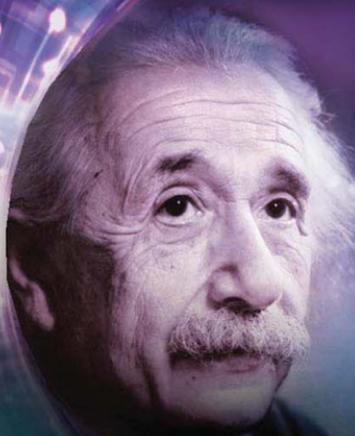
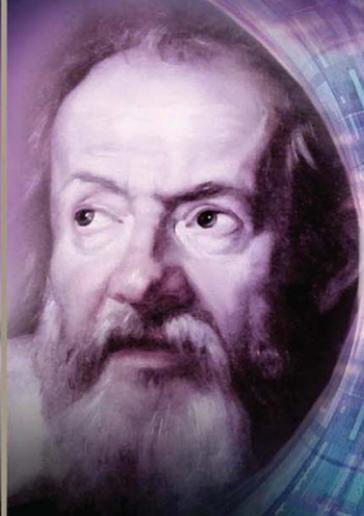


ГЕОРГИЙ ГАМОВ

ВЕЛИКИЕ ФИЗИКИ

ОТ ГАЛИЛЕО
ДО ЭЙНШТЕЙНА

КАК БЫЛИ СДЕЛАНЫ САМЫЕ ЗНАЧИМЫЕ
НАУЧНЫЕ ОТКРЫТИЯ



ВЕЛИКИЕ ФИЗИКИ

GEORGE GAMOW

THE GREAT PHYSICISTS

FROM GALILEO
TO EINSTEIN

ГЕОРГИЙ ГАМОВ

ВЕЛИКИЕ ФИЗИКИ

ОТ ГАЛИЛЕО
ДО ЭЙНШТЕЙНА

КАК БЫЛИ СДЕЛАНЫ САМЫЕ ЗНАЧИМЫЕ
НАУЧНЫЕ ОТКРЫТИЯ



Москва
ЦЕНТРОЛИГРАФ

УДК 53(091)
ББК 22.3
Г18



Охраняется законодательством РФ
о защите авторских прав.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
воспрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке

*Оформление художника
Е.Ю. Шурлаповой*

Гамов Георгий
Г18 Великие физики от Галилео до Эйнштейна. Как были
сделаны самые значимые научные открытия / Пер. с
англ. Л.А. Игоревского. — М.: Центрполиграф, 2021. —
383 с.

ISBN 978-5-9524-5582-5

Георгий Гамов — физик с мировым именем, блестящий популяризатор науки, на страницах своей книги освещает эволюцию научных представлений от Античности до середины XX века. Автор знакомит читателя с открытиями Архимеда, Кеплера, Галилея и других великих ученых прошлого, наглядно воспроизводит эксперименты Исаака Ньютона и Майкла Фарадея, живым и доступным языком объясняет явления квантовой механики, принципы атомной и ядерной физики, теорию элементарных частиц. Освещая научные открытия XX века, Георгий Гамов делится личными воспоминаниями об Эрнесте Резерфорде, Альберте Эйнштейне, Нильсе Боре и других гениальных физиках, с которыми ему довелось работать и совершать научные открытия.

Книга проиллюстрирована чертежами и рисунками автора.

**УДК 53(091)
ББК 22.3**

ISBN 978-5-9524-5582-5

© Перевод, ЗАО
«Центрполиграф», 2021
© Художественное оформление,
ЗАО «Центрполиграф», 2021

ВЕЛИКИЕ ФИЗИКИ

ОТ ГАЛИЛЕО
ДО ЭЙНШТЕЙНА

Предисловие

Существует два типа книг о физике. Один из них — это учебники, нацеленные на то, чтобы познакомить читателя с фактами и физическими теориями. В таких книгах обычно опущены все исторические аспекты развития науки и единственная информация, касающаяся великих ученых прошлого и настоящего, ограничена годами рождения и смерти (или «—»), указанными в скобках после имени. Книги другого типа носят по большей части исторический характер и посвящены биографическим данным и анализу личности великих ученых и просто перечисляют их открытия, подразумевая, что читатель знаком с самой наукой.

В данной книге я попытался придерживаться золотой середины, обсуждая в равной степени как судебный процесс Галилея, так и открытые им законы механики или делясь личными воспоминаниями о Нильсе Боре вместе с подробным обсуждением его атомной модели. В центре повествования каждой из восьми глав находится одна, максимум две великие личности, а другие физики этого времени и их вклад в науку упоминаются в основном в фоновом режиме. Это объясняет отсутствие множества имен, которые можно встретить в большинстве книг о физике, а также отсутствие многих тем, «обязательных» для обычных учебников физики. Цель этой книги в том, чтобы дать читателю почувствовать, *что такое физика и кто такие физики*, и, таким образом, заинтересовать его настоль-

ко, чтобы он продолжил изучение физики более систематически.

Когда читаешь о великих людях прошлого или настоящего, всегда хочется узнать, как они выглядели или выглядят, поэтому решил поместить портреты физиков. Не будучи художником, я использовал определенные вспомогательные устройства, такие как проектор фотоснимков на рисовальную бумагу, и в результате добился достаточного сходства.

Надеюсь, что эта книга придаст читателям импульс к изучению физики; в этом ее главная цель.

Глава 1

ЗАРОЖДЕНИЕ ФИЗИКИ

Проследить происхождение физической науки очень трудно, так же трудно, как определить истоки многих великих рек. Несколько крошечных родников, журчащих под зеленой сенью тропической растительности или вытекающих из-под покрытых мхом камней в пустынном северном краю; несколько маленьких ручейков, весело сбегających по склонам гор и сливающихся в речушки, которые, в свою очередь, формируют при слиянии поток достаточно большой, чтобы именоваться рекой. Эти реки становятся шире и шире, пополняясь за счет многочисленных притоков, и в конце концов разрастаются в могучие потоки — будь то Миссисипи, Волга, Нил или Амазонка, — несущие свои воды в океан.

В физической науке такие родники, дающие жизнь великим рекам, разбросаны по поверхности земли, где обитает *Homo sapiens*, то есть человек разумный. Однако, судя по всему, они в большинстве своем сосредоточены на южной оконечности Балканского полуострова, который был населен людьми, известными нам как древние греки. По меньшей мере, так кажется нам — тем, кто унаследовал культуру этих ранних интеллектуалов. Интересно заметить, что если другие древние нации, такие как вавилоняне или египтяне, внесли значительный вклад в развитие математики и астрономии, то они не сделали почти ничего для развития физики. Возможное объяснение этого упущения по сравнению с греческой наукой состоит в том, что боги вавилонян и египтян жили высоко среди звезд, тогда как боги древних греков обитали на высоте примерно 10 000 футов на вершине горы

Олимп и, таким образом, были гораздо ближе к земным проблемам. Согласно легенде, термин «магнетизм» произошел от имени греческого пастуха Μάγνης, которого удивило, что конец его окованного железом посоха притягивался к лежащему у дороги камню (куску магнитной железной руды). Аналогичным образом термин «электричество» произошел от греческого слова ἤλεκτρον, обозначающего янтарь, возможно, потому, что какие-то греческие пастухи, пытаясь отполировать куски янтаря, натирали его об овечью шкуру и заметили, что он приобретает загадочное свойство притягивать кусочки дерева.

Пифагорейский закон струн

Если эти легендарные открытия едва ли смогли бы отстоять свой приоритет в судебном разбирательстве, то открытие греческого философа Пифагора, жившего в середине VI века до н. э., хорошо документировано. Убежденный в том, что миром правит число, Пифагор изучал отношения между длинами струн музыкальных инструментов, порождающих гармоничные сочетания звуков. Для этой цели он использовал так называемый монохорд, то есть инструмент с одной струной, которую можно поделить на две с переменными длинами и подвергать различному натяжению с помощью подвесного груза. Используя один и тот же вес и меняя длину струны, он обнаружил, что пары гармоничных звуков получаются в том случае, когда отношения длин струн являются отношениями натуральных чисел. Так, отношение длин 2:1 соответствует тому, что известно как октава, отношение 3:2 — квинта, а отношение 4:3 — кварта. Это открытие, вероятно, стало первой математической формулой, описывающей закон физики, и может также рассматриваться как первый шаг в развитии того, что мы называем теоретической физикой. В современной физической терминологии мы можем переформулировать открытие Пифагора, говоря, что *частота* данной струны — то есть число ее колебаний в секунду — при заданном воздействии обратно пропорциональна ее длине.

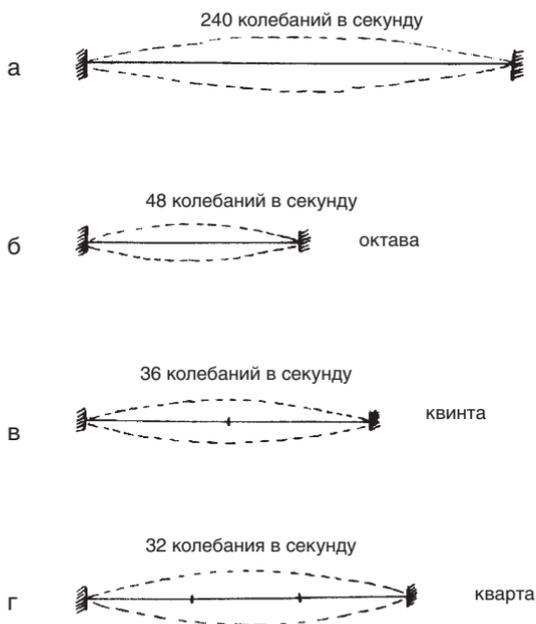


Рис. 1.1. Пифагорейский закон струн

Таким образом, если длина второй струны (рис. 1.1, б) вдвое меньше длины первой (рис. 1.1, а), то частота ее вибраций будет вдвое выше. Если отношение длин двух струн равняется 3:2 или 4:3, то частоты их вибраций находятся в отношении 2:3 или 3:4 (рис. 1.1, в и г). Поскольку часть человеческого мозга, которая получает нервные сигналы от уха, устроена так, что натуральные отношения частот, например 3:4, воспринимаются как «приятные», а более сложные, например 137:171, — как «неприятные» (психологам будущего еще предстоит объяснить этот факт!), длины струн, дающих идеальный аккорд, должны соотноситься между собой как натуральные числа.

Пифагор попытался пройти на шаг дальше, предположив, что, поскольку движение планет «должно быть гармоничным», их расстояния от Земли должны иметь те же соотношения, что и длины струн (при одинаковом воздействии), дающих семь базовых тонов лиры — греческо-

го национального музыкального инструмента. Это предположение, вероятно, является первым примером того, что теперь часто называют патологической теорией* в физике.

Демокрит, атомистическая теория

Другая важная физическая теория, которую в современной терминологии можно было бы называть «теорией без экспериментального обоснования», но которая оказалась «видением, ставшим реальностью», была предложена еще одним древнегреческим философом, Демокритом, жившим около 400 года до н. э. Демокрит полагал, что все материальные тела состоят из бесчисленного множества частиц, настолько маленьких, что их невозможно разглядеть человеческим глазом. Эти частицы он назвал *атомами*, по-гречески неделимые (*ἄτομος*), потому что считал, что они представляют собой конечную стадию деления материальных тел на все более мелкие части. По его мнению, существовало четыре вида атомов: атомы камня сухие и тяжелые; атомы воды тяжелые и мокрые; атомы воздуха холодные и легкие; и атомы огня ускользающие и горячие. Предполагалось, что все известные вещества состоят из атомов этих четырех видов. Растение, выросшее из земли под действием солнечных лучей, состоит из атомов камня и воды, которые оно берет из почвы, и атомов огня, полученных от солнца. Поэтому сухие куски дерева, утратившие все атомы воды, будут гореть, высвобождая атомы огня (пламя) и оставляя после себя атомы камня (пепел). Если определенные виды камня (железную руду) поместить в огонь, атомы камня, соединившись с атомами огня, дадут вещества, известные как металлы. Дешевые металлы, такие как железо, содержат очень мало атомов огня и поэтому выглядят не слишком красиво. Золото содержит максималь-

* Патологическая теория — это область исследований, в которой ученые обманываются, давая ложные результаты, обусловленные принятием желаемого за действительное.

ное количество атомов огня и потому красиво блестит и высоко ценится. Следовательно, если бы удалось к простому железу добавить больше атомов огня, то можно было бы получить драгоценное золото!

Студент, рассказавший все это на вступительном экзамене по химии, получил бы двойку. Но несмотря на то что эти примеры химических превращений определенно ошибочны, фундаментальная идея о получении почти неограниченного количества различных веществ с помощью комбинации всего нескольких базовых химических элементов была, несомненно, верной и по сей день является основанием современной химии. Однако понадобилось двадцать два века со времени Демокрита до времени Дальтона, чтобы представить ее правильно.

Философия Аристотеля

Одним из гигантов древнегреческого мира был человек по имени Аристотель, который стал знаменит по двум причинам: во-первых, потому, что он действительно был гением; во-вторых, потому, что он был воспитателем, а позднее протеже Александра Македонского. Он родился в 384 году до н. э. в греческом городе-колонии Стагира на Эгейском море. Его отец был придворным врачом царствующего семейства Македонии. В возрасте 17 лет Аристотель уехал в Афины, где присоединился к философской школе Платона и оставался его ревностным учеником до самой смерти Платона в 347 году до н. э. После этого он много путешествовал, пока наконец не вернулся в Афины, где основал философскую школу, известную как Перипатетическая, располагавшуюся в Ликее*. Основную часть дошедших до наших дней работ Аристотеля составляют трактаты, вероятно являющиеся текстами лекций по различным областям науки, которые он читал в Ликее. Среди них есть трактаты по логике и философии, которые он создал, трактаты по

* Название Ликей происходит от названия гимназия, расположенного около храма Аполлона Ликейского.

