить, чтобы почва ушла из-под его ног».

Противники квантовой механики считают, что разрешение противоречий, выявленных при попытках объяснения новых явлений способами старых представлений, было достигнуто не за счет усовершенствования моделей явлений и вскрытия их внутренней структуры, а путем ввода соответствующих постулатов и новых методов математического описания. То есть всё, что не смогли объяснить, просто постулировали, прикрывшись математическим описанием, а «все надежды в создании хоть какой-нибудь приемлемой теории связывались с математическим формализмом». Не об этом ли говорил Р. Фейнман в своей нобелевской речи («...Наверное, наилучший способ создания новой теории — угадывать уравнения, не обращая внимания на физические модели или физическое объяснение»)?

Рассмотрим, как это происходило при объяснении строения атома. На «детский» вопрос, почему электрон не падает на ядро, ответ был простой: электрон в атоме, находящемся в стационарном состоянии, вращается на определенной орбите, на которой не излучает энергии.

Но это противоречит электродинамике Максвелла. Электрон вращается, значит, подвержен центростремительному ускорению. Согласно классической электродинамике электрон, движущийся с ускорением, обязан излучать непрерывно и упасть на ядро за 10^{-11} с. А электрон и не излучает без нужды, и не падает на ядро?! То есть на вопрос «почему так происходит?» следует ответ: потому что так! Такое объяснение не удовлетворяло. Его с трудом «переваривали» и будущие корифеи квантовой теории. Юный Гейзенберг так говорил о них: «Пусть это безумие, но в нем есть метод». Отто Штерн вспоминал много лет спустя, что в то время они с Лауэ поклялись оставить занятия физикой, если «в этой боровской бессмыслице хоть что-то есть». «Физика теперь зашла в тупик, во всяком случае, для меня она слишком трудна, и я предпочел бы быть комиком в кино или кем-нибудь вроде этого и не слышать ничего о физике!» — так сказал В. Паули в мае 1921 года.

Принцип запрета Паули хорошо объяснял структуру атома, но введение квантовых чисел оставляло неприятный осадок. Казалось, что эти числа навязываются природе, и непонятно из чего, собственно, они следуют. Так, любое

явление можно объяснить, введя дополнительные параметры, какие душа пожелает.

А затем появился на сцене корпускулярно-волновой дуализм. И это явилось очередным тяжелым испытанием для здравого смысла. Буквально «дуализм» означает двойственность, единство двух качеств. И у света, и у электронов проявляются, казалось бы, взаимно исключающие друг друга свойства частиц (корпускул) и волн. Но ведь не может же электрон (будем конкретности ради говорить о нем) быть одновременно и частицей, и волной? Трудно представить здравому смыслу совместимость этих двух образов. Значит, сказав, что электрон — и волна, и частица, мы тем самым признали, что он не является, строго говоря, ни тем, ни другим: не является ни частицей в обычном смысле слова, ни волной. (То же самое относится к фотону.) Оказалось, что все частицы — это какие-то «кентавры микромира».

И не смогли побороть скептиков опыты по дифракции электронов (дифракция от двух щелей), ни другие эксперименты. А туннельный эффект скептики отрицают, считая его профанацией, неспособностью признаться в непонимании. Считают, что никакого туннелирования нет, для реальной физики (классической) — это рядовой процесс, протекающий без нарушения классических законов. И вообще, классические методы — безотказный инструмент, который прекрасно действует и в микромире, и при релятивистских скоростях действует более успешно, чем теории современной физики, и на уровне более глубоком, чем ее фундаментальные постулаты.

Сторонники квантовой механики согласились признать, что свет одновременно является и волной, и частицей, а противники же квантовой механики вызывают к логике, здравому смыслу. Понятно, что принять корпускулярно-волновой дуализм здравый смысл не в состоянии.

Но и создатели квантовой механики видели серьезные противоречия в теории и всеми силами пытались их разрешить. Для объяснения противоречий классиками квантовой механики был выдвинут ряд принципиальных положений. Речь в первую очередь шла об объяснении дуализма «волна–частица», доказанного в известных опытах по дифракции электронов. Стандартным объяснением считалась так называемая копенгагенская интерпретация (или принцип дополненности Н. Бора). В 1927 году два основателя квантовой механики — Нильс Бор и Вернер Гейзенберг — сформулировали первую ее версию. Девиз копенгагенской школы физиков: *Contraria sunt complementa!* (противоположности суть дополненности!). Суть копенгагенской интерпретации (толкования) заключена в следующих положениях.

Вероятностный характер предсказаний квантовой механики принципиально неустраним, то есть он вовсе не говорит о том, что наши знания ограничены, что мы не знаем значений каких-то скрытых переменных. В классической физике вероятность использовалась для описания результатов типа подбрасывания игральной кости, хотя фактически этот процесс считался детерминированным. То есть вероятности использовались вместо неполного знания.

Часто цитируется высказывание Пьера Лапласа (1749–1827), сказанное им в 1814 году: «Разумное существо, которое в данный момент знало бы все движущие силы природы и взаимное расположение образующих ее тел, могло бы — если бы его разум

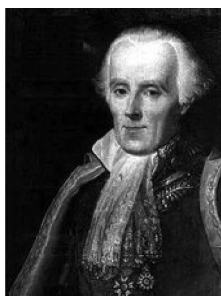


Рис. 34.4. Пьер-Симон Лаплас

был достаточно обширен для того, чтобы проанализировать эти данные, — выразить одним уравнением движение и самых больших тел во Вселенной, и мельчайших атомов. Ничто не осталось бы сокрытым от него — оно могло бы охватить единым взглядом как будущее, так и прошлое». Иными словами, он постулировал, что если бы какое-нибудь разумное существо смогло узнать положения и скорости всех частиц в мире в некий момент, оно могло бы совершенно точно предсказать все мировые события во Вселенной, узнать ее эволюцию как в будущем, так и в прошлом. Следовательно, классическая физика основывается на следующем понимании причинности: состояние механической системы в начальный момент времени с известным законом взаимодействия частиц есть причина, а ее состояние в последующий момент — следствие.

Но,

«Усвоив Ньютона законы,
Лаплас, покинув кабинет,
Сказал, придя к Наполеону:
«Излишен бог, и воли нет».
Но мир смеется над Лапласом,
Крутясь огромным Лас-Вегасом,
Рулеткой клуба знатоков
И барабаном спортлото.
И каждый атом, как рулетка,
А не Лапласовы часы,
Случайно отсчитав часы,
Орбиты открывает клетку,
И, как свободный арестант,
Приходит и уходит квант».

(«Кто играет на суперструнах»,
Agharta, www.agharta.net/Superstrings.html)

Напротив, копенгагенская интерпретация утверждает, что в квантовой механике результат измерения принципиально недетерминирован. Похоже, что А. Эйнштейн был неправ: Бог все-таки играет в кости со Вселенной. Возможно, Эйнштейну все-таки следовало прислушаться к совету своего старого друга и коллеги Нильса Бора, который, в очередной раз услышав старый припев про «игру в кости», воскликнул: «Альберт, перестань же ты, наконец, указывать Богу, что ему делать!» Физика — это наука о результатах измерительных процессов. Измышления на тему того, что происходит за ними, неправомерны. Копенгагенская интерпретация отбрасывает вопросы типа «где была частица до того, как я зарегистрировал ее местоположение?» как бессмысленные.