политической науке и различным вопросам биологии, в особенности по классификации растений и животных. Но хотя и здесь он внес огромную лепту, влиявшую на человеческую мысль в течение двух тысяч лет после его смерти, вероятно, наиболее важным стал его вклад в области физики, само название которой было придумано им от греческого слова φύσις, что означает *природа*. Упущения Аристотелевой философии в отношении физических явлений следует приписать тому факту, что великий ум Аристотеля, как было и со многими другими древнегреческими философами, не имел склонности к математике. Его идеи относительно движения земных предметов и небесных тел, вероятно, принесли развитию науки больше вреда, чем пользы. Во времена возрождения научного мышления в эпоху Ренессанса таким людям, как Галилей, пришлось бороться, чтобы сбросить ярмо Аристотелевой философии, которая повсеместно считалась последним словом в области знаний и делала совершенно ненужными дальнейшие исследования природы вещей.

Рычаг Архимеда

Другим великим греком древнего периода, жившим примерно век спустя после Аристотеля, был Архимед (рис. 1.2) — отец науки механики. Он жил в Сиракузах, столице греческой колонии на острове Сицилия. Будучи сыном астронома, он рано начал проявлять интерес и способности к математике и за свою жизнь добился целого ряда очень важных достижений в разных областях этой науки. Самой важной из его работ в области чистой математики стало открытие отношения между площадью поверхности и объемом сферы и описывающего ее цилиндра. Согласно желанию Архимеда на его могиле была установлена сфера, вписанная в цилиндр. В книге под названием Ψαμμίτης («Псаммит») (исчисление песчинок) он предложил метод записи очень больших чисел с помощью приписывания каждой цифре в записи порядка, соответствующего ее позиции (этот метод используется в наши дни в



Рис. 1.2. Архимед и корона

десятеричной системе, то есть столько-то единиц, столько-то десятков, столько-то сотен, столько-то тысяч и т. д.), и применил его к задаче подсчета числа песчинок, содержащихся в сфере размером с Землю.

В своей знаменитой книге «О равновесии плоскостей» (в двух томах) Архимед разработал законы рычага и обсудил задачу нахождения центра тяжести любого заданного тела. Современному читателю стиль Архимеда покажется довольно тяжелым и многословным, во многих

отношениях напомиающим стиль книг Евклида по геометрии.

На самом деле во времена Архимеда греческие математики занимались почти исключительно геометрией. Алгебра была изобретена арабами гораздо позже. Таким образом, доказательства в области механики и других ветвей физики делались скорее с помощью рассмотрения геометрических фигур, чем с использованием алгебраических уравнений, как делаем мы сегодня. Как в «Геометрии» Евклида, над которой в школьные годы пришлось попотеть многим читателям и читательницам, Архимед формулирует основные законы статики (то есть исследования равновесия) с помощью аксиом, а затем выводит из них ряд теорем. Мы воспроизведем здесь начало первого тома.

1. Равные тяжести на равных длинах уравниваются, на неравных же длинах не уравниваются, и перевешивают тяжести на большей длине.

2. Если при равновесии тяжестей на каких-нибудь длинах к одной из тяжестей будет что-нибудь прибавлено, то они не будут уравниваться, но перевесит та тяжесть, к которой было прибавлено.

3. Точно так же, если от одной тяжести будет отнято что-нибудь, то они не будут уравниваться и перевесит та тяжесть, от которой не было отнято.

4. При совмещении друг с другом равных и подобных плоских фигур совместятся друг с другом и их центры тяжести.

5. У неравных же, но подобных фигур центры тяжести будут подобно же расположены. Под подобным расположением точек в подобных фигурах мы подразумеваем такое, в котором прямые, проведенные из этих точек к вершинам равных углов, образуют равные углы с соответствующими сторонами.

6. Если величины уравниваются на каких-нибудь длинах, то на тех же самых длинах будут уравниваться и равные им.

7. Во всякой фигуре, периметр которой везде выпукл в одну и ту же сторону, центр тяжести должен находиться внутри фигуры.

За этими аксиомами следуют пятнадцать теорем, выведенных из них с помощью простых логических аргументов. Ниже приведены первые пять теорем без доказательств и процитировано доказательство шестой теоремы, поскольку она включает в себя основной закон рычага.

Теоремы:

1. Тяжести, находящиеся в равновесии на равных длинах, равны...
2. Неравные тяжести на равных длинах не уравновешиваются, но перевешивает большая...
3. Неравные тяжести будут (или могут) уравновешиваться на неравных длинах, причем большая тяжесть на меньшей длине...
4. Если две равные величины не имеют одного и того же центра тяжести, то для величины, составленной из обеих этих величин, центром тяжести будет середина прямой соединяющей центры тяжести этих величин...
5. Если центры тяжести трех равных величин лежат на одной прямой, и ее отрезки между центрами равны, то для величины, составленной из всех трех величин, центром тяжести будет точка, которая является центром тяжести для средней величины...

Теперь приведем доказательство шестой теоремы, слегка оживив его для простоты восприятия:

6. Две тяжести уравновешиваются на расстояниях, обратно пропорциональных этимтяжестям.

Предположим, что тяжести A , B соизмеримы (то есть отношение этих двух тяжестей представляет собой рациональную дробь, как $5/3$, $117/32$ и т. д.) и их центры тяжести изображены точками (рис. 1.3, а):

Проведем через точки $a\beta$ прямую, разделенную в точке γ так, что

$$A : B = \overline{\beta\gamma} : \overline{\gamma a}.$$

Нужно доказать, что γ является центром тяжести двух тяжестей, вместе взятых. Поскольку A и B соизмеримы, то соизмеримы $\overline{\beta\gamma}$ и $\overline{\gamma a}$. Пусть $\mu\nu$ — это общая мера для $\overline{\beta\gamma}$ и $\overline{\gamma a}$. Отложим $\overline{\beta\delta}$, $\overline{\beta\epsilon}$, равные каждая $a\gamma$, и $a\zeta$, равную $\gamma\beta$. Тогда $\overline{a\delta} = \gamma\beta$, поскольку $\overline{\beta\delta} = \gamma a$. Следовательно, $\zeta\delta$ делит-

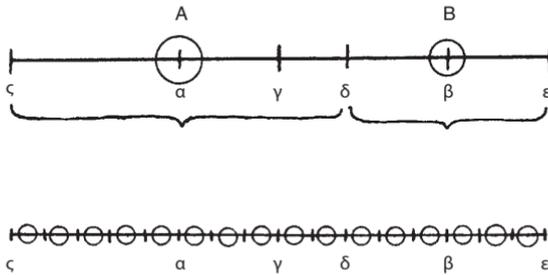


Рис. 1.3. Архимедово доказательство закона рычага

ся пополам в точке α , а $\overline{\delta\epsilon}$ делится пополам в точке β . Таким образом, каждая из $\overline{c\delta}$ и $\overline{\delta\epsilon}$ должна содержать в себе меру $\mu\nu$ четное число раз.

Возьмем такую тяжесть Ω , что она содержится в A столько же раз, сколько $\overline{\mu\nu}$ содержится в $\overline{c\delta}$, тогда:

$$A : \Omega = \overline{c\delta} : \overline{\mu\nu}.$$

Однако

$$B : A = \overline{\gamma\alpha} : \overline{\beta\gamma} = \overline{\delta\epsilon} : \overline{c\delta}.$$

Тогда *ex aequalis** $B : \Omega = \overline{\delta\epsilon} : \overline{\mu\nu}$, или Ω содержится в B столько же раз, сколько $\overline{\mu\nu}$ содержится в $\overline{\delta\epsilon}$. Таким образом, Ω является общей мерой для A и B .

Разделим $\overline{c\delta}$ и $\overline{\delta\epsilon}$ на части, равные $\mu\nu$, а A и B на части, равные Ω . Тогда число частей в A будет равно числу частей в $\overline{c\delta}$, а число частей в B — числу частей в $\overline{\delta\epsilon}$. Поместим одну часть A в среднюю точку каждой части $\overline{\mu\nu}$ отрезка $\overline{c\delta}$, а одну часть B в среднюю точку каждой части $\overline{\mu\nu}$ отрезка $\overline{\delta\epsilon}$ (рис. 1.3, б)

Тогда центр тяжести частей A , помещенных на равных расстояниях отрезка $\overline{c\delta}$, окажется в точке α , расположенной в середине отрезка $\overline{c\gamma}$, а центр тяжести частей B , помещенных на равных расстояниях отрезка $\overline{\delta\epsilon}$, окажется в точке β , расположенной в середине отрезка $\overline{\delta\epsilon}$. Но система тяжестей A и B , вместе взятых, составленная из частей Ω , является системой четного числа равных тяжестей, расположенных на рав-

* По равенству.

ных расстояниях по отрезку $\overline{\zeta\epsilon}$. И поскольку $\overline{\zeta\alpha} = \overline{\gamma\beta}$, $\overline{\alpha\gamma} = \overline{\beta\epsilon}$, $\overline{\zeta\gamma} = \overline{\gamma\epsilon}$, то γ является серединой отрезка $\overline{\zeta\epsilon}$. Следовательно, γ — центр тяжести системы, расположенной на отрезке $\overline{\zeta\epsilon}$. Таким образом, тяжесть A , действующая в точке α , и тяжесть B , действующая в точке β , уравниваются в точке γ .

За этой теоремой следует теорема 7, в которой доказывается то же самое утверждение для случая, когда A и B несоизмеримы (то есть отношение этих двух тяжестей является иррациональным числом, как, например, $\sqrt{2}$).

Открытие принципа рычага и различные его приложения произвели сенсацию в Древнем мире, что мы можем видеть из описания, данного Плутархом в его книге «Жизнь Марцелла» — римского генерала, который захватил Сиракузы во время Второй Пунической войны и который отчасти был ответствен за убийство Архимеда, внесшего большой вклад в оборону города путем строительства хитроумных военных машин. Плутарх пишет: «Архимед как-то раз написал царю Гиерону, с которым был в дружбе и родстве, что данную силу можно сдвинуть любой данный груз; как сообщают, увлеченный убедительностью собственных доказательств, он добавил сгоряча, что, будь в его распоряжении другая Земля, на которую можно было бы встать, он сдвинул бы с места нашу. Гиерон изумился и попросил претворить эту мысль в действие и показать какую-либо тяжесть, перемещаемую малым усилием, и тогда Архимед велел наполнить обычной кладью царское трехмачтовое грузовое судно, недавно с огромным трудом вытасченное на берег целою толпою людей, посадил на него большую команду матросов, а сам сел поодаль и, без всякого напряжения вытягивая конец каната, пропущенного через составной блок, придвинул к себе корабль — так медленно и ровно, точно тот плыл по морю».

Принцип рычага играет очень важную роль для всех слоев общества, от фермера, использующего лом, чтобы передвинуть тяжелый валун, до современного инженера, использующего сложные устройства. Закон рычага, сформулированный Архимедом, дает нам очень важные знания о *работе*, выполняемой под действием силы. Предположим, что нам нужно поднять тяжелый камень (рис. 1.4),

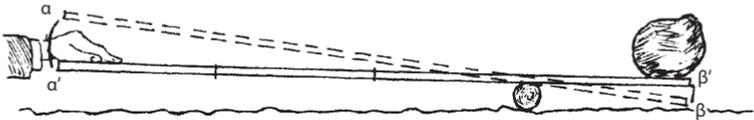


Рис. 1.4. Если левое плечо рычага в три раза длиннее правого плеча, то перемещение его левого конца ($\overline{aa'}$) в три раза больше, чем перемещение правого конца ($\overline{bb'}$)

используя лом с соотношением плеча $\overline{a\gamma} : \overline{\gamma\beta} = 3 : 1$. Мы можем сделать это, надавив на рукоятку лома с силой, которая в три раза меньше, чем сила тяжести, действующая на камень.

Из рисунка видно, что, когда камень поднимается, скажем, на 1 дюйм от земли ($\overline{\beta\beta'}$), рукоятка лома уходит вниз на 3 дюйма ($\overline{aa'}$). Таким образом, получаем, что результат действия силы, с которой мы нажимаем на рукоятку лома, умноженный на величину его перемещения вниз, равен весу камня, умноженному на величину его перемещения вверх. Результат действия силы по перемещению точки ее приложения называется работой этой силы. Таким образом, согласно Архимедову закону рычага *работа, производимая рукой, толкающей вниз длинный конец лома, равна работе по поднятию камня, производимой его коротким концом*. Это утверждение может быть обобщено для любых видов механической работы. Например, работа грузчиков, поднимающих рояль на третий этаж, равна работе по подъему трех роялей на один этаж (профессиональные грузчики могут с этим не согласиться, поскольку в случае трех роялей труднее подогнать стропы и т. д., но мы говорим только о работе по подъему этого тяжелого предмета).

Принцип равенства работ двух концов рычага может применяться и к другому похожему устройству — блоку, который Архимед использовал для перемещения тяжелого корабля к огромному удивлению царя Гиерона. Если для того, чтобы поднять большой груз, протянуть привязанную к ней веревку через колесо, подвешенное на деревянной балке (рис. 1.5, *a*), то груз поднимется на расстояние l равное длине d , на которое была вытянута веревка, а сила Fl будет равна весу груза.

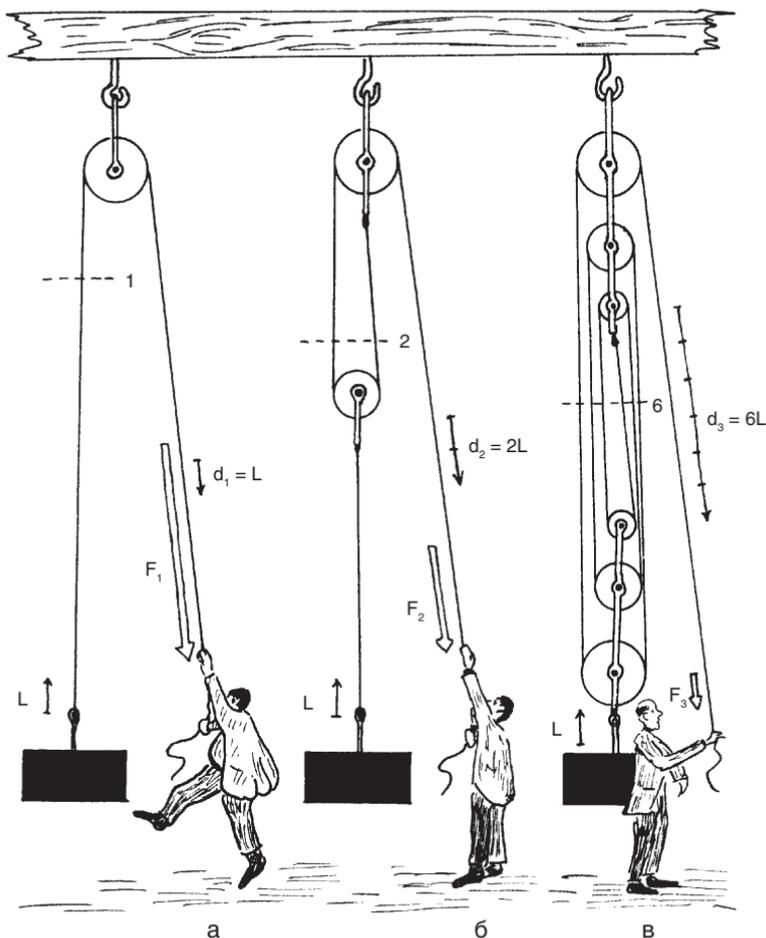


Рис. 1.5. Принцип блока

Однако если использовать два колеса, как показано на рис. 1.5, б, то длина веревки увеличится вдвое, а сила, которую нужно приложить, будет в два раза меньше веса поднимаемого груза. В системе, показанной на рис. 1.5, в, сила, необходимая для поднятия груза, составит всего одну шестую веса груза, а длина веревки d будет в шесть раз больше расстояния, на которое поднимется груз.

Вероятно, самое известное открытие, сделанное Архимедом, — это закон, относящийся к уменьшению веса тел, погруженных в жидкость. Случай, который привел к этому открытию, описан Витрувием в следующих выражениях: «В случае с Архимедом, несмотря на то что он сделал много удивительных открытий разного рода, именно то, о котором я расскажу, видимо, стало результатом его безграничной изобретательности. Гиерон, после того как получил царскую власть в Сиракузах, решил в знак своего успеха передать в некий храм золотую корону, которую поклялся пожертвовать бессмертным богам. Он заказал ювелиру изготовить ее за определенную цену, для чего отвесил ему необходимое для работы количество золота. В назначенное время ювелир принес царю прекрасно выполненную работу, и оказалось, что вес короны в точности соответствует весу переданного ему золота. Однако позднее ювелира обвинили в том, что при изготовлении короны он забрал часть золота, заменив его равным по весу серебром. Гиерон, который считал оскорблением, что его обманули, и в то же время не знал, как изобличить вора, попросил Архимеда придумать способ. Последний, обдумывая эту проблему, отправился в баню и там, погрузившись в ванну, заметил, что чем глубже его тело опускалось в воду, тем больше воды выливалось из ванны. Поскольку это указывало на решение задачи, над которой думал Архимед, он на радостях без промедления выскочил из ванны и голым бросился домой с громким криком, что нашел то, что искал. Он снова и снова выкрикивал на греческом εὑρηκα! («Эврика!» — «нашел!»).

Таково начало истории этого открытия. Дальше говорится, что он сделал два объема одинакового с короной веса, один из золота, другой из серебра. После этого он наполнил большую емкость водой до краев и опустил в нее объем из серебра. Из емкости вылилось ровно столько воды по объему, сколько серебра он погрузил в воду. Затем, вытащив груз, он стал доливать недостающую воду, используя в качестве меры пинту, пока вода снова не дошла до краев. Таким образом, он установил вес серебра, соответствующий этому количеству воды.

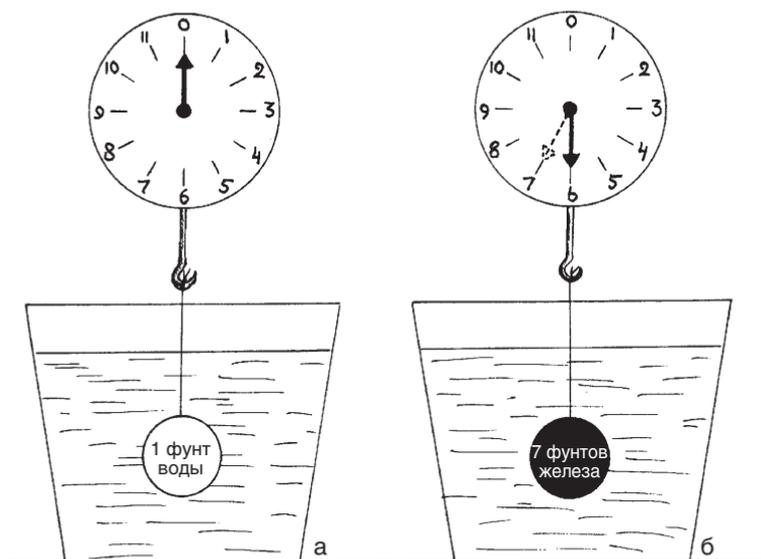


Рис. 1.6. Доказательство закона Архимеда о плавающих телах

Потом Архимед точно так же опустил в емкость объем из золота и определил, что воды вылилось меньше, чем в предыдущем случае, а именно настолько, насколько объем золота был меньше объема серебра того же веса. Наконец, снова наполнив емкость, он погрузил туда саму корону и обнаружил, что в случае короны вылилось больше воды, чем в случае объема золота того же веса. Тогда, учитывая, что в случае короны вылилось больше воды, чем в случае объема золота того же веса, он определил, что в короне к золоту подмешано серебро, и, таким образом, сделал воровство ювелира совершенно очевидным.

Доказательство закона Архимеда, данное им в книге «О плавающих телах», несколько тяжеловато, хотя и совершенно корректно, и мы воспроизведем его здесь более современным языком, рассмотрев, что случится, если погрузить в ведро с водой металлический шар (рис. 1.6).

Сначала предположим, что вместо железного шара у нас тонкий пластиковый шар того же диаметра, наполненный водой (рис. 1.6, а). Поскольку весом пластиковой оболочки

можно пренебречь, ситуация будет такой же, как если бы вода в шаре была просто частью воды в ведре, и весы покажут 0. Теперь заменим воду в шаре железом (рис. 1.6, б), которое в семь раз тяжелее такого же объема воды. Поскольку 1 фунт воды поддерживался остальной водой в ведре и весы показывали 0, замена воды на железо добавит лишь $7 - 1 = 6$ дополнительных фунтов, что и отразится на весах в этом случае. Таким образом, можно сделать вывод, что железный шар, весящий (в воздухе) 7 фунтов, за счет погружения в воду стал легче на 1 фунт, то есть на вес вытесненной им воды. Это закон Архимеда, который гласит, что «любое тело, погруженное в жидкость, становится легче на вес жидкости, которая была им вытеснена».

Архимед — военный советник

Архимед, помимо того, что был великим математиком и основателем науки механики, был, говоря современным языком, «советником по вопросам промышленности и вооруженных сил».

Самым лучшим из его инженерных изобретений, известных нам, является так называемый Архимедов винт, используемый для поднятия воды. Это приспособление, показанное на рис. 1.7, работа которого самоочевидна, явно широко использовалось для орошения и для откачки подземных вод из шахт.

Участие Архимеда в работе для военных, вероятно, началось с демонстрации блока царю Гиерону. Согласно яркому описанию Плутарха в «Жизни Марцелла»:

«Царь был поражен и, осознав все могущество этого искусства, убедил Архимеда построить ему несколько машин, для защиты и для нападения, которые могли бы пригодиться во всякой осаде; самому Гиерону, проведшему большую часть жизни в мире и празднествах, не пришлось воспользоваться ими, но теперь и машины, и их изобретатель со служили сиракузянам верную службу».

Итак, римляне напали с двух сторон, и сиракузяне растерялись и притихли от страха, полагая, что им нечем сдер-

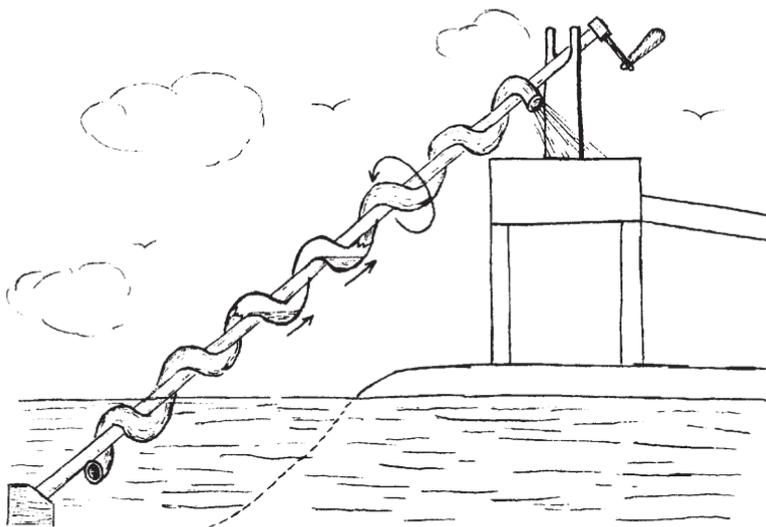


Рис. 1.7. Винт Архимеда перекачивает воду просто за счет своего вращения. Чтобы понять принцип действия, попытайтесь задуматься, что происходит с нижней частью трубы, когда она поворачивается, и вы увидите, что она движется вверх: то есть не сама труба, а положение ее «минимума», содержащего воду. Может быть полезным сделать спираль, например, из проволоки, и вы увидите, что происходит, когда она вращается вокруг своей оси

жать столь грозную силу. Но тут Архимед пустил в ход свои машины, и в неприятеля, наступающего с суши, понеслись всевозможных размеров стрелы и огромные каменные глыбы, летевшие с невероятным шумом и чудовищной скоростью, — они сокрушали всё и всех на своем пути и приводили в расстройство боевые ряды, — а на вражеские суда вдруг стали опускаться укрепленные на стенах брусья и либо топили их силою толчка, либо, схватив железными руками или клювами вроде журавлиных, вытаскивали носом вверх из воды, а потом, кормюю вперед, пускали ко дну, либо, наконец, приведенные в круговое движение скрытыми внутри оттяжными канатами, увлекали за собою корабль и, раскрутив его, швыряли на скалы и утесы у подножия стены, а моряки погибали мучительной смертью. Нередко взору открывалось ужасное зрелище: поднятый

высоко над морем корабль раскачивался в разные стороны до тех пор, пока все до последнего человека не оказывались сброшенными за борт или разнесенными в клочья, а опустевшее судно разбивалось о стену или снова падало на воду, когда железные челюсти разжимались.

Машина, которую Марцелл поставил на поплавок из восьми судов, называлась самбука, потому что очертаниями несколько напоминала этот музыкальный инструмент; не успела она приблизиться к стене, как в нее полетел камень весом в десять талантов, затем — другой и третий. С огромной силой и оглушительным лязгом они обрушились на машину, разбили ее основание, расшатали скрепы.

Марцелл, не видя иного выхода, и сам поспешно отплыл, и сухопутным войскам приказал отступить. На совете было решено ночью, если удастся, подойти вплотную к стене: сила натяжения канатов, которыми пользуется Архимед, рассуждали римляне, такова, что придает стрелам большую дальность полета, и, стало быть, некоторое пространство вблизи полностью защищено от ударов. Но Архимед, по-видимому заранее все предусмотрев, приготовил машины, разящие на любое расстояние, и короткие стрелы; подле небольших, но часто пробитых отверстий в стенах были расставлены невидимые врагу скорпионы с малым натяжением, бьющие совсем близко.

И вот когда римляне подошли к стене, как они полагали, совершенно незаметно, их снова встретил град стрел, на головы им почти отвесно посыпались камни, а сверху отовсюду полетели дротики; и они отступили. Когда же они оказались в некотором отдалении, сиракузяне опять засыпали их стрелами, поражая бегущих; многие погибли, многие корабли столкнулись, меж тем как отплатить врагу римляне были не в силах: ведь большая часть Архимедовых машин была скрыта за стенами, и римлянам казалось, что они борются с богами — столько бед обрушивалось на них неведомо откуда.

Впрочем, Марцелл вышел из дела невредим и, посмеиваясь над своими мастерами и механиками, сказал: „Не довольно ли нам воевать с этим Бриареем от геометрии, который вычерпывает из моря наши суда, а потом с по-

зором швыряет их прочь, и превзошел сказочных сторуких великанов — столько снарядов он в нас мечет!“ И в самом деле, прочие сиракузяне были как бы телом Архимедовых устройств, душою же, приводяшею все в движение, был он один: лишь его машины обороняли город и отражали натиск неприятеля, тогда как все остальное оружие лежало без движения. В конце концов, видя, что римляне запуганы до крайности и что, едва заметив на стене веревку или кусок дерева, они поднимают отчаянный крик и пускаются наутек в полной уверенности, будто Архимед наводит на них какую-то машину, Марцелл отказался от дальнейших стычек и приступов, решив положиться на время.

Когда после двух лет осады в 212 году до н. э. римские легионы в конце концов захватили Сиракузы, отряд римских солдат ворвался в дом Архимеда, который в это время находился на заднем дворе и был занят рисованием сложных геометрических фигур на песке.

«Noli tangere circulos meos!» («Не трогайте мои рисунки!») — воскликнул Архимед на своей неважной латыни, когда один из солдат подошел к ним. В ответ солдат пронзил философа своим копьем.

Когда Цицерон, будучи квестором, посетил Сицилию в 137 году до н. э., он нашел заросшую терновником и чертополохом могилу Архимеда вблизи Агриджентинских ворот. Цицерон пишет: «Один из самых славных городов Греции, некогда породивший на свет столько ученых, не знал уже даже, где находится гробница самого гениального из его горожан, пока она не была найдена человеком из Арпинума».

Александрийская школа

С упадком политической и экономической мощи Афин центр греческой культуры переместился в Александрию, основанную в 332 году до н. э. Александром Великим на египетском побережье Средиземного моря как ключевой порт для торговли между Европой и Востоком. Со временем Александрия превратилась в красивый город, в котором

было «...4000 дворцов, 4000 бань, 12 000 садов, 40 000 евреев, плативших дань, и 400 театров и других мест развлечения». В ней также находился передовой университет и огромная библиотека, которая позже, к сожалению, была уничтожена огнем в результате большого пожара в городе, возникшего, когда Юлий Цезарь приказал сжечь египетский флот, стоявший в александрийской гавани. Здесь Евклид написал свои «Начала», а молодой студент из Сиракуз Архимед получил основы научных знаний.