Акт измерения вызывает мгновенное схлопывание, «коллапс волновой функции». Это означает, что процесс измерения случайно выбирает в точности одну из возможностей, допустимых волновой функцией данного состояния, а волновая функция мгновенно изменяется, чтобы отразить этот выбор. Сейчас любой работающий физик считает копенгагенскую интерпретацию общепринятой версией событий, в основном потому, что она позволяет нам производить вычисления, не слишком задумываясь о том, что все это на самом деле значит. Среди физиков весьма популярна точка зрения, которую изложил Р. В. Поль. Он

пишет: «Вопрос о том, что же «существует» на самом деле, волна или корпускула, в глазах физика лишен содержания; это пустой вопрос. Подобный вопрос относится к области других более словоохотливых наук». Физики говорят, что есть формулы, которые помогают им решать практические задачи, а что кроется за этими формулами, знать не обязательно». Казалось бы, можно успокоиться. А дотошные скептики задаются естественным вопросом: существует ли на самом деле волновая функция? Но, может быть, это пустые придирки и ближе версия американского физика Дэвида Мермина: «Если бы меня заставили изложить суть копенгагенской интерпретации одной фразой, я бы ответил: «Заткнись и считай!» (Фраза эта приписывается также и Ричарду Фейнману, и Полло Дираку. Но Мермин в одной из колонок в журнале *Physics Today* настаивает на своем авторстве.)

Вот показательная цитата из книги известного физика-теоретика Стивена Вайнберга (род. 1933) «Мечты об окончательной теории»: «Самое удивительное в том, насколько все это не имеет значения. Большинство физиков использует квантовую механику в повседневной работе, не заботясь о фундаментальных проблемах ее интерпретации. Будучи здравомыслящими людьми, имеющими очень мало времени на то, чтобы успевать следить за новыми идеями и данными в своей собственной области, они совершенно не тревожатся по поводу всех этих фундаментальных проблем. Недавно Филип Канделас (с физического факультета Техасского университета) ждал вместе со мной лифт, и разговор зашел о молодом теоретике, подававшем надежды на старших курсах и затем исчезнувшем из вида. Я спросил Фила, что помешало бывшему студенту продолжать исследования. Фил грустно покачал головой и сказал: «Он попытался понять квантовую механику».

Вообще, создается впечатление, что в квантовой механике есть что-то мистическое. Можно принять ее законы просто как данность и не задумываться над их внутренней природой, можно, конечно, спокойно относиться ко всем ее положениям, никак не согласующимся с так называемым здравым смыслом. Большинство физиков с таким положением согласны, но не все. И может ли с этим согласиться здравый смысл? Кажется, что не может. Неудивительно, что некоторые считают такое состояние дел неприемлемым. И вот такая цепочка возражений противников квантовой механики. Квантово-механическое описание приводит к тому, что физика принимает вероятностную картину мира. Все, что описывают законы микромира с точки зрения их традиционной интерпретации, — вероятности тех или иных событий. Но что есть вероятность? Вероятность — это не факт, фактом является наблюдение, то есть свершившееся событие. Классическая физика оперировала фактами — конкретным положением частиц в конкретный момент времени. Она была физикой феноменов. Вероятность же — это чисто номинальное (то есть формальное) понятие. Можно обнаружить электрон, электрон наблюдаем. Но как обнаружить вероятность его положения в данной точке в данный момент времени? Ее что, можно увидеть или как-либо зарегистрировать? Нужно проделать множество наблюдений для того, чтобы вычислить ее. Таким образом, единичный факт в рамках квантовых представлений фактом еще не является. Он вообще ни о чем не говорит. Но утверждать подобное — это приблизительно то же самое, что утверждать, что то, что вы в данный конкретный момент времени видите своими глазами, — это еще не факт и ни о чем не

говорит. Может быть, на вопрос, почему для микротел мы применяем квантовые законы, а для макротел — классические, следует ответ, что все дело в малости постоянной Планка. Качественно же все выглядит именно так, как сказано. Из сказанного выше следует, что слово «неопределенность» в соотношении (принципе) Гейзенберга не обозначает неопределенности в отношении истинности научной теории. Оно, скорее, относится к той неопределенности, которую мы неизбежно вводим в описание физической системы, если пытаемся воспользоваться только старыми ньютоновскими понятиями вроде «частица». Отсюда и другое, по сравнению с обыденным, понимание реальности. Мы должны пытаться найти какие-то понятные аналогии, но удастся это далеко не всегда.

«Сложнее всего говорить обычным языком о квантовой теории. Непонятно, какие слова нужно употреблять вместо соответствующих математических символов. Ясно только одно: понятия обычного языка не подходят для описания строения атома», — писал В. Гейзенберг.

Вроде бы можно не волноваться. Но тогда что же все-таки изучает физика? Пусть понятие факта имеет смысл в макромире.

Тогда вопрос сужается: что же все-таки изучает квантовая физика? Она, по сути дела, изучает чисто номинальные явления, перестает быть физикой феноменов... Эта тенденция номинализации физики уже привела к тому, что вопрос о физическом смысле тех или иных характеристик в рамках квантовой механики стал чем-то неудобным. В чем, например, физический смысл волновой функции электрона? Да, в общем-то, ни в чем, потому что волновая функция электрона не описывает феномен объективной реальности, это чисто номинальная характеристика его движения, она даже не имеет физической размерности и т. д. и т. п. Вот такую безрадостную картину рисуют некоторые физики. Противникам квантовой механики представляется, что проблема корпускулярно-волнового дуализма надуманная. По их мнению, все натяжки и нелепости исчезают, если учесть наличие среды, передающей взаимодействия, — эфира. В этом случае волну де Бройля естественно понимать как волнение эфира, сопровождающее движение в нем следа корпускулы. Так что же — назад к эфиру?

Объем целей, а также их количество возрастали при переходе от СТО к общей теории относительности (ОТО). Вот некоторые из них: вековое смещение перигелия Меркурия, гравитационное искривление траектории светового луча, красное смещение излучения из-за гравитации... Противники ОТО считают, что результаты этих экспериментов, интерпретируемые защитниками в пользу теории, представляются неоднозначными или же сомнительными с точки зрения точности и с методической стороны. Далее, многие эффекты, предсказанные теорией относительности, можно объяснить и без нее (например, отклонение луча света вблизи тяготеющих масс). И наконец, логика теории представляется противоречивой.

Избавившись в начале XX века от эфира, физики-теоретики пытаются бороться со всё возникающими парадоксами в полной пустоте неевклидова пространства. Что касается теории Большого взрыва, то надо признать, что она вызывает у многих большие сомнения. В этой теории описываются подробно события, происшедшие в первые секунды после взрыва... Правда, никто не говорит, почему он, собственно, произошел и что было до него. Не говоря уж о банальных вопросах: что взорвалось? куда и когда? (ведь не было ни пространства, ни времени,

ни материи). Проблема сингулярности тоже «как кость в горле» теории расширяющейся Вселенной. И все это придумали ради того, чтобы объяснить «красное смещение» галактик? Просто решили: раз эфира нет и пространство пустое, то это происходит из-за эффекта Доплера. А все можно было сделать гораздо проще, если не отказываться от эфира и заметить, что, хотя эфир и обладает очень небольшим сопротивлением движущимся телам, фотоны, при таком долгом движении, как от удаленных галактик, теряют свою энергию из-за банального трения об эфир. И в конце концов разваливаются, порождая этим реликтовое излучение.

Так что в космологии без эфира, считают противники ОТО, им (релятивистам) никогда не свести концы с концами. То есть опять требование вернуться к палочке-выручаловке — эфиру.

Критики современной физики утверждают, что в настоящее время нет теории, которая бы логично, а не «сказочно, в виде бездоказательных постулатов, объясняла бы известный факт существования вещества и важнейшие особенности наблюдаемой Вселенной. Есть лишь литературные труды отдельных авторов, в которых они интересно рассуждают о Большом взрыве, якобы чудотворно образовавшем Вселенную. Умозрительно они расписывают доли секунд, когда во Вселенной якобы возникли электроны, кварки, нейтроны, протоны; затем минуты — когда возникли ядра водорода, гелия; тысячелетия и миллиарды лет — когда возникли атомы, тела, звезды, галактики, планеты и т. д., не объясняя, на основании чего они дают такие заключения. Не говоря уже о вопросах, *почему и как именно все это произошло*».