В области астрономии Александрия была представлена Гиппархом, жившим в середине II века до н. э. Гиппарх сделал самые точные из всех возможных в то время измерений положения звезд и составил каталог более 1080 звезд, который до сих пор используется астрономами как источник информации о положении звезд в древности. Он также открыл явление прецессии равноденствий, которые являются точками на небесной сфере, где солнце пересекает небесный экватор во время своего ежегодного движения между звезд. Это явление имеет место, потому что земная ось, расположенная под наклоном к плоскости ее орбиты, описывает конус вокруг перпендикуляра к орбите с периодом в 26 000 лет. Причина такого движения была открыта почти на тысячу лет позже сэром Исааком Ньютоном.

Что касается физики, Александрийская школа была представлена Героном, который был больше инженером-изобретателем, чем физиком. Его книга «Механика» содержит много верных утверждений и в то же время множество математических ошибок.

Несмотря на недочеты в математическом представлении основных задач, книга Герона по механике содержит описание большого числа полезных приспособлений, таких как составные блоки, различные шестерни, зубчатые механизмы и т. д. В своей книге по пневматике он описывает принцип сифона (рис. 1.8, *a*), и паровой реактивный двигатель (рис. 1.8, *b*) который, несмотря на свое сходство с обычной машиной для полива газонов, можно рассматривать как предшественник современных реактивных двигателей.

Герон написал также книгу под названием «Катоптрика», в которой содержатся теория зеркал и их практические

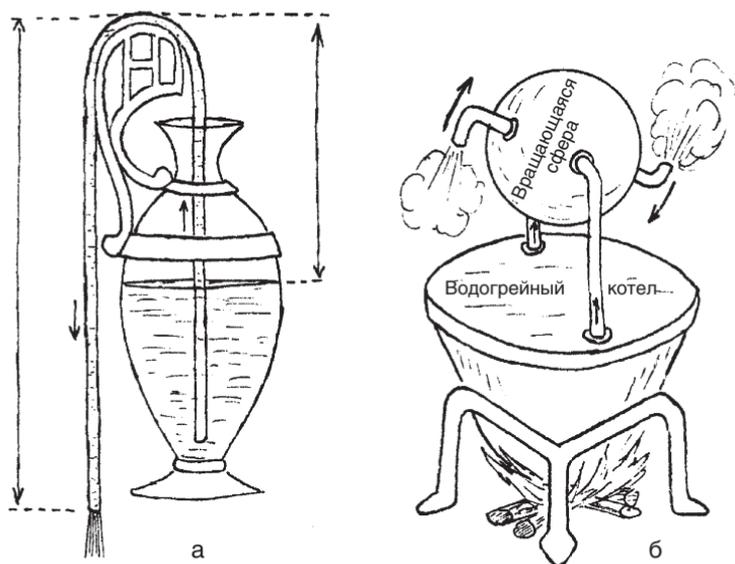


Рис. 1.8. Два устройства, изобретенные Героном: *а* — сифон позволяет воде вытекать из емкости наружу по изогнутой трубке (вода течет по трубке, потому что вес воды в левой длинной части трубки больше, чем вес воды в правой части, которая, по существу, находится только между поверхностью воды в емкости и верхней точкой трубки); *б* — паровой реактивный двигатель Герона, в котором вращение сферы происходит за счет двух струй пара, выходящих из сопел

применения. Читаем: «Катоптрика — это наука, которая определенно достойна изучения и в то же время способна создавать зрелища, вызывающие удивление наблюдателя. С помощью этой науки сделаны зеркала, показывающие правую сторону, как правую, и левую сторону, как левую, в то время как обычные зеркала по своей природе имеют противоположное свойство и показывают стороны наоборот».

Это делается за счет размещения двух зеркал без рамы встык и под прямым углом друг к другу (рис. 1.9).

«С помощью зеркал можно увидеть свою собственную спину [таким же способом, как парикмахер показывает вам стрижку вашего затылка], а также увидеть себя переверну-

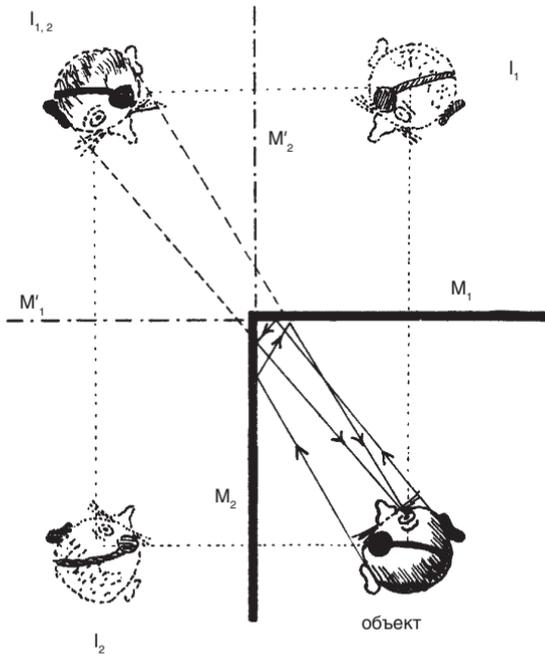


Рис. 1.9. Глядя в составное зеркало, состоящее из двух плоских зеркал M_1 и M_2 без рамы, размещенных встык под прямым углом друг к другу, можно увидеть себя отраженным дважды: сначала в зеркале M_1 , а затем в воображаемом продолжении зеркала M_2 — M'_2 , или сначала в зеркале M_2 , а затем в воображаемом продолжении зеркала M_1 — M'_1 . Из-за двойного отражения правая сторона остается правой, а левая сторона остается левой. Реальные лучи света показаны непрерывными линиями

тым, стоящим на голове, имеющим три глаза и два носа, с искаженным лицом, словно от большого горя [как в зеркалах парка развлечений].

Кто не сочтет полезным возможность, находясь у себя дома, увидеть, сколько людей на улице и что они делают?»

Взгляд Герона на природу света становится очевидным из следующей цитаты: «Практически все, кто писал о диоптрике, пребывали в сомнении относительно того, почему лучи, выходящие из наших глаз, отражаются зеркалами и почему эти отражения находятся под равными углами.

Теперь предположение, что наше зрение направлено по прямой линии, выходящей из органа зрения, может быть обосновано следующим образом. Все, что движется с неизменной скоростью, движется по прямой. Примером могут служить стрелы, выпущенные из лука. Под действием движущей силы объект стремится двигаться по кратчайшему из возможных путей, поскольку у него нет времени для более медленного движения, то есть движения по более длинной траектории. Движущая сила не допускает такой задержки. А раз так, то из-за своей скорости объект имеет тенденцию двигаться по кратчайшему пути. Но кратчайшей из всех линий с одинаковыми конечными точками является прямая. То, что лучи, выходящие из наших глаз, движутся с бесконечной скоростью, можно вывести из следующих размышлений. Если после того, как наши глаза были закрыты, мы откроем их и посмотрим в небо, не требуется никакого времени, чтобы зрительные лучи достигли неба. Действительно, мы видим звезды сразу же, как посмотрим на них, хотя расстояние до них, можно сказать, бесконечно. То есть при увеличении расстояния результат будет тем же самым, так что очевидно, что лучи выходят из наших глаз с бесконечной скоростью. Следовательно, они не прерываются и не изгибаются, а движутся по кратчайшему пути — по прямой линии».

Этот пассаж указывает на забавный факт: Герон и, по-видимому, все его современники считали, что мы видим, благодаря каким-то лучам, испускаемым нашим глазом и отраженным от предмета. То есть в основе зрения лежит тот же принцип, что и в современных радарах.

Другим великим александрийцем был астроном Клавдий Птолемей (не путайте с членами семейства Птолемеев, многие годы правивших Египтом до нашей эры), который жил и работал в первой половине II века н. э. Наблюдения Птолемея за звездами и планетами, собранные в книге под названием «Альмагест», представляют собой существенное дополнение к данным, полученным Гиппархом за два с половиной века до этого. Его вклад в физику содержится в книге «Оптика», дошедшей до нас в латинском переводе утраченной арабской версии оригинального греческого ма-

нускрипта. В этой книге Птолемей среди прочего обсуждает важную тему рефракции света при его прохождении из одной среды в другую. Он пишет: «Видимые лучи могут быть изменены двумя способами: с помощью отражения от других объектов, называемых зеркалами, которые не позволяют лучам проникнуть к ним внутрь, и с помощью преломления (то есть рефракции) в случае сред, допускающих проникновение и имеющих общепринятое название („прозрачные материалы“»).

Он иллюстрирует явление рефракции следующим простым экспериментом с монетой, помещенной на дно сосуда с водой, под названием баптистир — крестильная чаша (рис. 1.10).

Предположим, что положение глаза таково, что луч зрения, исходящий из него, проходит по краю баптистира и достигает точки, расположенной выше монеты. Затем, при условии, что монета остается на своем месте, осторожно будем доливать в баптистир воды, пока луч, проходящий по краю сосуда, не отклонится вниз и не упадет на монету. В результате предмет, который раньше был невидим, станет видимым на прямой линии, проходящей из глаза выше действительного места положения объекта. Теперь наблюдателю будет казаться, что не зрительный луч отклонился в сторону объекта, а сам объект всплыл и оказался на линии луча. Таким образом, объект будет казаться находящимся на перпендикуляре, проведенном от него к поверхности воды.

Ниже по тексту Птолемей описывает эксперимент, разработанный для детального изучения законов преломления света:

«Величина преломления в воде, которую можно наблюдать, определяется с помощью эксперимента, похожего на тот, который мы проводили с помощью медного диска, изучая законы зеркал. Нарисуем на этом диске круг $\alpha\beta\gamma\delta$ (рис. 1.10, б) с центром в точке ζ и двумя диаметрами $\alpha\zeta\gamma$ и $\delta\zeta\beta$, пересекающимися под прямым углом. Разделим каждый квадрант на девять равно частей и поместим в центр очень маленькую цветную метку. Затем поместим диск в небольшой резервуар и нальем в него чистой воды

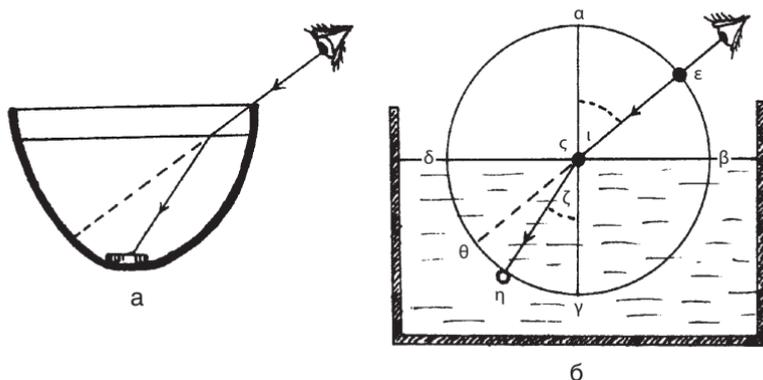


Рис. 1.10. Эксперимент Птолемея с рефракцией света: монета, лежащая на дне наполненного водой сосуда, кажется расположенной выше, чем на самом деле (а); аппарат для изучения рефракции света (б): Птолемей измерил отношение между углом $\delta\zeta\eta$ в воде и углом $\alpha\zeta\epsilon$ в воздухе и рассчитал зависимость между ними

таким образом, чтобы она не мешала зрению. Пусть плоскость диска, расположенная перпендикулярно поверхности воды, делится последней пополам так, что только половина диска $\beta\gamma\delta$ полностью находится под водой. Пусть диаметр $ас\gamma$ перпендикулярен поверхности воды.

Теперь рассмотрим дугу, скажем $\alpha\epsilon$, выходящую из точки α и расположенную в одном из двух квадрантов диска, находящихся выше уровня воды. Поместим в точку ϵ маленькую цветную метку. Одним глазом будем смотреть так, чтобы метки ϵ и ζ оказались на одной прямой, выходящей из глаза. Одновременно с этим будем двигать тонкий маленький стержень по дуге $\gamma\delta$, расположенной в противоположном квадранте, находящемся под водой, до тех пор, пока конец стержня не окажется в точке дуги, лежащей на продолжении линии, соединяющей ϵ и ζ . Теперь, если измерить дугу между точками γ и η , по которой двигался стержень, пока не появился на вышеупомянутой линии, то окажется, что эта дуга $\gamma\eta$ всегда меньше дуги $\alpha\epsilon$.

Если мы поместим глаз на перпендикуляр $ас$, то зрительный луч не будет отклоняться и упадет на точку γ , находящуюся напротив α на той же прямой, что и $ас$. Однако

в других положениях если увеличивать дугу $\alpha\epsilon$, то будет увеличиваться и дуга $\gamma\eta$, а величина наклона луча будет постоянно возрастать.

Когда $\alpha\epsilon$ равняется	$\gamma\eta$ будет	Наклон	
10°	8°	2°	
20°	$15\frac{1}{2}^\circ$	$14\frac{1}{2}^\circ$	
30°	$22\frac{1}{2}^\circ$	$7\frac{1}{2}^\circ$	
40°	29°	11°	
50°	35°	15°	
60°	$40\frac{1}{2}^\circ$	$19\frac{1}{2}^\circ$	
70°	$45\frac{1}{2}^\circ$	$24\frac{1}{2}^\circ$	
80°	50°	30°	

При помощи этого метода мы определили величину рефракции в случае воды».

При помощи похожего метода Птолемей изучил рефракцию световых лучей на границе воздуха и стекла и обнаружил, что в этом случае отклонение луча будет больше. Однако он не пытался (а если и пытался, то не добился успеха) выразить результаты своих наблюдений с помощью математической формулы, и математическая формулировка закона рефракции света была получена только в XVII веке. Это достаточно забавно, поскольку он мог с легкостью это сделать, ведь необходимый для этого математический аппарат, представляющий собой отношение дуг и хорд, был использован Плутархом за полтора века до него и в значительной степени разработан им самим в «Альмагесте» в связи с астрономическими наблюдениями.

Задача состояла в том, чтобы найти длину хорды ADB , соответствующей дуге ACB круга единичным радиусом (рис. 1.11). Используя хитроумные математические методы, Птолемей построил таблицу, часть которой представлена ниже:

Дуги	Хорды	Дуги	Хорды	Дуги	Хорды
116°	1,014 557	$117\frac{1}{2}^\circ$	1,023 522	119°	1,032 344
$116\frac{1}{2}^\circ$	1,020 233	118°	1,025 137	$119\frac{1}{2}^\circ$	1,033 937
117°	1,021 901	$118\frac{1}{2}^\circ$	1,030 741	120°	1,035 523

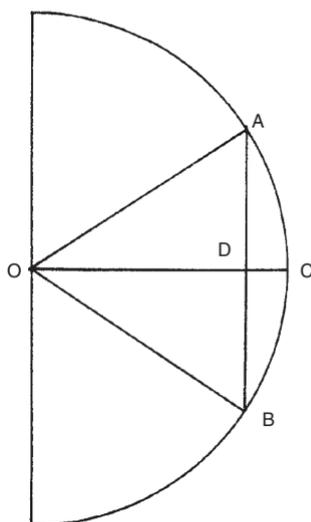


Рис. 1.11. Отношение между таблицами хорд Плутарха и современными тригонометрическими таблицами. Плутарх определил длины хорд ADB для дуг ACB различной длины. В современной тригонометрии определяется длина AD (половины хорды) для дуги AC . Длина AD известна как синус, или \sin угла AOC , а длина OD известна как косинус, или \cos этого угла

Эта таблица соответствует тому, что мы сегодня называем тригонометрическими таблицами *синусов*, с той лишь разницей, что в той используются половины дуг (угол AOC) и половины хорд AD . Длина AD для радиуса равного единицы равна синусу угла AOC , а расстояние OD — косинусу AOC .

Тригонометрические функции чрезвычайно полезны при решении различных геометрических задач, включающих и длины, и углы.

Если бы Птолемей сравнил результаты своего эксперимента по преломлению света с его таблицей синусов, он бы обнаружил, что *отношение синуса угла падения к синусу угла преломления является константой для любой заданной пары сред*. Он этого не сделал, и приведенный выше закон преломления был открыт только в XIV веке голландским астрономом и математиком Виллебрордом Снеллом. Как мы

увидим далее, закон Снелла имеет первостепенную важность для понимания природы света.

Работа Птолемея явилась последним крупным вкладом древнегреческой культуры в развитие науки, и после его смерти исследовательская деятельность в Александрии быстро пришла в упадок. Вероятно, последнее имя, которое можно упомянуть в связи с Александрийской школой, это имя Гипатии. Будучи дочерью математика Теона, она преподавала науку и философию. Гипатия жила во времена царствования императора Юлиана Апостата, который пытался защитить греческих богов и греческие знания от набравшей силу христианской церкви. Реакция, наступившая после его смерти, привела в 415 году к большому антигреческому восстанию, организованному александрийским епископом Кириллом. Толпа христиан разорвала Гипатию на части и уничтожила все напоминания о городских библиотеках.

Глава 2

ТЕМНЫЕ ВЕКА И ВОЗРОЖДЕНИЕ

С исчезновением греческой культуры развитие науки в целом и физики в частности практически остановилось. Римлян, которые были хозяевами мира в тот период истории человечества, мало заботило абстрактное мышление. Их цивилизация была «цивилизацией бизнесменов», и, хотя они поощряли знания, их интересовало преимущественно их практическое применение. После падения Римской империи все стало еще хуже. Феодалные государства, возникшие на ее руинах, не представляли собой питательной почвы для развития какой-либо науки. Единственным объединяющим элементом в тот период, растянувшийся более чем на тысячу лет, была христианская религия, и потому интеллектуальными центрами стали монастыри и аббатства. Как следствие, основные интересы сосредотачивались вокруг проблем теологии, а те научные знания, которые сохранились после падения древнегреческой культуры, были подчинены диктату религии. Птолемея система мира с расположенной в центре Землей и вращающимися вокруг нее Солнцем и планетами считалась непоколебимой догмой, поскольку лучше всего соответствовала концепции центрального положения Ватикана как избранного Господом представительства на земле. «Научные» дискуссии в основном ограничивались такими задачами типа, сколько ангелов может уместиться на конце иголки или может ли всемогущий Бог создать такой тяжелый камень, что сам не сможет его поднять. В Европе процветала примитивная «лысенковщина», а святая инквизиция заботилась о подавлении любых отклонений от генеральной линии религиозной веры.

К счастью для нас, греческая наука нашла убежище в недавно возникшей арабской империи (халифате), которая за VII век включила в себя все земли к югу от Средиземного моря и через узкий Гибралтарский пролив выплеснулась в Испанию. Ее праведный властелин Гарун ар-Рашид, описанный в книге сказок «Тысяча и одна ночь», в 800 году основал школу наук в Багдаде, а город Кордова в Испании стал культурным центром арабской империи на земле Европы. Арабские ученые изучили и перевели греческие манускрипты, спасенные из полуразрушенных эллинских библиотек, и подняли знамя науки, в то время как Европа задыхалась в тисках средневековой схоластики. Об арабской эре в науке свидетельствуют такие используемые по сей день термины, как *алгебра*, *алкоголь*, *алкали* (*щелочь*), *амальгама*, *альманах*, *антарес* и т. д. Арабы достигли заметного прогресса в математике, разработав неизвестную грекам алгебру и введя арабские цифры, сделавшие расчеты гораздо более простыми, чем при использовании римской системы счисления. Однако, возможно, под влиянием сказок Шахерезады их работа в области астрономии и химии в основном ограничивалась преследованием таких фантастических целей, как предсказание жизни человека на основании положения звезд в момент его рождения (астрология) и поиск методов превращения обычных металлов в золото (алхимия). Они, по-видимому, ничего не сделали в области физики, за исключением, конечно, того факта, что алхимию можно рассматривать как предшественницу современных методов превращения одного химического элемента в другой. Но «мавр сделал свое дело, мавр может уйти», и в XII веке арабская империя быстро погибла в результате вторжения Чингисхана и упорных крестовых походов христиан в Святую землю.

К тому времени из хаоса темного Средневековья начали постепенно формироваться европейские государства, и образование стало переходить на новый уровень. В 784 году правитель империи франков Карл Великий издал указ, что все аббатства в его огромных владениях должны иметь при себе школы, и в 1100 году был основан Парижский университет. Вскоре после этого возникли университеты в

Болонье, Оксфорде и Кембридже, которые быстро стали признанными центрами образовательной деятельности. Обычный курс обучения состоял из тривиума, куда входила латинская грамматика, риторика и логика, и квадравиума, включавшего в себя алгебру, геометрию, музыку и астрономию. Однако образование по-прежнему находилось под бдительным присмотром церкви, и университеты во всех христианских странах, чтобы продолжать свое существование, должны были получить благословение папы. Обучение базировалось в основном на трудах Аристотеля, которые дошли до Европы в арабском переводе. Ранее мы уже отмечали, что, хотя Аристотель отличился во многих сферах, он был не слишком хорош в области физических наук, и это определенно не способствовало возрождению физики в Европе, которая только начинала пробуждаться от тысячелетней спячки.

Одним из важных факторов в распространении знаний стало изобретение печатного станка, случившееся в середине XV века в мастерской человека по имени Фуст из Майнца в Германии. Одной из самых значительных книг, вышедших из-под одного из таких станков, стала, несомненно, книга *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Нюрнберг, 1543 г.) Николая Коперника, в которой описана созданная им новая система мироздания, центром которой является Солнце. Однако чтобы избежать запрета со стороны церкви, пришлось снабдить эту книгу предисловием (написанным, вероятно, без ведома Коперника его издателем Андреасом Осияндером), где заявлялось, что идеи, изложенные в книге, носят абсолютно гипотетический характер и представляют собой скорее математическое упражнение, чем описание реального положения вещей.

Риторика и законы Кеплера

Вероятно, лучшим примером существовавшего в ту эпоху смешения теологии и настоящей науки является следующий отрывок из книги *Mysterium Cosmographicum* (1596 г.) Иоганна Кеплера, первооткрывателя законов движения

планет. Посвященная ряду представителей германской знати, которые поддерживали Кеплера в его исследованиях, эта книга начинается следующими словами:

«Прославленным благородным и праведным господам Сигизмунду Фридриху, барону Герберштейну... наибогаднейшим владетелям знаменитых поместий в Штирии, членам достопочтенного Совета пяти. Милостивые государи, примите мое почтительное приветствие!

Согласно данному мною семь месяцев назад обещанию, а именно написать работу, которая, по мнению знатоков, была бы элегантно и впечатляющей и значительно превосходила бы все ежегодные календари, я представляю вам, достопочтенные господа, работу хотя и небольшую по своим достижениям, но являющуюся плодом моих скромных усилий и посвященную удивительному предмету. Если вы желаете чего-то зрелого, то Пифагор уже занимался ею 2000 лет назад, если вы желаете чего-то нового, то это первый раз, когда я представляю ее человечеству. Если вы желаете чего-то масштабного, то нет ничего больше и обширней Вселенной. Если вы желаете чего-то почитаемого, то нет ничего более прекрасного, чем этот величественный храм Господень. Если вы желаете чего-то загадочного, то в природе нет и не было ничего столь неясного и малоизвестного. И только по одной причине мой предмет может удовлетворить не всех — его полезность не очевидна глупцам. Я говорю о книге Природы, которая так высоко ценится в Священном Писании. Святой Павел увещевал язычников видеть в себе отражение Бога, как они видят отражение Солнца в воде или в зеркале. Так почему должна быть меньше радость христиан, увидевших это отражение, если наша задача — почитать и восхищаться Господом в истинном смысле? Наше благочестие тем глубже, чем больше наше знание о величии его творения. Действительно, сколько хвалебных гимнов его верный слуга Давид пел Создателю, который не кто иной, как Бог единый! И при этом разумом своим обращался он к Небесам. Небеса, поет он, объявляют славу Божию. Я буду считать Твои небеса делом Твоих рук, как и луну и звезды, которые Ты установил. Господь повелитель наш, и велика сила его. Он сочтет

все звезды на небе и знает их по именам. Повсюду, воодушевленный Святым Духом и исполненный радости, он восклицает Вселенной: славьте Господа, славьте Его, Солнце и Луну и т. д.».

Ниже читаем:

«Тот факт, что весь мир заключен в сферу, уже подробно обсуждался Аристотелем (в его книге о небесах), который обосновывал свое доказательство в том числе на особой значимости сферической поверхности. Именно по этой причине даже сейчас внешняя сфера с закрепленными на ней звездами сохраняет свою форму, хотя ей нельзя приписать никакое движение. Как и прежде, в самом ее центре находится Солнце. Тот факт, что остальные орбиты являются круговыми, можно увидеть из кругового вращения звезд. Таким образом, нам не нужны другие доказательства того, что для украшения мира использовалась кривая. В то время как в мире существует три типа величин, а именно: форма, количество и содержимое тел, кривая имеется только в форме. При этом содержимое не важно, поскольку одна структура, вписанная концентрически в другую подобную (например, сфера в сферу, или круг в круг), либо касается ее везде, либо нигде. Поэтому сфера поверхность, поскольку она представляет собой абсолютно уникальную величину, может управляться только числом Три».

В то время, когда Кеплер писал эти цветистые пассажи, он упорно работал над более прозаической задачей — законом движения планет. Система Коперника, представленная в *Revolutionibus*, предполагала, что планеты движутся по круговым орбитам согласно традиции древнегреческой философии, считавшей круг идеальной кривой, а сферу — идеальным телом. Однако это предположение недостаточно хорошо соответствовало подробным измерениям движения планет, проведенным датским астрономом Тихо Браге в его частной обсерватории Ураниборг, располагавшейся на маленьком острове недалеко от Копенгагена. Будучи учеником и ассистентом Тихо Браге и обладая достаточными знаниями в области математики, полученными от прочтения Евклида и других классических греческих трудов, Кеплер поставил перед собой задачу определить точную

форму планетарных орбит и законы, управляющие движением планет. Спустя годы работы он пришел к своему первому важному открытию. Он обнаружил, что, хотя орбиты планет вокруг Солнца не являются строго круговыми, они описываются другим классом кривых, почти столь же хорошо известных в древней геометрии Евклида. Этот класс кривых известен как *сечения конусов* и может быть получен при пересечении конуса наклонными плоскостями (рис. 2.1). Если плоскость перпендикулярна оси конуса, то, конечно, в сечении мы получим окружность. Однако если плоскость наклонена по отношению к оси конуса, то мы получаем вытянутые замкнутые кривые, которые называются *эллипсами*. Когда плоскость становится параллельной стороне конуса, один конец конуса исчезает в бесконечности, и мы получаем разомкнутую кривую, называемую *параболой*. При еще больших наклонах первоначальная парабола становится все более «разомкнутой» и превращается в то, что называется *гиперболой*. Следует заметить, что в случае гиперболы мы на самом деле получаем две отдельные ветви, вторая ветвь получается при пересечении плоскости со второй перевернутой частью конуса. Другим способом эллипс можно определить как множество точек, для которых *сумма* расстояний до двух фиксированных точек, называемых *фокусами* эллипса, всегда одинакова. Таким образом, эллипс можно нарисовать, прикрепив двумя кнопками концы шнурка к картонке и двигая карандаш так, чтобы он все время держал шнурок натянутым. Таким же образом гипербола является множеством точек, для которых *разность* расстояний до двух фокусов остается постоянной (рис. 2.2, а), что не дает удобного практического способа нарисовать эту кривую.

Анализируя данные Тихо Браге, относящиеся к положению планет между звезд, Кеплер пришел к заключению, что все очень хорошо сходится, если предположить, что *все планеты движутся по эллиптическим орбитам, для которых в одном из фокусов расположено Солнце*. Он также обнаружил, что в своем движении вокруг Солнца планеты ускоряются, когда находятся ближе к Солнцу (в *перигелии*), и замедляются, когда находятся дальше от него (в *афелии*).