И всякий раз, когда концепция Большого взрыва заводит в тупик, приходится в нее вводить бездоказательно какую-нибудь новую сущность типа необъяснимой космической инфляции (инфляционная модель Вселенной — гипотеза о физическом состоянии и законе расширения Вселенной на ранней стадии Большого взрыва), во время которой за малые доли секунды Вселенная необъяснимо быстро вдруг расширилась на много порядков и продолжает расширяться почему-то с ускорением. А также темную материю, темную энергию, кварки и т. п., которые никак и нигде не поддаются осязанию. В общем — вводить много всего «темного». Как мог возникнуть Большой взрыв вопреки основному закону природы — закону сохранения энергии? Причем еще и с немыслимой температурой, вопреки законам термодинамики?

Уже вышли сотни книг и тысячи статей, доказывающих ошибочность постулатов теории относительности, безнадежность поиска струн (см. ниже), кварков, темной материи.

В петле здравого смысла. Здравый смысл подвергается серьезным испытаниям. Представление об обычности возникает вследствие крайней ограниченности нашего опыта. В повседневной жизни нам не приходится двигаться с такими большими скоростями, которые сделали бы заметными эффекты замедления времени и сокращения пространства, и большинству из нас не приходится вторгаться в неясный и туманный мир атома. И нет наглядных аналогий, когда мы осуществляем переход из привычного нам мира малых скоростей и энергий и средних пространственно-временных масштабов к большим или малым пространственно-временным масштабам, высоким энергиям и большим скоростям. Так что тот мир, который предлагает современная физика, трудно представим.

Старое представление о Вселенной как о каком-то вместилище планет и звезд, помещенном в абсолютное пространство-время, было повержено. На его место пришло искривленное или расширяющееся пространство. Но в обыденном представлении пространство — пустота. А как представить себе искривленную пустоту?

А возможно ли представить себе электрон как волну-частицу? Совершенно невозможно, никаких привычных аналогий здесь не найти. Ситуация усугубляется еще и тем, что современные теории невозможны без математики. С ее помощью описываются самые необычные явления. Но при этом большинство теоретических работ завершаются лабиринтом непостижимых символов. Фейнман в своем замечательном курсе физики, рассказывая об уравнениях Максвелла, написал следующее: «Дорогие студенты, говоря об электромагнитном поле, я бы с радостью представил вам наглядную картинку из колесиков и ремешочков, изображающую поле. Но пользы от картинки — чуть. Вот эти изумительные уравнения, глядящие на вас с доски, — они и есть поле, они и есть первая и последняя физическая реальность». Вот такую картину мира предлагает физик.

Некоторые физики считают, что одной из основных причин кризиса этой науки — необоснованно высокий уровень ее математизации, произошедший за последнее столетие. Математика практически вытеснила из физики саму физику, превратив ее, по существу, в один из разделов математики. Новые разделы физики (ядерная, элементарных частиц, квантовая и другие), по существу, стали специфическими разделами математики. Опираясь на результаты математических расчетов, выдвигались «новые» физические идеи. И с помощью математики они же и подтверждались. Математика превратилась из языка естествознания в его содержание. У изучающих физику возникает ощущение, что они не способны правильно понять ее, поскольку не в силах создать простой мысленный образ описываемого, а сложная математика не помогает этому.

При построении теории относительности, особенно общей, и квантовой механики в полной мере проявилась опережающая роль математики. В отличие от классики, в которой математике (дифференциальным уравнениям) предшествовало установление связи физических понятий с математическими величинами, при разработке релятивистских и квантовых теорий отыскание адекватной математической структуры опережало ее физическое осмысление.

Так, при создании общей теории относительности сначала были найдены риманова структура пространства-времени и тензорно-геометрическая концепция гравитации и только после этого была прояснена собственно физическая сторона дела.

Исследование физических процессов и явлений часто стало проводиться в большей мере не посредством использования и изучения их физических моделей, а посредством построения математических моделей и их анализа с помощью расчетов на вычислительных устройствах. Именно математика способ-

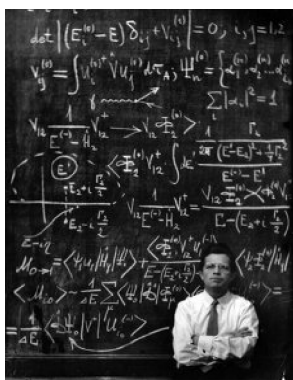


Рис. 34.5. Всеволод Тарасович. Из серии «Московский университет». Поединок. 1963 г.

ствовала тому, что в дополнение к фотону, электрону, протону и нейтрону были «открыты» еще более ста новых «элементарных» частиц, которые к тому же могут рождаться и исчезать бесследно. К началу 1980-х гг. физики буквально утонули в море элементарных частиц. Каждый раз, разбивая атом на части при помощи мощного ускорителя частиц, они, к немалому изумлению, обнаруживали, что из расщепленного атома вылетают десятки новых частиц. Для описания этих процессов был разработан даже специальный раздел математики. Таких частиц стало так много, что подвигло Э. Ферми к следующей сентенции: «Если бы я мог упомянуть названия всех элементарных частиц, я бы стал ботаником». А Роберт Оппенгеймер заявил: «Нобелевскую премию по физике следует отдать тому физiku, который за год не откроет ни одной новой частицы!»

Абстрактные формулы заполняют страницы научных статей и книг сонмищем непостижимых символов. Работы физиков-теоретиков стали непостижимы не только обычному человеку, но часто физикам-профессионалам, специализирующимся в иных, чем данная работа, разделах физики.



Рис. 34.6. Диапазон измерения времени объектов Вселенной

Здравый смысл начал подвергаться немислимым испытаниям. Это касается как физики элементарных частиц, так и астрофизики, где терпят крах земные понятия, столь привычные нашему здравому смыслу. Человеческому сознанию абсолютно непредставимы временные и пространственные интервалы, изучаемые физикой.

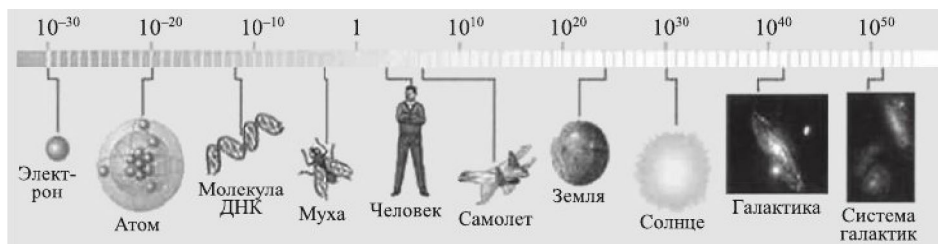


Рис. 34.7. Диапазон измерения массы объектов Вселенной

Действительно, современная физика изучает интервалы пространства и времени примерно в диапазоне, охватывающем более 44 порядков (то есть степеней десяти). Эти крайние размеры и длительности очерчивают пределы научного знания. Одна крайняя область — это область элементарных частиц, а другая —

Вселенная как целое. Между этими двумя областями располагается «обычная» физика, изучающая тела «обычных» размеров, с которыми мы имеем дело в нашей повседневной жизни. Эти тела не слишком сильно (не на много порядков) отличаются по размерам от нас самих. Эта область сравнительно небольших скоростей (много меньших скорости света), да и длительность процессов сравнима с длительностью человеческих циклов.

Уже более ста лет множество людей пытаются опровергнуть теорию относительности. И ведь они осведомлены, что эта теория подтверждается практикой. При этом создается впечатление, что у квантовой механики, еще более парадоксальной, чем теория относительности, опровергателей существенно меньше. Чем же в этом отношении теория относительности отличается от квантовой механики?!