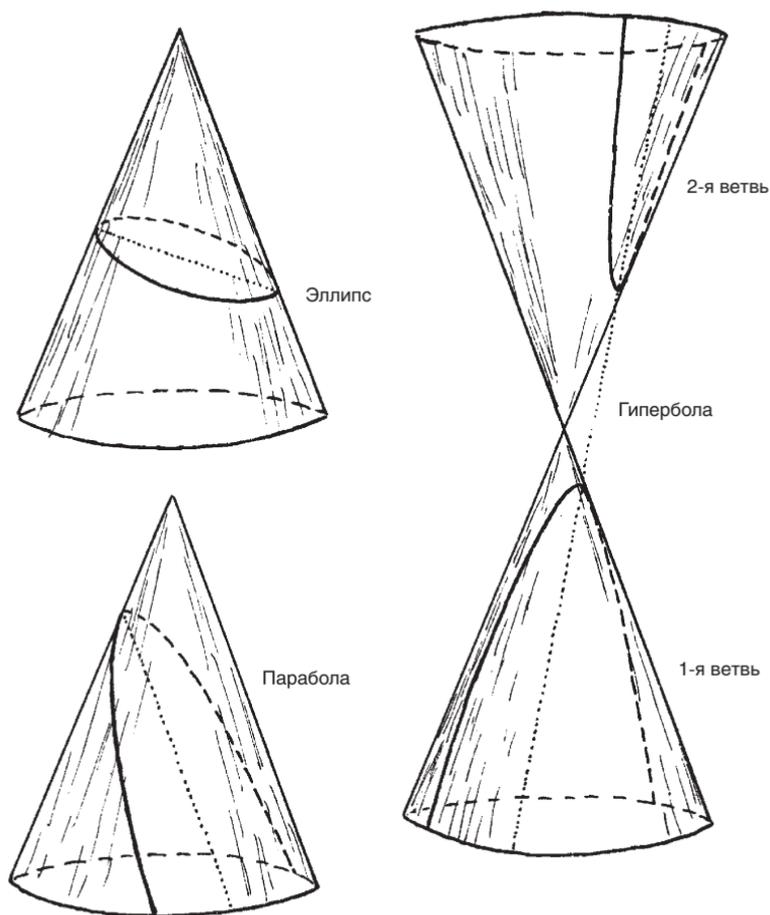


Рис. 2.1. Сечения, полученные путем разделения конуса плоскостью под различными углами

Зависимость между скоростями планет и их расстояниями от Солнца в разных частях орбиты такова, что *воображаемая линия, соединяющая Солнце и планету, огибает за равные промежутки времени одинаковые площади орбиты планеты* (рис. 2.2, б). Эти два основных закона движения планет были обнаружены Кеплером в 1609 году и известны как первый и второй законы Кеплера.

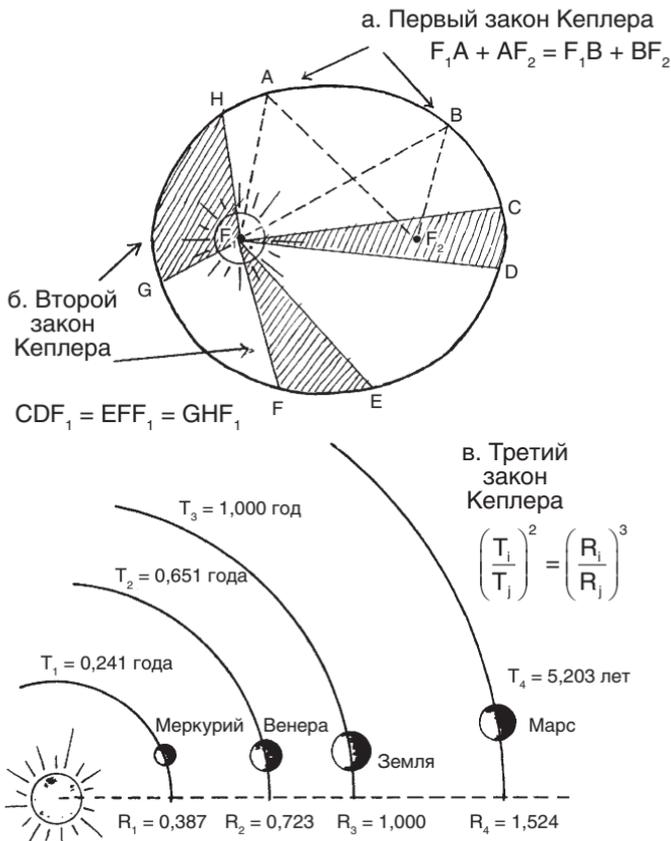


Рис. 2.2. Три кеплеровских закона движения планет

Сформулировав законы движения планет, Кеплер обратил внимание на взаимосвязь между разными планетами, и у него ушло девять лет на то, чтобы найти ее. Он рассматривал все возможности, например такие, как взаимосвязь планетарных орбит и правильных многогранников из геометрии твердых тел, но ничего не получалось. В конце концов Кеплер сделал блестящее открытие, известное как третий закон Кеплера. Он гласит, что *отношение квадратов периодов вращения разных планет вокруг Солнца равно отношению кубов их наибольшего расстояния от Солнца.*

На рис. 2.2 также схематично показаны орбиты так называемых внутренних планет: Меркурия, Венеры, Земли и Марса и их расстояния от Солнца в радиусах земной орбиты (так называемой астрономической единицы), а также периоды их вращения вокруг Солнца в годах.

Взяв *квадраты периодов вращения*, мы получаем следующую последовательность:

0,058, 0,378, 1,000, 3,540.

Взяв *кубы их расстояний* от Солнца, получаем:

0,058, 0,378, 1,000, 3,540.

Идентичность этих двух последовательностей доказывает правильность третьего закона Кеплера.

Таким образом, в начале XVII века ученые узнали, *как* планеты движутся вокруг Солнца, но им понадобилось более полувека, прежде чем они ответили на вопрос, *почему* они это делают.

Цепочка Стевина

В то время как Кеплера интересовали небесные сферы, у его современника фламандского инженера Симона Стевина были вполне земные интересы. Он продолжил работы Архимеда по механическому равновесию, обыкновенно называемому статика. Его главным вкладом стало решение задачи равновесия на наклонной плоскости, которой, по видимому, не занимался Архимед и которую, как мы видели раньше, Герон решил неправильно. На обложке книги Стевина по статике нарисована диаграмма, показанная на рис. 2.3, знаменующая собой огромный прогресс в понимании задач равновесия. Поместим цепочку, состоящую из большого числа металлических шаров, на твердую призму с очень гладкими («без трения») сторонами. Что произойдет? Поскольку на левой (более длинной) стороне призмы больше шаров, чем на правой (более короткой) стороне, можно было бы подумать, что из-за разности весов цепочка начнет двигаться справа налево. Но так как она непре-

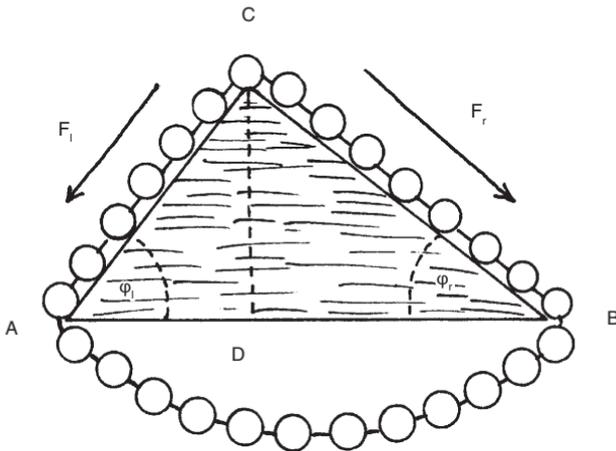


Рис. 2.3. Бесконечная цепочка Стевина, демонстрирующая закон равновесия на наклонных плоскостях

рывна, это движение никогда не прекратится, и цепочка будет крутиться бесконечно. Если бы это было верно, можно было бы добавлять к такому приспособлению зубчатые колеса и шестерни и получать механизмы, которые без каких-либо затрат работали бесконечно долго. Мы бы получили вечный двигатель, и человечество шагнуло бы на гораздо более высокую ступень развития, чем обещают все программы использования «мирного атома».

Но, будучи практиком и человеком, мыслящим трезво, Стевин отверг такую возможность и предположил, что цепочка придет в равновесие. Но это означало, что сила, действующая на шар, помещенный на наклонной плоскости, уменьшается при уменьшении угла между ней и горизонтальной плоскостью, что в действительности полностью соответствует тому, что на шар, помещенный на горизонтальной плоскости, не действует никакая сила.

Поскольку число шаров, помещенных на левой и правой сторонах, очевидно, пропорционально длине этих сторон, можно, обозначив через F_l и F_r силы, действующие на сигнальный шар на каждой стороне, написать:

$$F_l \times \overline{AC} = F_r \times \overline{CB}$$

или

$$F_l / F_r = \overline{CB} / \overline{AC}.$$

Воспользовавшись синусами углов φ_l и φ_r , характеризующими наклон плоскостей, получаем:

$$\sin \varphi_l = \overline{CD} / \overline{AC}; \sin \varphi_r = \overline{CD} / \overline{CB}.$$

Таким образом, приведенное выше отношение можно представить в виде:

$$F_l / F_r = \sin \varphi_l / \sin \varphi_r$$

Это означает, что *сила гравитации, действующая на объект, помещенный на наклонную плоскость, действует в направлении наклона и прямо пропорциональна синусу угла наклона.*

Маятник

Если Стевин сделал существенный шаг вперед в изучении статики, то честь сделать первые шаги в изучении динамики, то есть в изучении движения материальных тел, принадлежит сыну обедневшего флорентийского дворянина по имени Винченцо Галилей. Несмотря на то что сам синьор Винченцо очень интересовался математикой, своего младшего сына он планировал учить медицине, считая эту профессию более прибыльной. Таким образом, в 1581 году в возрасте 17 лет Галилео начал изучать медицину в университете Пизы. Но, очевидно, препарирование мертвых тел не показалось ему особенно увлекательным занятием, и его пылливый ум переключился на задачи иного рода.

Однажды, присутствуя на мессе в кафедральном соборе Пизы, он рассеянно наблюдал за люстрой, приведенной в движение руками служки, который зажигал свечи. Последовательные колебания становились все меньше и меньше по мере того, как люстра медленно возвращалась в состояние покоя. «Будет ли продолжительность времени каждого колебания тоже меньше?» — спросил себя Галилео. Не

имея секундомера — в то время он еще не был изобретен, — Галилео решил измерить время последовательных колебаний с помощью собственного пульса. И вероятно, к своему удивлению, он обнаружил, что, хотя колебания становились все меньше и меньше, их длительность по времени оставалась в точности той же самой. Придя домой, он повторил эксперимент с помощью камня, привязанного к концу шнура, и получил такой же результат. Кроме того, он открыл, что при заданной длине шнура период колебаний остается неизменным, каким бы ни был вес камня, который он брал для эксперимента. Так появилось приспособление, известное как маятник. Все еще стоя одной ногой в изучении медицины, Галилео изменил ход своих исследований и предложил использовать маятник для измерения пульса пациентов. Приспособление под названием пульсометр получило широкое распространение среди современных ему медиков и стало предшественником современного прибора, который медсестры прикладывают к руке пациента, глядя на свои элегантные наручные часы. Однако это стало последним вкладом Галилео в медицинскую науку, поскольку изучение маятника и других механических приспособлений полностью изменило направление его интересов. После некоторых споров с отцом он сменил свои образовательные планы, начав изучать математику и другие точные науки.

В течение ряда лет его интересы были сосредоточены в области того, что мы называем «динамикой», а именно изучения законов движения. Почему период колебания маятника не зависит от амплитуды, то есть размера колебаний? Почему легкий и тяжелый камень на конце шнура одинаковой длины имеют один и тот же период колебаний? Первую задачу Галилео так никогда и не решил, поскольку ее решение требует знания исчислений, разработанных Ньютоном почти на сто лет позже. Не решил он и вторую, которой пришлось ждать до появления работ Эйнштейна по общей теории относительности. Но он, безусловно, внес большой вклад если не в их решение, то в формулирование обеих! Движение маятника является частным случаем падения, обусловленного силой тяжести.

Если мы отпустим камень, не прикрепленный ни к чему, он упадет прямо на землю. Однако если камень привязан к шнуру, закрепленному на крючке, ввинченном в потолок, он будет вынужден падать по кривой или по окружности. Если легкий и тяжелый камень, привязанный к шнуру, затрачивают одинаковое время для достижения самого нижнего положения (четверть периода колебаний маятника), то если бросить эти два камня с одинаковой высоты, то для падения на землю они тоже затратят одинаковое время. Этот вывод пришел в противоречие с общепринятым мнением Аристотелевой философии, согласно которому тяжелые предметы падают на землю быстрее, чем легкие. Чтобы подтвердить свою точку зрения, Галилео бросил с падающей Пизанской башни два шара, один из дерева, другой из железа, и недоверчивые наблюдатели, стоявшие внизу, увидели, что оба шара упали на землю одновременно. Исторические исследования показывают, что этой демонстрации никогда не было и она представляет собой красивую легенду. Точно так же нет доказательств тому, что Галилео открыл закон маятника, когда молился в кафедральном соборе Пизы. Но он, определенно, бросал предметы разного веса, возможно с крыши собственного дома, и раскачивал камни, привязанные к шнуру, возможно у себя на заднем дворе.

Законы падения

Если отпустить камень, он движется вниз все быстрее и быстрее, и Галилео захотел узнать, какой математический закон управляет этим ускоряющимся движением. Однако свободное падение тел происходит слишком быстро, чтобы изучать его в подробностях без таких современных технологий, как, например, ускоренная фотосъемка. Поэтому Галилео решил «разбавить силу тяготения», заставив шар катиться по наклонной плоскости (рис. 2.4). Чем больше наклон плоскости, тем быстрее катится шар, и в предельном случае вертикальной плоскости шар свободно падает вдоль нее. Основная трудность в проведении этого экспе-



Рис. 2.4. Галилео изучает ускоряющееся движение шара по наклонной плоскости

римента была в том, чтобы измерить время, затрачиваемое шаром на прохождение разных расстояний. Галилео справился с ней, используя водяные часы, в которых время измерялось количеством воды, вылившейся через узкое отверстие внизу большой емкости. Отмечая положение шара через равные промежутки времени начиная с самого верха, Галилео обнаружил, что расстояния, за которые были пройдены эти интервалы, находятся в отношениях $1 : 3 : 5 : 7$ и т. д. При увеличении наклона плоскости соответствующие расстояния увеличиваются, но их отношения остаются теми же самыми. Таким образом, Галилео пришел к заключению, что этот закон должен выполняться и для предельного случая, то есть свободного падения. Описанный выше результат может быть представлен в разных математических формах, например, говоря словами, общее расстояние, пройденное телом за определенный период времени, пропорционально квадрату этого времени, или,

как говорили во времена Галилео, «дважды пропорционально» времени.

Действительно, если мы возьмем за единицу длины расстояние, которое шар проходит за первый интервал времени, то общее расстояние, пройденное им за все последующие интервалы, согласно закону будет: $1^2, 2^2, 3^2, 4^2$ и т. д. или $1, 4, 9, 16$ и т. д. Таким образом, расстояние, пройденное за каждый последовательный интервал времени, будет: $1, 4 - 1 = 3, 9 - 4 = 5, 16 - 9 = 7$ и т. д. (алгебраически, если общее расстояние, пройденное к концу n -ного интервала времени, равно n^2 , то расстояние, пройденное за последний интервал $n^2 - (n - 1)^2 = n^2 - n^2 + 2n - 1 = 2n - 1$).

Из своих наблюдений за зависимостью пройденного расстояния от времени Галилео сделал вывод, что скорость движения должна возрастать прямо пропорционально времени. Приведем доказательство этого утверждения, данное самим Галилео в «Диалоге о двух главнейших системах мира»:

«В случае движения с ускорением увеличение [скорости] является непрерывным, вы не можете разделить степени скорости [величины скорости, говоря современным языком], которая постоянно возрастает на любое определенное число, потому что, меняясь в каждый момент, их всегда остается бесконечное множество. Следовательно, нам будет лучше проиллюстрировать наше намерение с помощью треугольника ABC (рис. 2.5).

Представим себе сторону AC как множество одинаковых частей, их количество берем произвольно, например, AD, DE, EF, FG, GC , и проведем через точки D, E, F, G прямые, параллельные основанию BC . Теперь представим, что части, отмеченные на прямой AC , — это равные временные интервалы, а параллельные прямые, выходящие из точек D, E, F и G , — это степени скорости, которые увеличиваются одинаково за равные интервалы времени; и пусть точкой A обозначено состояние покоя, выйдя из которого тело за время, например, AD достигло скорости DH . Предположим, что за второй временной интервал скорость увеличилась с DH до EI и так далее, соответственно уве-

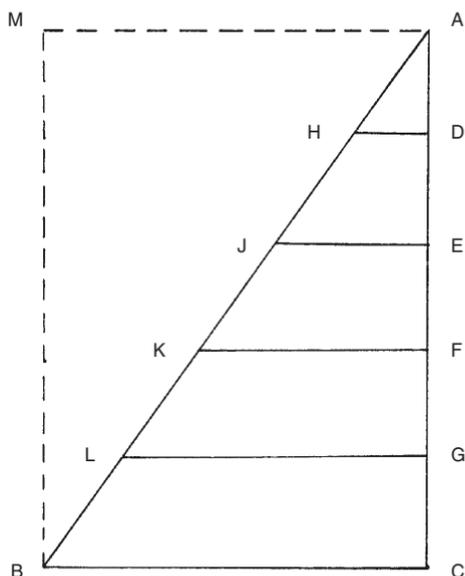


Рис. 2.5. Доказательство Галилея, что при (равномерном) движении с ускорением, начинающемся из состояния покоя, расстояние, пройденное движущимся телом, равно половине расстояния, которое прошло бы тело, если бы все время двигалось с постоянной скоростью

личению длины FK , GL и т. д. Но поскольку ускорение с одного момента до другого происходит непрерывно и не задерживается ни на одном из них, точка A представляет собой момент наименьшей скорости, то есть состояние покоя, а AD — первый от начала временной интервал, совершенно очевидно, что, прежде чем достичь степени скорости DH за время AD , тело должно пройти бесконечное количество меньших скоростей, которых оно достигает за бесконечное количество моментов между D и A , соответствующих бесконечному количеству точек на прямой DA . Следовательно, чтобы представить бесконечное количество степеней скорости, предшествующих степени DH , необходимо вообразить прямые, проведенные из бесконечного количества точек на DA параллельно DH , которые будут все короче и короче. Это бесконечное множество

прямых представляет собой поверхность треугольника ADH . Таким образом, можно представить, что любое расстояние, пройденное телом, движущимся из состояния покоя с постоянным ускорением, может быть пройдено с достижением бесконечного количества степеней скорости, возрастающих как бесконечно большое количество прямых линий начиная от точки A , параллельных HD и далее IE , KF и LG .

Теперь дополним рисунок до параллелограмма $AMBC$ и продолжим до стороны BM не только параллельные, отмеченные на стороне треугольника AC , но и все бесконечные воображаемые линии, которые можно провести через все точки AC ; тогда BC , являющаяся самой большой из бесконечного числа параллельных прямых, представляет для нас самую большую степень скорости, которая достигается при движении с ускорением, а вся поверхность указанного треугольника является множеством и суммой всех скоростей, с которыми за время AC тело проходит определенное пространство, точно так же параллелограмм является множеством, или суммой такого же числа скоростей, но каждая из них равна наибольшей скорости — BC . Это множество скоростей будет в два раза больше множества возрастающих скоростей в треугольнике, так же как указанный параллелограмм вдвое больше треугольника и, следовательно, если тело, которое, падая, приобретало ускоряющиеся степени скорости, соответствующие треугольнику ABC , прошло за такое время такое пространство, то вполне разумно и вероятно, что, двигаясь с постоянной скоростью, отвечающей параллелограмму, оно пройдет за то же время пространство вдвое большее, чем при движении с ускорением».

Читая этот текст с его многословным и тяжелым языком, не следует забывать, что он был написан в 1632 году и переведен на английский (Томасом Сейлсбери) в 1661-м! Помимо того, что это была первая формулировка закона свободного падения, процитированный выше отрывок из *Discorso* содержит первый шаг в развитии так называемого интегрального исчисления, в котором результаты получаются путем добавления бесконечного числа бесконечно

малых величин. В современных математических обозначениях закон Галилея о движении с постоянным ускорением можно записать, как:

$$\text{скорость} = \text{ускорение} \times \text{время},$$

или

$$\text{расстояние} = \frac{1}{2} \text{ ускорения} \times \text{время}^2.$$

Для свободного падения ускорение обычно обозначается буквой g (от gravity) и равно 981 см/с^2 , и это означает, что после того, как тело начнет падать, его скорость будет возрастать за секунду на 981 см/с . В англо-американских единицах g равно $32,2 \text{ фута/с}$ в секунду.

Другим важным вкладом Галилео в решение задач динамики была идея о сложном движении, которое можно продемонстрировать на следующем примере.

Предположим, что мы держим камень на высоте 5 футов от земли и даем ему упасть. Согласно приведенной выше формуле камень достигнет земли через $0,96 \text{ с}$ после начала падения, поскольку $\frac{1}{2} \times 32,2 \times (0,96)^2 = 5 \text{ футов}$. Что будет, если, бросая камень, мы придадим ему горизонтальную скорость, скажем, 10 футов/с ? На собственном опыте каждый знает, что в этом случае камень опишет кривую и упадет на землю на некотором расстоянии от бросавшего. Чтобы нарисовать траекторию движения камня для этого случая, мы должны считать, что камень движется в двух независимых направлениях: 1) горизонтально с постоянной скоростью, которую ему сообщили в момент броска; 2) вертикально в режиме свободного падения со скоростью пропорциональной времени.

Результат этих двух движений показан на рис. 2.6. На горизонтальной оси мы отложили равные промежутки, соответствующие расстоянию, проделанному камнем за первую секунду, вторую секунду и т. д. На вертикальной оси мы отложили расстояния, которые возрастают, как квадраты целых чисел, в соответствии с законом свободного падения. Реальное положение камня изображено маленькими кружочками, расположенными на кривой, известной как парабола. Если мы бросим камень со скоростью вдвое

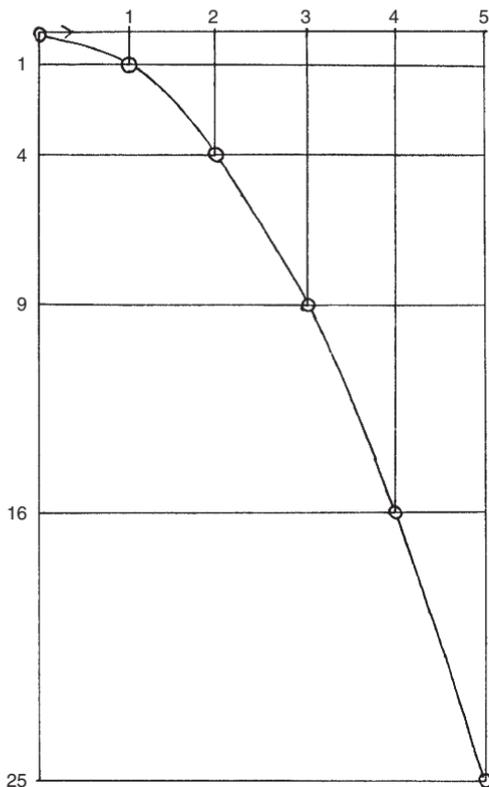


Рис. 2.6. Совокупность равномерного движения в горизонтальном направлении и движения с ускорением в вертикальном направлении. Результирующая кривая называется парабола

большой, он пролетит в горизонтальном направлении вдвое большее расстояние, в то время как его движение по вертикали останется прежним.

В результате камень упадет вдвое дальше от бросавшего, но время его полета в воздухе будет тем же самым. (Во всех этих рассуждениях мы пренебрегаем силой трения воздуха, которая слегка меняет траекторию полета камня.)

Интересным приложением того же принципа является задача о двух мальчиках, играющих в войну в джунглях (рис. 2.7). Один мальчик стоит на сучке дерева, другой

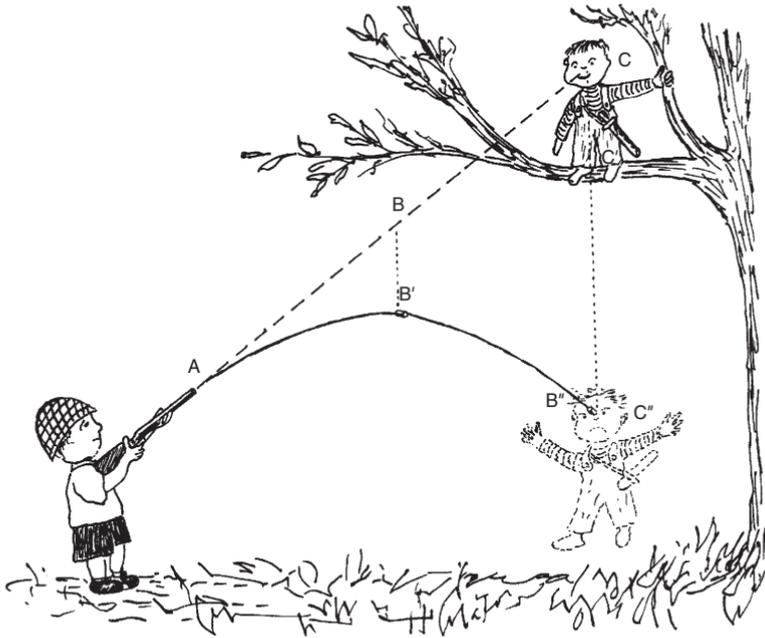


Рис. 2.7. Поскольку все тела падают с одним и тем же ускорением, если «пуля» выпущена первым мальчиком прямо в своего «врага», стоящего на сучке дерева, а он спрыгнет точно в момент выстрела, то «пуля» попадет прямо ему в нос

стреляет в него из игрушечного ружья. Предположим, что стрелок целится прямо в мальчика на дереве, и в тот момент, когда он спускает курок, второй мальчик спрыгивает с дерева и начинает падать на землю. Поможет ли ему это? Ответ: нет, и вот почему.

При отсутствии силы тяжести пуля летит по прямой ABC в точку, где изначально стоял мальчик. Однако, благодаря силе тяжести, как только пуля вылетит из дула ружья, она начнет падать вниз, и мы получим сложное движение: равномерное движение по линии ABC и движение с ускорением в вертикальном направлении. Поскольку все материальные объекты падают с одним и тем же ускорением, вертикальное движение пули и мальчика будет идентично. Таким образом, к тому моменту, когда пуля пришла бы в

точку B на полпути к своей изначальной цели, она в действительности уже упала на расстояние BB' , равное расстоянию CC'' , проделанному мальчиком в процессе падения. Когда при отсутствии силы тяжести пуля пришла бы в точку C , она в действительности и уже упала на расстояние CB'' (вдвое большее, чем BB'), равное расстоянию CC'' , проделанному падающим мальчиком. Следовательно, пуля попадет ему прямо в нос.

Вместо того чтобы бросать камень или стрелять, можно просто уронить предмет с движущегося объекта. Предположим, что мы роняем камень с вершины мачты быстроходного судна, приводимого в движение механическим путем (гребной галеры времен Галилео). В первый момент у камня будет та же горизонтальная скорость, что и у судна, и, значит, после того, как его отпустили, он продолжит двигаться по горизонтали с той же скоростью все время, пока находится выше основания мачты. Вертикальная компонента движения камня является свободным падением, и, таким образом, камень достигнет палубы прямо у подножия мачты. То же самое произойдет, если уронить предмет из движущейся машины, поезда или кабины самолета, независимо от того, с какой скоростью они движутся.

В наше время все это кажется очень простым и очевидным, но во времена Галилео это было не так. Согласно учению Аристотеля, доминировавшему в научной мысли той эпохи, считалось, что объект движется только до тех пор, пока его толкают, и останавливается, как только исчезаетдвигающая его сила. В соответствии с этой точкой зрения камень, который уронили с верхушки мачты, будет падать вниз вертикально, в то время как корабль идет вперед. Таким образом, следовало ожидать, что падающий камень достигнет палубы ближе к корме. Для средневековой схоластики характерно, что задачи такого рода обсуждались годами и никто не позаботился о том, чтобы залезть на мачту движущегося корабля и сбросить камень!