По-видимому, это связано с тем, что квантовую теорию невозможно, как уже отмечалось, представить себе никакими привычными аналогиями и образами. Что видно уже по соответствующим главам школьного учебника (см., например, С. В. Громов, «Физика», 11 класс, 2002). Действительно, когда в нем речь идет о квантовой механике, скептическому уму не за что зацепиться. Он может или верить тому, что сказано в учебнике, или не верить, не имея при этом конкретных оснований для сомнений. Например, в учебнике утверждается: «Планк предположил, что атомы испускают электромагнитную энергию квантами». Поскольку наш жизненный опыт никак не связан с испусканием электромагнитной энергии атомами, то и наш здравый смысл не дает нам стимулов для поиска возражений. И наоборот, парадоксальность теории относительности очевидна всем, что и вызвало к ней широчайший интерес. По этой причине, а также потому, что основные положения СТО внешне довольно просты, СТО посвящены горы томов книг и статей, среди которых много популярных. Но и в этих популярных книгах попытки доходчиво объяснить парадоксы СТО вряд ли у большинства вызывают доверие. В результате элементарный здравый смысл может привести к сомнениям в правильности этой теории. И устранить такие противоречия между СТО и здравым смыслом очень трудно. Возможно, поэтому у многих после первого знакомства с СТО возникает желание во всем разобраться и найти логическую ошибку в теоретических построениях А. Эйнштейна. К этому их побудила мысль, что физики-профессионалы, должно быть, заблуждаются, поскольку никак невозможно понять, о чем они толкуют. Ни один глубокий принцип природы, заявляют эти любители, не может быть столь абстрактным и непонятным. Кажется, что эти люди хотят, чтобы классическая физика взяла реванш за свои поражения в начале XX века. Они безгранично верят в возможности классической физики, здравого смысла, полагая, что они прекрасно действуют и в микромире, и при релятивистских скоростях. Причем действуют более успешно, чем теории современной физики, и на уровне более глубоком, чем ее фундаментальные постулаты.

Противники «новой физики» не соглашаются с утверждением — если на практике уравнения «новой» физики работают и дают хорошее совпадение с опытными данными и переход между «новой» и «старой» физикой математически осуществлен, то нечего ломать голову над тем, как подогнать новые представления под старые, а следует принять их просто как данность. А со временем по мере отказа от старых привычных представлений «новая физика» будет вос-

приниматься как привычная классическая. Современный физик предпочтет правоту изящной математической схемы возне в противоречивых экспериментальных данных.

Известный американский физик-теоретик Е. Вигнер заявил: «Физики — безответственные люди, поскольку используют математический аппарат, часто не зная, верны ли предлагаемые решения. Когда физик обнаруживает некое отклонение между величинами, напоминающими ему связь, хорошо знакомую из математики, он немедленно приходит к заключению, что найденная закономерность как раз и есть та, которая рассматривается математикой, поскольку ничего другого он не знает. Так формируется «безответственность», питаемая священным пиететом перед всевластием математики». Именно в этом некоторые видят причину того, что основа всего сущего во Вселенной — мировой эфир — был насильственно вытеснен из физики.

Так считают противники новой физики. По их мнению, физика должна вернуться к теориям «эфира» XIX века, развитым в соответствии с новыми представлениями конца века XX-го.

Как мы видели, современная физика часто ставит здравый смысл в тупик. Является ли это «привилегией» современной физики? Или такая ситуация имеет место и в других науках? И, что очень важно, не привыкает ли человеческий ум к новым представлениям непредставимых теорий? Вот что на самом деле очень интересно. Посмотрим, что дает история науки. В общежитейском смысле фраза «на самом деле» означает, что существует лишь то, в чем можно удостовериться, опираясь на показания наших пяти чувств, либо же то, в чем мы можем убедиться с помощью приборов — продолжений наших чувств.

От времен Галилея мы ушли далеко, но вопрос «на самом деле?» теперь означает: «Насколько однозначно толкование опытов относительно явлений, недоступных непосредственному чувственному восприятию?» А такие слова, как «само собой разумеется», изгнаны из лексикона физики». Но при таком подходе возможно различное толкование опыта. Здравый смысл человека, даже причастного к науке, должен это признать. Но физики-то знают, что факты и понятия науки допускают свободу толкования только в процессе их открытия и становления; как только они включены в общую систему физических знаний и согласованы с ними — изменить их почти невозможно, если не переходить при этом грани их применимости.

Тот, кто говорит, что может размышлять о квантовой механике без головокружения, тем самым доказывает лишь, что он ничего в ней не понял.

Нильс Бор

По пути своего развития физика отталкивалась от простых и понятных представлений, пришла к непонятным, согласилась с тем, что понять их невозможно. Но катастрофы не произошло. Точно так же, как к концу XIX века умы привыкли к концепции физического поля, которое невозможно представить себе с помощью простых и наглядных механистических аналогий и которое необхо-

димо воспринимать просто как принципиально иную форму существования материи, мы в процессе учебы привыкаем к квантово-волновому дуализму и к искривленному пространственно-временному континууму как к неким врожденным свойствам материи, пространства и времени, которые сами по себе не имеют внутренней природы, проявляются только в физических условиях, существенно отличных от тех, в которых мы живем, и, следовательно, не могут быть поняты или осознаны с помощью непосредственного жизненного опыта.

«Если мы хотим понять мир не поверхностно, а более глубоко, нам помогут эти теории и разум, а не наши предрассудки, приобретенные мнения и даже не здравый смысл. Наши лучшие теории не только более истинны, чем здравый смысл, в них гораздо больше смысла, чем в здравом смысле. Мы должны воспринимать их серьезно: не просто как практическую основу относящихся к ним областей, а как объяснения мира. Я полагаю, что мы сможем достигнуть величайшего понимания, если будем рассматривать их не по отдельности, а совместно, поскольку между ними существует сложная связь» (Дойч Д. «Структура Реальности»).

«Там, внизу, полным-полно места». В 1959 году американский физик Ричард Фейнман заявил: «Пока мы вынуждены пользоваться атомарными структурами, которые предлагает нам природа». И добавил: «Но в принципе физик мог бы синтезировать любое вещество по заданной химической формуле». Тогда слова известного физика-атомщика, нобелевского лауреата, Ричарда Фейнмана, что «там, внизу, полным-полно места» («There's Plenty of Room at the Bottom») — именно так, подразумевая атомарные уровни, он озаглавил свою речь, были восприняты его коллегами-физиками в Калифорнийском технологическом институте чисто теоретически. В то время не существовало еще и намека на технологии, позволяющие оперировать отдельными атомами на атомарном же уровне, подобно кирпичикам из набора LEGO, а его предложение премировать 1000 долларами (тогда это была серьезная сумма!) того, кто сможет разместить моторчик в кубике с линейными размерами 0,4 мм или уменьшить текст в 25000 раз, было воспринято как «шутка гения». Однако речь Фейнмана не забыли и теперь его называют «отцом нанотехнологий» (приставка «нано» в переводе с греческого обозначает «карлик»). Рассказанное, может быть, лишь отчасти верно. Но не это главное.



Рис. 34.8. Изображение электронной орбитали атома, полученное с помощью квантового микроскопа

Возможно, что первым ученым, который использовал единицу измерения в 1 нм в своих исследованиях, был А. Эйнштейн. В 1905 году он теоретически показал, что размер молекулы сахара равен именно этой величине. Размер атомов порядка 10^{-10} метра почти в 2000 меньше чем то, что можно увидеть в оптический микроскоп. А размер ядра на много порядков меньше размера атома. Электронные микроскопы не «видят» в оптическом диапазоне, они используют сфокусированный пучок электронов для получения информации о структуре и составе веществ. Один тип таких микроско-

пов — сканирующий туннельный, разработан в 1981 году. Такие микроскопы могут различать атомы и являются ключевым инструментом в развитии нанотехнологий. На рис. 34.8 представлено первое непосредственное изображение электронной орбитали атома — «фотография» его волновой функции!

Для получения изображения исследователи воспользовались новейшим квантовым микроскопом.

То, о чем рассказывается, в действительности поражает воображение. И то, что теперь у нас есть нанотехнологии и мы можем оперировать отдельными атомами, показывает, что не существует невидимой «стены», разделяющей микромир и макромир.

Современные представления о том, как формировалась Вселенная, по большому счету подтвердились, хотя было обнаружено отклонение от «стандарта»: обнаружены релятивистские частицы, источником которых не является реликтовое излучение. По одной из гипотез, это излучение может быть связано с незнакомой ранее формой темной энергии, которая в ранние дни Вселенной, судя по всему, была намного более существенной, чем в наше время.

Черные дыры стали неотъемлемой реальностью современной астрономии, астрофизики и космологии. Поведение этих объектов всесторонне исследуется, и оно соответствует описываемой их теории (общей теории относительности). Да, мы не наблюдаем черные дыры непосредственно (по самому определению черной дыры), а наблюдаем лишь их влияние на другие объекты (вращение звезд, например), но многочисленные наблюдения могут быть объяснены лишь наличием огромной, но не наблюдаемой массы — черной дыры.

Совсем недавно черную дыру смогли получить и на Земле. Черная дыра просуществовала крайне мало: всего миллиардную часть наносекунды. При этом ее температура в 300 млн раз превысила температуру поверхности Солнца. Ученые использовали для создания черной дыры ускоритель частиц в Брукхавенской лаборатории. Исследователи столкнули друг с другом два ядра молекул золота, двигавшихся почти со скоростью света. Сила столкновения привела к тому, что ядра распались на кварки и глюоны — мельчайшие частицы, из которых состоит материя. Частицы затем сформировали шар кварк-глюонной плазмы, которая стала поглощать частицы, образовавшиеся в результате столкновения ядер, тем самым образуя черную дыру. Эксперименты продолжаются уже в Большом адронном коллайдере (ЦЕРН).

Можно ли сделать вывод, что модели Большого взрыва и черной дыры нашли многочисленное подтверждение в наблюдениях? Кажется, что это не так. Нужно понимать, что модель Большого взрыва не истина в последней инстанции, но она удовлетворяет наблюдениям и является непротиворечивой. Альтернативных моделей, непротиворечиво объясняющих существующие наблюдения и факты, в настоящее время нет.

Как же проверить непроверяемую теорию? В расчетах различных моделей широко применяются методы математического моделирования с использованием априорных мысленных экспериментов. Использование математического моделирования позволяет сложное явление свести к поразительной простоте. Существует множество математических пророчеств, которые подтвердились, и это укрепляет доверие к математическому прогнозированию. У всех на слуху «вычисления» планет Нептун и Плутон, предсказание искривления луча света вблизи

Солнца (Эйнштейн, ОТО) и т. п. Но при этом надо помнить, что то, что работает на продвижение науки вперед в один момент, будет неверным в другой. «Научная революция происходит тогда, когда рушится парадигма, то есть когда теория, на которой она основана, терпит неудачу в предсказании или объяснении результатов экспериментов. Возможно, что наука не всегда работает таким образом, но определенно имеются нормальные и революционные периоды, и наука действует в течение этих периодов различным образом».

Конечная цель физики — описать Вселенную одним-единственным уравнением, которое могло бы уместиться на майке.

Леон Лидерман, американский физик

Физиков всегда преследовала идея создать некую единую теорию всего. Об этом Макс Планк сказал так: «С давних времен, с тех пор, как существует изучение природы, оно имело перед собой в качестве идеала конечную, высшую задачу: объединить пестрое многообразие физических явлений в единую систему, а если возможно, то в одну-единственную формулу». Известно, сколько сил, энергии, здоровья отдал А. Эйнштейн на создание единой теории поля. И такие поиски продолжаются и в настоящее время.

Для физиков-теоретиков за последние сто лет характерно желание объединить две фундаментальные теории: квантовую теорию и общую теорию относительности Эйнштейна (которая описывает гравитацию) — сложить разрозненные куски в один пазл единой теории всего. В настоящее время эти две теории представляют всю сумму физических знаний на фундаментальном уровне. Унификация теории относительности и квантовой теории необходима нам для того, чтобы понять процесс возникновения на раннем этапе создания Вселенной разных элементарных частиц и физических сил. Но на пути создания общей теории — большие трудности. Эти теории во всем противоположны друг другу, они используют разную математику, разные аксиомы и разную физическую картину мира. При взгляде на них создается впечатление, что у природы «две руки, совершенно не связанные друг с другом».

Но все изменилось с появлением на сцене теории струн. Теория струн — попытка построить общую теорию, объединяющую эффекты, объясняемые и ОТО, и квантовой механикой. Поскольку обе старые теории и так безумно сложны, то и новая теория сложна в квадрате.

В 1970 году американские ученые Йоиширо Намбу, Леонард Сасскинд, а также их датский коллега Хольгер Нильсен предположили, что элементарные частицы — маленькие колеблющиеся одномерные струны, микроскопические нити энергии. Если эти струны являются такими крохотными, рассуждали исследователи, то они по-прежнему будут выглядеть как точечные частицы и, следовательно, не будут влиять на результаты экспериментов. Так и появилась теория струн. В масштабах порядка 10^{-35} м, то есть на 20 порядков меньше диаметра того же протона, в состав которого входят три связанных кварка, структура материи отличается от привычной нам даже на уровне элементарных частиц. На столь малых расстояниях (и при столь высоких энергиях взаимодействий, что это

и представить немислимо) материя превращается в серию полевых стоячих волн, подобных тем, что возбуждаются в струнах музыкальных инструментов. Подобно гитарной струне, в такой струне могут возбуждаться, помимо основного тона, множество обертонов или гармоник. Каждой гармонике соответствует собственное энергетическое состояние. Поделив точечные кварки на струны, физики устранили противоречие между теорией относительности и квантовой механикой. Ведь, согласно принципу относительности, энергия и масса эквивалентны, а значит, чем выше частота гармонической волновой вибрации струны, тем выше его энергия и тем выше масса наблюдаемой частицы.

В XVIII веке знаменитый математик Леонард Эйлер занимался изучением свойств функций, которые сам же и придумывал. Одна из таких функций получила название бета-функции Эйлера. Выглядит она так:

$$B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt.$$

Эйлер описал свойства функции, и, не найдя практического применения, на два века бета-функция была забыта. В 1968 году молодой физик Габриэль Венециано, работающий в швейцарском ЦЕРНе, случайно обнаружил, что все свойства частиц, участвующих в ядерном взаимодействии, можно описать с помощью бета-функции Эйлера. Формула отлично работала для описания взаимодействий частиц, но никто не понимал почему. У формулы Эйлера физического смысла не было — просто переменные, при присваивании которым определенных значений получался результат, согласующийся с экспериментом. Через два года такой смысл был найден: физики обнаружили, что если заменить элементарные частицы колеблющимися одномерными (толщина такой струны, по сравнению с длиной, бесконечно мала) струнами, то взаимодействие таких струн как раз и представляется в виде формулы Эйлера.

Струны — это самые маленькие объекты во Вселенной. Они настолько малы, что даже если их можно было бы увидеть с помощью самого мощного ускорителя частиц, то они выглядели бы точечными объектами. Если кварк можно представить себе как крохотный шарик, то струна напоминает крохотную тонкую ниточку.

Чтобы доказать, что струны существуют, физикам потребуется создать мощный ускоритель. Если теория струн верно объединила гравитацию и квантовую теорию, то она, возможно, представляет собой величайшее достижение науки за последние 2000 лет — с того самого момента, когда греки впервые задались вопросом «что есть вещество?». Но у теории суперструн есть одна очень странная особенность: эти самые струны могут колебаться только в пространстве-времени определенной размерности, а именно в десятимерном. Таким образом, если стоя-



Рис. 34.9. Вещество состоит из атомов, которые, в свою очередь, состоят из кварков и электронов. Согласно теории струн все такие частицы в действительности представляют собой крошечные петли вибрирующих струн

чую волну в гитарной струне представить себе наглядно достаточно просто, то стоячие волны, предлагаемые теорией суперструн, наглядному представлению поддаются с трудом. Если попытаться сформулировать теорию струн для другого числа измерений, ничего не выйдет; математический аппарат просто развалится. Сколько вселенных предсказывает теория струн? Довольно неприятной чертой теории струн является как раз тот факт, что вселенных может быть множество — многие триллионы вселенных, каждая из которых вполне согласуется с теорией относительности и квантовой теорией. Согласно одной из оценок может существовать целый гугол таких вселенных (гугол — это единица со ста нулями).

У теории струн есть конкуренты, и она является всего лишь гипотезой. Прошло много лет, но никакого эксперимента, подтверждающего теорию струн, нет. Может быть, эта причудливая теория так и останется игрой ума талантливых физиков. Возможно, когда-нибудь ее удастся подтвердить или опровергнуть, но для этого эту теорию нужно хорошо изучить. Либо найти ей замену, которую можно будет подтвердить. Удастся ли это? Лауреат Нобелевской премии 2004 года Дэвид Гросс считает: «Теория струн многое обещает нам в будущем. ...Шесть лет назад я смотрел в будущее менее оптимистично и говорил, что успеха теории струн придется ждать до следующего тысячелетия. Сегодня я более оптимистичен: я верю, что лет через двести теорию струн будут преподавать в высшей школе».

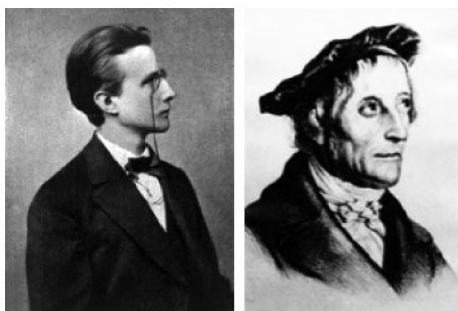


Рис. 34.10. Студент Макс Планк
и профессор Жоли
(«Семь искусств», 11(47), ноябрь 2013)

Физика стоит на пороге новых открытий. Ошибкой было бы считать, как это происходило на рубеже двух прошлых эпох, что физика завершилась. Часто приводят ставший хрестоматийным рассказ о том, как осенью 1874 года начинающий студент Макс Планк пришел к профессору Филиппу Жолли (1809–1884), руководившему отделением физики Мюнхенского университета, с просьбой записать его в число слушателей лекций по теоретической физике. Маститый ученый попытался отговорить юношу: «Молодой человек! Зачем вы хотите испор-

тить себе жизнь, ведь физика как наука в основном завершена. Осталось прояснить несколько несущественных неясных мест. Стоит ли браться за такое бесперспективное дело?!» Сейчас мы знаем, что именно за этими «несколькими неясными, несущественными местами» и скрывалось самое удивительное, из чего развились впоследствии две знаменитые теории.

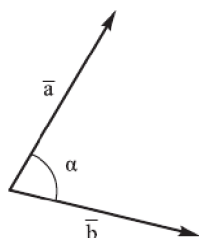
Прошлое науки внушает оптимизм. Эйнштейн как-то заметил: «Самое удивительное в природе — это то, что мы можем ее понять».

И все же, как бы далеко ни продвинулись наши знания, они всегда будут представлять лишь островок в бесконечном океане непознанного человеком. Со временем островок растет, хотя всегда остается бесконечно малым в сравнении с океаном незнания. И будущие энтузиасты науки будут увеличивать площадь этого островка. Закончу я эту книгу стихотворением немецкого поэта

Ф. Шиллера, которое В. Гейзенберг любил цитировать на склоне лет:

*Меры мира нам даны:
Бесконечен путь длины —
Чужд ей отдых и граница,
Вечно ширина струится,
И бездонна глубина.
Если можешь, будь таким:
Вечно будь неутомим;
Завершить любое дело,
Лишь не ведая предела.
Пусть поможет ширина
Мир тебе узреть сполна;
А в глубинах мирозданья
Обретишь ты суть познания.
Лишь в упорстве твой успех.
Ясность — в широте таится,
В безднах — истина гнездится*
(пер. Л. Эткинды).

Математическое дополнение

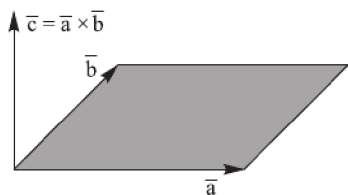


Скалярным произведением двух векторов **a** и **b** будет скалярная величина, равная произведению модулей этих векторов, умноженному на косинус угла между ними:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \cos \alpha.$$

Алгебраическая интерпретация. Скалярным произведением двух векторов **a** и **b** будет скалярная величина, равная сумме попарного произведения координат векторов **a** и **b**.

В случае плоской задачи скалярное произведение векторов $\mathbf{a} = \{a_x; a_y\}$ и $\mathbf{b} = \{b_x; b_y\}$ можно найти, воспользовавшись следующей формулой: $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_x \cdot b_x + a_y \cdot b_y$. В случае пространственной задачи скалярное произведение векторов $\mathbf{a} = \{a_x; a_y; a_z\}$ и $\mathbf{b} = \{b_x; b_y; b_z\}$ можно найти по следующей формуле: $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_x \cdot b_x + a_y \cdot b_y + a_z \cdot b_z$.



Векторным произведением вектора **a** и вектора **b** называется вектор **c**, длина которого численно равна площади параллелограмма, построенного на векторах **a** и **b**, перпендикулярный к плоскости этих векторов и направленный так, чтобы наименьшее вращение от **a** к **b** вокруг вектора **c** осуществлялось против часовой стрелки,

если смотреть с конца вектора **c**. Обозначается векторное произведение так: $\mathbf{c} = [\mathbf{ab}] = [\mathbf{a}, \mathbf{b}] = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$.

Формулы вычисления векторного произведения векторов. Векторное произведение двух векторов $\mathbf{a} = \{a_x; a_y; a_z\}$ и $\mathbf{b} = \{b_x; b_y; b_z\}$ в декартовой системе координат — это вектор, значение которого можно вычислить, используя следующую формулу: $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \{a_y b_z - a_z b_y; a_z b_x - a_x b_z; a_x b_y - a_y b_x\}$.

Геометрический смысл векторного произведения: модуль векторного произведения **c** двух векторов **a** и **b** равен площади параллелограмма, построенного на этих векторах: $c = |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \sin \alpha$ (α — угол между векторами **a** и **b**).

Экспоненциальная функция. Экспонентой называется функция $y = e^x$, где e — число, которое примерно равно 2,72. Эта функция обладает замечательным свойством: ее производная равна ей самой. То есть если расстояние, которое проходит снежный ком, зависит от времени как экспонента, то и его скорость выражается той же самой экспонентой. Это свойство очень помогает математикам решать разные дифференциальные уравнения.

У экспоненциально протекающих процессов есть одно общее свойство: за одинаковый интервал времени их параметры меняются одинаковое число раз. Банковский вклад каждый год увеличивается на 7 %, снежный ком за минуту

увеличивается в три раза, а количество урана-235 на атомных электростанциях уменьшается вдвое каждые 700 миллионов лет. Экспоненциальные функции окружают нас повсюду. Экспоненциально развиваются явления, в которых присутствует обратная связь, когда результат влияет на скорость процесса. В случае со снежным комом обратная связь положительная: чем больше результат, тем быстрее протекает процесс. А масса и скорость снежного кома экспоненциально возрастают со временем. Аналогично ведут себя деньги в банке при фиксированной процентной ставке. Чем больше денег, тем больше ежегодный прирост. Так же увеличивается численность животных при отсутствии внешних угроз: чем больше популяция, тем больше размножающихся особей, тем быстрее численность животных увеличивается.

Физика — наука, в которой наблюдения играют часто первейшую роль. А там, где наблюдение — измерение, там и сопутствующие им случайные ошибки.

В большинстве случаев, встречающихся на практике, ошибки измерений могут быть представлены как суммы весьма большого числа сравнительно малых слагаемых — элементарных ошибок, каждая из которых вызвана действием отдельной причины, не зависящей от остальных. Каким бы законам распределения ни были подчинены отдельные элементарные ошибки, особенности этих распределений в сумме большого числа слагаемых нивелируются, и сумма оказывается подчиненной закону, близкому к так называемому нормальному. Именно потому, что описанная ситуация встречается в природе наиболее часто, произошло одно из названий этого закона. Другое его название — распределение Гаусса — обязано имени великого математика, открывшего этот закон. Основное ограничение, налагаемое на суммируемые ошибки, состоит в том, чтобы они все равномерно играли в общей сумме относительно малую роль. Если это условие не выполняется и, например, одна из случайных ошибок окажется по своему влиянию на сумму резко превалирующей над всеми другими, то закон распределения этой превалирующей ошибки наложит свое влияние на сумму и определит в основных чертах ее закон распределения. Математически формула для плотности вероятности распределения случайной величины, определяемая экспонентой, на первый взгляд весьма похожа на распределение Максвелла (что не удивительно).

На рисунке показан график нормального распределения, где по оси абсцисс отложена самая главная величина распределения — стандартное отклонение — сигма, а по оси ординат — вероятности (вероятность того, что истинное значение

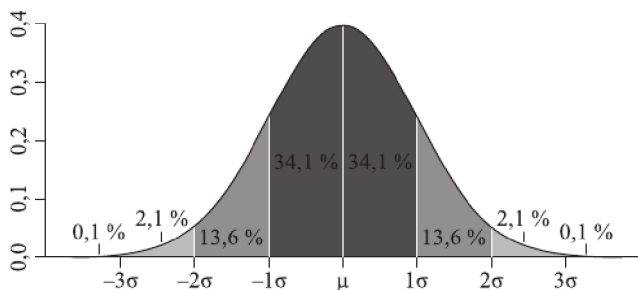


График нормального распределения (en.wikipedia.org)

попадет в определенный интервал около измеренного среднего значения при нормальном распределении ошибок). Сигмой (σ) в статистическом анализе обозначают стандартное отклонение. Расчет сигма простой и описан в любом курсе теории вероятностей. Можно сказать, что стандартное отклонение — это та погрешность (то « \pm сколько-то»), которая обязательно сопровождает измерение величины. Если, например, мы измерили температуру и получили результат 100 ± 5 градусов, то величина «100 градусов» отличается от измеренного результата на два стандартных отклонения, то есть на 2 сигмы, величина «50 градусов» отличается на 10 стандартных отклонений (на 10 сигм).

Нормальное распределение играет важную роль во многих областях науки.

Оглавление

Предисловие.....	3
------------------	---

ВВЕДЕНИЕ.....	4
---------------	---

В НАЧАЛЕ ПУТИ. Физики как науки еще нет, но люди накапливают знания о природе. Они задают природе «детские» вопросы, которые касаются принципиальных основ мироздания. Идет время, появляются ученые, сделавшие открытия, заложившие фундамент будущих исследований, без которого не могла бы появиться современная физика.

1. <i>Природа глазами древних людей. Пробуждение любознательности. Вселенная древних. Как измеряли время, расстояния и вес наши древние предки. Наука «плоской Земли». Есть ли предел делению веществ? Система мира Аристотеля. Архимед. Простые механизмы не такие простые. «Золотое правило» механики. «Эврика!» Взгляды древних греков на Вселенную и Землю. Смелое предположение. Эратосфен измеряет Землю</i>	6
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

ВРЕМЯ ВЕЛИКОГО ПРОРЫВА. Наука «круглой Земли». Открыты законы движения планет. Галилей объясняет наблюдаемые факты, борясь с вековыми заблуждениями. Астрономические открытия Галилея поражают воображение людей. Наука на пороге создания классической физики.

2. <i>Космология Средних веков. Система мира Птолемея. «Сдвинувший» Землю: гелиоцентрическая система Коперника. Законы Кеплера.....</i>	25
3. <i>Галилей — «отец современной физики». Астрономические открытия Галилея. Физика колебаний маятника. «Гениальнейший часовой мастер всех времен».....</i>	36
4. <i>Свободное падение тел и здравый смысл. Эксперименты Галилея с наклонной плоскостью. Движение тела, брошенного под углом к горизонту. «Диалоги». Принцип инерции Галилея</i>	42

ПО ДОРОГАМ КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. Факел, зажженный Галилеем, — в руках Ньютона. Ученый закладывает фундамент механики и объясняет законы движения планет. Наконец получен ответ на вопрос: «Почему Луна не падает на Землю?». Формируется математический аппарат классической физики и на его основе создается описание разнообразных механических движений. Принципы динамики, маятник, тяготение — вот стержневые вопросы физики XVII века, к которым присоединилась еще проблема взаимодействия тел, и в первую очередь теория удара.

5. «...И вот явился Ньютон». Механика Ньютона. Математический инструмент классической физики. Равномерное движение по окружности	50
6. Невидимая рука гравитации. Закон всемирного тяготения. Ускорение силы тяжести: теория подтвердила опыт. Два лика силы тяжести. Вывод закона Кеплера из закона Всемирного тяготения.. Наведение порядка «на небесах»	62
7. Понятие силы: от древних греков до Ньютона. Без силы нет работы. Работа сил упругости. Ни шагу без трения. Работа сил трения. Работа силы тяжести. Трудноопределимое понятие. Два вида механической энергии.....	71
8. Великий закон природы — закон сохранения энергии. Закон сохранения импульса в упругих столкновениях. Бильярд и законы классической физики. Неупругие соударения. Частично упругие соударения. Симметрия и законы физики.....	78

КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА В ДЕЙСТВИИ. Широкое использование методов классической механики Ньютона: от газов до твердых тел. Получены ответы на вопросы: почему вода в насосах колодезников не поднимается выше 10 метров?, отчего не тонут тяжелые суда? Найдены удобные способы измерения температуры.

9. Истоки гидростатики. Закон Паскаля. Давление в жидкостях и газах. Условия плавания тел. Непростые истории с атмосферным давлением. Опыты Торричелли и Герике. Интересные эффекты: поверхностное натяжение, капиллярность	90
10. Жидкость течет по-разному. Основное уравнение течения жидкости. Уравнение Бернулли. Закон Торричелли. Измерение давления в движущейся жидкости. Вязкое течение жидкости. Турбулентность.....	110
11. Макроскопическое описание газа. Путешествие по температурной шкале. Газовый термометр. Газовые законы. Закон Клайперона. Давление смеси газов	120

ЗА ПРЕДЕЛАМИ ВИДИМОГО МИРА. Успешные попытки ответить на вопрос: из чего состоит вещество? Полученные оценки размеров молекул и их число поражают воображение. Ученые поняли процессы кипения жидкости и объяснили механизм распространения запаха. Долгая история теплоты нашла свое объяснение. Невозможность «вечного двигателя». Абсолютный нуль температуры оказывается недостижимым.

12. Физики выходят за пределы непосредственных восприятий. Молекулярное строение вещества. Закон Авогадро. Закон Клайперона–Менделеева. Какой размер у молекул. Законы идеального газа. Температура с точки зрения молекулярно-кинетической теории (МКТ). Ба-	
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

рометрическая формула и определение числа Авогадро. Распределение Максвелла. Экспериментальная проверка распределения Максвелла (опыт Штерна). Средняя длина пробега молекул в газе. Эффективное сечение столкновений. Диффузия. Испарение, кипение жидкости и поверхностное натяжение с точки зрения МКТ. Реальные газы	130
13. Такая непростая теплота. Опыты Румфорда и Дэви. Эксперименты Джоуля. Что такое энергия? Внутренняя энергия идеального газа. Теплоемкость. Калориметрия. Фазовые переходы. Способы передачи теплоты. Тепловое расширение.....	151
14. Наука о превращениях всех форм энергии. Термодинамические системы. Законы (начала) термодинамики. Первое начало и невозможность вечного двигателя. Адиабатический процесс. Второе начало термодинамики. Принцип работы теплового двигателя. Цикл Карно. «Балансовый отчет» энергии. Энтропия. Недостижимость абсолютного нуля температуры.....	168
В МИРЕ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН. Физики разрабатывают одну из важнейших областей физики — теорию колебаний. Оказалось, что колебательные явления различной физической природы подчиняются общим закономерностям. Такие разные волны объединяются в общей теории.	
15. В мире колебаний. Простые колебательные системы. Уравнение колебаний гармонического осциллятора. Маятник Фуко. Энергия гармонического осциллятора. Математический маятник. Сложение гармонических колебаний. Затухающие колебания. Резонанс в колебательных системах.....	185
16. Волны вокруг нас. Уравнение бегущей волны. Волновые эффекты. Законы отражения и преломления волн. Интерференция. Дифракция. Стоячие волны. Резонанс. Звуковые волны. Скорость звука. Частотный диапазон звуковых волн. Волновые эффекты звуковых волн. Эффект Доплера.....	197
САМОЕ «ТЕМНОЕ» МЕСТО В ФИЗИКЕ. Удивительная область физики — свет. Скорость света огромна, но не бесконечна. Очевидные явления и неочевидные объяснения. Среди физиков нет согласия. Широкое распространение различных оптических приборов. Человек изучает состав звездного вещества на Земле.	
17. Свет — самое «темное» место в физике. Световые лучи. Определение скорости света. Законы Снелла. Явление полного внутреннего отражения. Что увидели физики в зеркалах.....	220
18. Конкурирующие теории света. Дисперсия. Дифракция. Принцип Гюйгенса. Интерференция. Опыт Юнга. Интерференция в тонких пленках. Кольца Ньютона. Дифракция на одной щели. Дифракционная решетка. Спектроскопия. Поляризация. Двойное лучепреломление. Почему небо голубое?.....	241

В НЕОБЪЯТНОМ МИРЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА. Сказка, которой не сыщется и среди сказок «Тысячи и одной ночи». Долгая история электричества. Гениальные прозрения и воплощение результатов теории в практику.

19. *Долгая история электричества. Электроскоп. Закон Кулона. Электрическое поле. Проводники в электрическом поле. Движение заряженной частицы в электрическом поле. Потенциал. Эквипотенциальные поверхности. Электрическое поле Земли.....*260
20. *Открытие, преобразовавшее цивилизацию. Гальванический элемент. Сила тока. Закон Ома. Удельное электрическое сопротивление. Сверхпроводимость. Микроскопическая картина электропроводности. Сторонние силы. ЭДС. Опыт Толмена. Тепловое действие тока. Закон Джоуля–Ленца. Термоэлектронная эмиссия*279
21. *Электрическая цепь и ее элементы. Источник напряжения в цепи постоянного тока. Эквивалентное сопротивление цепи при различных соединениях резисторов. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов. RC-цепочка. Измерительные приборы в цепях постоянного тока*293
22. *История в три тысячи лет. Свойства постоянных магнитов. Вектор магнитной индукции. Магнитное поле тока. Проводник с током в магнитном поле. Закон Ампера. Ферромагнетизм. Магнитное поле Земли. Движение электрического заряда в магнитном поле. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Масс-спектрометр. Циклотрон*303
23. *А может ли электрическое поле создавать ток? Фарадей открывает явление электромагнитной индукции. ЭДС индукции. Правило Ленца. Электрогенератор и электродвигатель. Вихревое электрическое поле.....*323
24. *Важный элемент электрической цепи — индуктивность. Индуктивность цилиндрической катушки. Магнитная проницаемость. Ток в цепи при наличии индуктивности. Энергия магнитного поля. Трансформатор. Электрические цепи, содержащие активные и реактивные элементы. RL-цепочка. Формула Томсона. RLC-контур. «Война токов».....*334
25. *Переменный ток. Резистор, индуктивность и емкость в цепи переменного тока. Мощность тока. Резонанс в цепях переменного тока.....*347
26. *Связавший два вида полей. Ток смещения. Уравнения Максвелла. Электромагнитные волны. опыты Герца. Шкала электромагнитных волн. Свет как электромагнитная волна.....*357

НЕВИДИМЫЙ МИР ФИЗИКИ. Вторжение в невидимый мир. Первые сомнения. На краю катастрофы. Внутренний мир атомов. По ту сторону кванта. Реализованная мечта алхимиков. В рое элементарных частиц. Ядерный синтез — путь к «энергетическому Эльдorado».

27. *Электрические явления в газах: катодные лучи. Элементарный электрический заряд. Опыты Фарадея. Открытие электрона. Опыты Дж. Дж. Томсона. Открытие рентгеновских лучей. Радиоактивность. Первые модели атома. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома* 369

НОВЫЕ ПУТИ ФИЗИКИ

28. *Факт, не дававший покоя физикам. Спектр излучения абсолютно черного тела. «Ультрафиолетовая катастрофа». Угаданный закон. Атом Бора. Эксперименты Франка–Герца. «Сумасшедшая теория». Квантовые числа. Фотоэффект. Эффект Комптона. Фотонная теория света* 388
29. *Кризис в атомной физике. Новая наука и новые взгляды. Волны де Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм. Волновая функция и ее интерпретация. Дифракция электронов на двух щелях. Принцип неопределенности. Странности квантового мира. Принцип запрета Паули. Системы с большим числом атомов. Квантовая механика твердого тела. Зонная теория полупроводников. Транзистор* 401
30. *Опыты Резерфорда и атомное ядро. Первая ядерная реакция. Протон. Обнаружение нейтрона. Протон-нейтронная модель ядра. Энергия связи. Ядерные силы. Дефект масс. Закон радиоактивного распада. Альфа-, бета- и гамма-распады. Радиоактивные ряды. Радиоактивное датирование. Искусственная радиоактивность. Ядерные реакции. Деление ядер. Цепная реакция. Капельная модель. Атомный реактор. Ядерный синтез. «Посуда» для плазмы* 428
31. *Всепроникающая частица. Камера Вильсона. Как «положительный электрон» стал позитроном. Обитатели микромира. Космические лучи и элементарные частицы. В погоне за частицами. Ускорители больших энергий и физика элементарных частиц. Левиафаны в мире ускорителей. Попытки классификации элементарных частиц* 457

НОВЫЕ ПУТИ ДРЕВНЕЙ НАУКИ. Новый век — новые взгляды. Все относительно. Как теперь смотреть на время? Объяснение необъяснимого: взгляд на гравитацию Эйнштейна. Чудеса новых теорий. Странности квантового мира. Эволюция Вселенной.

32. *А всегда ли прав Ньютон? «Год чудес». Опыт Майкельсона–Морли. Лоренцово сокращение. Абсолютное время Ньютона и время в СТО. Преобразования Лоренца. Парадокс близнецов. В перекрестиях пространства и времени. Чем быстрее, тем тяжелее. mc^2 — что это?* 466
33. *«Вездесущее дыхание Господне». Путь Эйнштейна к созданию ОТО. Геометрическая теория тяготения. Черные дыры. Красное смещение. Нестационарная Вселенная. Большой взрыв. Обнаружение реликтового излучения. Рождение и гибель Вселенной. Почему небо темное? Парадоксы времени в ОТО. Эффект Мёссбауэра и ОТО. Гравитационные волны* 480

ОГЛЯДЫВАЯ ПРОЙДЕННЫЙ ПУТЬ. Новая физика и крушение здравого смысла. Еще остаются вопросы.

34. *«Абсолютного покоя нет!» Парадоксальные свойства эфира в классической физике. Борьба за эфир. Аргументы противников квантовой механики. Борьба против ОТО. В петле здравого смысла. Роль математики в современной физике. «Там, внизу полным-полно места». «Теория всего»*510

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ДОПОЛНЕНИЕ532

Кессельман Владимир Самуилович

ВСЯ ФИЗИКА В ОДНОЙ КНИГЕ

**ОТ ПЛОСКОЙ ЗЕМЛИ
ДО БОЛЬШОГО ВЗРЫВА**

Дизайнер А. А. Гурьянова

Технический редактор А. В. Бакиев

Компьютерный набор и верстка А. И. Ереметовой

Корректор Е. В. Огородникова

Подписано в печать 28.09.2016. Формат 70×100¹/₁₆.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 43,54. Уч.-изд. л. 45,89.
Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная № 1. Заказ № 16-52.

АНО «Ижевский институт компьютерных исследований»
426034, г. Ижевск, ул. Кооперативная, д. 5.
E-mail: mail@rcd.ru Тел./факс: +7 (3412) 50-02-95