Такая ситуация ярко проиллюстрирована следующими словами из книги Галилео «Диалог о двух главнейших системах мира». Следуя традиции древнегреческих авторов, Галилео написал эту книгу в форме беседы трех человек из

чудо-города Венеции: *Сальвиати*, говорящего от имени автора; *Сагрето* — умного обывателя и *Симпличио* — не самого блестящего представителя Аристотелевой школы мышления. Здесь приведена выдержка из их спора в отношении камня, падающего с мачты движущегося корабля, и с башни, воздвигнутой на движущейся Земле:

Сальвиати: ...Аристотель говорит, что самым убедительным аргументом неподвижности Земли является то, что снаряды, брошенные или выпущенные из орудия вверх, возвращаются по той же самой перпендикулярной прямой на то же самое место, откуда они были брошены или выпущены. И это остается справедливым, даже если их движение достигает очень большой высоты. Тогда под большой высотой можно понимать выстрел из пушки прямо вверх. Другой аргумент, используемый Аристотелем и Птолемеем, состоит в том, что, по наблюдениям, тяжелые тела, падающие с высоты, опускаются прямо по прямой, перпендикулярной поверхности Земли. Теперь, когда я могу начать распутывать эти узлы, я спрашиваю Симпличио: в случае если кто-то стал бы отрицать утверждения Аристотеля и Птолемея, что тяжести в свободном падении с высоты движутся вниз по прямой перпендикулярной линии, направленной к центру Земли, что бы он использовал, чтобы доказать это?

Симпличио: Естественные чувства, которые убеждают нас, что башня или другая высота стоят прямо и перпендикулярно и показывают нам, что камень скользит вдоль стены, ни на волосок не отклоняясь ни в ту ни в другую сторону, и падает на землю ровно под тем местом, откуда упал.

Сальвиати: Но если окажется, что земной шар действительно движется по кругу, следовательно, несет башню вместе с собой, а камень скользит вдоль стены башни, то каким тогда должно быть его движение?

Симпличио: В этом случае мы, скорее, скажем «его движения», потому что, во-первых, он будет двигаться сверху вниз, а во-вторых, следовать за самой башней.

Сальвиати: Так, значит, это движение должно быть составлено из двух, из чего будет следовать, что движение камня будет описываться не как простое движение по пря-

мой перпендикулярной линии, а как поперечное и, возможно, не прямое.

Симпличио: Я ничего не могу сказать о его прямоте, но я хорошо понимаю, это что оно непременно будет поперечным.

Сальвиати: Значит, вы видите, что, просто наблюдая за падающим с башни камнем, вы можете утверждать, что его движение описывается прямой перпендикулярной линией, только если сначала предположите, что Земля неподвижна.

Симпличио: Верно, потому что, если бы Земля двигалась, движение камня было бы не перпендикулярным.

Сальвиати: Значит, защита Аристотеля состоит в невозможности, или, по меньшей мере, в предположении о невозможности того, что движение камня должно состоять из прямого и кругового. Потому что, если бы он не придерживался невозможности того, что камень может двигаться одновременно и к центру, и вокруг центра, он бы понял, что может произойти такое, что падающий камень может двигаться вниз вдоль стены башни и тогда, когда она движется, и тогда, когда она неподвижна. Следовательно, он должен был понимать, что из скольжения камня вдоль стены нельзя ничего предположить относительно подвижности или неподвижности Земли. Но это никоим образом не оправдывает Аристотеля, поскольку он должен был бы высказать это, если обладал знанием, которое стало бы столь весомой частью его аргументации. А еще потому, что нельзя сказать, что этот результат невозможен или что так считает Аристотель. Первое нельзя подтвердить, потому что я мало-помалу покажу, что это не только возможно, но даже необходимо. Второе неверно, поскольку сам Аристотель допускает, что огонь движется по прямой (вверх) и в то же время за день движется по кругу за счет того движения, которое небеса сообщают всей стихии огня и большей части верхних слоев воздуха. Следовательно, он допускает сложное движение, состоящее из прямого движения вверх и кругового движения...»

Далее в «Диалоге» Сальвиати предлагает очень интересный эксперимент, придуманный, чтобы доказать его точку зрения, изложенную в предшествующей дискуссии:

«Если я не ошибаюсь, вы проявляете в этом вопросе большую шепетильность, когда речь идет о птицах, которые, будучи живыми, способны использовать свою силу против естественного движения, заложенного в земных телах. Например, мы видим, как они летят вверх, что было бы невозможно для других обладающих весом тел, но, когда они мертвы, они могут лишь падать вниз. Следовательно, вы считаете, что соображения, применимые ко всем упомянутым выше предметам, не могут быть применены к птицам. Это совершенно верно, и, поскольку это верно, мы наблюдаем, что птицы ведут себя иначе, чем падающие предметы. Если с верхушки башни отпустить мертвую птицу и живую птицу, то мертвая поведет себя так же, как камень, то есть, во-первых, будет следовать общему суточному движению и, во-вторых, двигаться вниз, как камень. Но если птица живая, что мешает ей (ее суточное движение по-прежнему сохраняется) прибегнуть к помощи крыльев и полететь в ту точку горизонта, куда ей захочется? И это новое движение, свойственное птице, в котором мы не принимаем участия, должно обязательно быть видимым для нас. Говоря кратко, результат полета птиц ничем не отличается от полета снарядов, выпущенных из орудия или брошенных в любой части мира, не считая того, что снаряды движутся за счет внешней силы, а птицы — за счет внутренней.

Для финального доказательства ничтожности всех предлагавшихся раньше экспериментов я считаю, что сейчас самое время и место продемонстрировать способ, как испытать их все. Закройтесь с каким-нибудь другом в самом просторном помещении под палубой большого корабля и поместите туда комаров, мух и других мелких крылатых существ. Кроме того, раздобудьте большую ванну с водой, куда запустите нескольких рыб; подвесьте бутылку, откуда вода по капле будет перетекать в другую бутылку с узким горлом, помещенную снизу. Затем, когда корабль стоит неподвижно, понаблюдайте, как и с какой скоростью летают мелкие крылатые создания в разные стороны комнаты; как плавают рыбы во все стороны; и как капли капают в нижнюю бутылку. Бросая что-либо своему другу, вам не нужно

прилагать один раз больше силы, чем другой, при условии, что расстояние не меняется; и, делая большой прыжок, вы каждый раз будете прыгать на одинаковое расстояние. По-наблюдав за всеми этими частностями, чтобы ни у кого не осталось сомнений, что, пока судно стоит, все происходит именно таким образом, приведите судно в движение с любой, какой хотите, скоростью, но так, чтобы движение было равномерным и не колебалось туда-сюда. Вы не сможете заметить никаких изменений в движениях, обозначенных выше, или каким-то образом определить по ним, плывет корабль или стоит на месте. Причина такого постоянства состоит в том, что движение корабля является общим для всех вещей, находящихся на нем, включая воздух. Я имею в виду тот случай, когда все эти вещи заперты в комнате; но в случае, если они находятся на палубе на открытом воздухе и не вынуждены следовать курсу корабля, вы будете наблюдать более или менее заметные отличия в некоторых из вышеупомянутых вещей; несомненно, что дым будет отставать так же, как сам воздух; мухи и комары, которым будет мешать воздух, не смогут следовать движению корабля, если окажутся на некотором расстоянии от него, но если будут держаться близко, то за счет того, что корабль увлекает с собой часть окружающего его воздуха, смогут следовать за ним без особых трудностей. По той же причине мы иногда видим, что досаждающие лошадям мухи следуют за скачущими лошадьми на близком расстоянии то от одной, то от другой части тела лошади. Но для падающих капель разница будет очень маленькой, а прыжки и другие траектории тяжелых тел останутся без изменений.

Сагрето: Хотя мне не приходило в голову делать такие наблюдения, когда я был в море, я уверен, что они бы с успехом повторили то, о чем вы рассказали. В подтверждение этому я вспоминаю, что, находясь в каюте, я сотни раз задавался вопросом, плывет корабль или стоит, и иногда принимал одно за другое. Таким образом, я полностью удовлетворен и убежден в ничтожности всех экспериментов, представленных в качестве доказательства противоположной позиции.

Теперь остаются только возражения, основанные на том, что показывает нам опыт, а именно что стремительное движение по кругу имеет свойство отбрасывать и рассеивать вещества, оказавшиеся вблизи крутящейся машины. На этом основаны мнения многих людей, включая Птолемея, что, если бы Земля крутилась с такой большой скоростью, камни и существа на ней были бы отброшены в небо и не нашлось бы строительного раствора, достаточно сильного, чтобы удержать строения на фундаментах, чтобы они не разрушились...»

В наши дни утверждение, что, находясь в закрытой каюте корабля, невозможно, выполняя какие-либо механические эксперименты, определить, стоит ли корабль на якоре или плывет по морю, известно как «принцип относительности Галилея». Потребовалось почти три века развития физики, прежде чем этот принцип был расширен Альбертом Эйнштейном на случай оптических и электромагнитных явлений, наблюдаемых в закрытой равномерно движущейся каюте. Таков вклад Галилея в механику.

Галилео — астроном

Галилео был не только первым физиком экспериментатором и теоретиком, он также внес огромный вклад в астрономию, открыв человечеству бесконечные горизонты окружающего нас мироздания. Впервые небо привлекло его внимание в 1604 году, когда однажды на ночном небосклоне среди созвездий, тысячи лет известных звездочетам, вдруг появилась новая звезда. Галилео, которому в то время было 40 лет, продемонстрировал, что эта новая звезда действительно является звездой, а не каким-нибудь метеором в земной атмосфере, и предсказал, что она будет постепенно угасать. Появление новой звезды на небе, которое согласно философии Аристотеля и учению церкви, считалось абсолютно неизменным, создало Галилео много врагов среди его ученых коллег и среди высшего духовенства. Всего через несколько лет после этого первого шага в изучении неба Галилео совершил революцию в астроно-

мии, создав первый астрономический телескоп, который он описал следующими словами: «Около десяти месяцев назад до наших ушей дошел слух, что один голландец сделал оптический инструмент, благодаря помощи которого видимые объекты, даже очень далекие от наблюдателя, стали хорошо различимы, как если бы находились под рукой, и из уст в уста передавались рассказы, которым одни верили, другие нет. Через несколько дней то же самое подтвердило мне письмо, посланное из Парижа знатным французом Жакобом Бадовером, и это, в конце концов, послужило причиной, заставившей меня полностью погрузиться в поиски теории и отыскать средства, позволяющие изобрести похожий инструмент, чего я добился немного позднее, изучая теорию рефракции. Сначала я подготовил трубку из свинца, на концах которой прикрепил две линзы, обе плоские с одной стороны; с другой стороны одна линза была сферически выпуклая, другая сферически вогнутая».

Сделав этот прибор, он направил его на небо, и его глазам открылись чудеса мироздания. Он посмотрел на небо и обнаружил, что «поверхность Луны не идеально гладкая, лишенная неоднородностей и абсолютно круглая, как полагали многие философы в отношении Луны и других небесных тел, а совсем наоборот, содержит множество неоднородностей, неровностей, множество углублений и выпуклостей, совсем как поверхность Земли, которая то и дело меняется от высоких гор до глубоких ущелий».

Он увидел планеты и обнаружил, что «планеты представляют собой идеально круглые диски, совсем как их описывают с помощью пары компасов, и выглядят, как множество маленьких лун, полностью освещенных и имеющих форму шара; но неподвижные звезды кажутся невооруженному глазу [должно быть, это первый случай употребления такого выражения!] не ограниченными окружностью, а, скорее, вспышками света, испускающими лучи во все стороны и очень искрящимися, и в телескоп они кажутся имеющими такую же форму, как если смотреть на них просто так».

7 января 1610 года он увидел Юпитер и отметил следующее: «Около планеты находились три меленьких, но очень ярких звезды, и, хотя я решил, что они принадлежат к чис-

лу неподвижных звезд, они заставили меня задуматься, поскольку казались расположенными ровно по прямой линии, параллельной эклиптике, и сияли ярче остальных звезд, равных им по размеру... На восточной стороне было две звезды, а к западу — одна... Но когда 8 января, ведомый какой-то неизбежностью, я снова посмотрел на ту же часть неба, обнаружил совершенно иное положение вещей, потому что там было три маленьких звезды, все к западу от Юпитера и ближе друг к другу, чем в предыдущую ночь».

Таким образом, Галилео решил, что «на небе существует три звезды, вращающиеся вокруг Юпитера, как Венера и Меркурий вращаются вокруг Солнца».

Он посмотрел на Венеру и Меркурий и обнаружил, что временами они имеют такую же форму полумесяца, как Луна, из чего он заключил, что «Венера и Меркурий вращаются вокруг Солнца, как и все остальные планеты. Истина, в которую верили приверженцы школы Пифагора, Коперник и Кеплер, но которая никогда не была подтверждена свидетельствами наших чувств, как это теперь подтверждено для случая Венеры и Меркурия».

Он посмотрел на Млечный Путь и обнаружил, что он «...не что иное, как бесчисленная масса звезд, собранных вместе в виде скоплений».

Открытия Галилео, сделанные при помощи телескопа, дали неопровержимое доказательство правильности системы Коперника, и он стал торжествующе рассказывать об этом. Но это было определенно больше, чем могла позволить святая инквизиция. Галилео был арестован, подвергнут длительному заключению в одиночной камере и допросам, которые, видимо, не сломили его боевой дух! За несколько месяцев до окончания процесса, 15 января 1633 года, Галилео написал своему другу Элии Диодати: «Если я спрошу, кто создал Солнце, Луну, Землю и звезды, их движение и расположение, мне, вероятно, скажут, что их создал Бог. Если я продолжу спрашивать, кто создал Священное Писание, мне наверняка скажут, что это сделал Святой Дух, то есть тоже Бог. Если я спрошу, есть ли в Священном Писании слова, которые явно противоречат истине, чтобы удовлетворять пониманию масс — как правило, необразо-

ванных, — мне скажут, подкрепляя это многочисленными цитатами из всех освященных писателей, что это действительно в обычае Священного Писания, содержащего сотни отрывков, которые, будучи понятыми буквально, не содержат ничего, кроме ереси и богохульства, потому что в них Бог предстает сущностью, полной ненависти, вины и беспамяательства. Теперь, если я спрошу, было ли такое, чтобы Бог, как его понимают массы, когда-нибудь менял свои творения, или, иными словами, всегда ли Природа, неизменная и недоступная для человеческих желаний, сохраняла одни и те же виды движения, формы и деления в мироздании, мне наверняка скажут, что Луна всегда была круглой, хотя ее долго считали плоской. Короче говоря, никто не поддержит мнение, что Природа когда-либо менялась, чтобы сделать свои творения удобопонятными для людей. Если это так, то я спрашиваю, почему для того, чтобы достичь понимания разных частей мира, мы должны начать с изучения Слова Божьего, а не с его Творений. Неужели Творение менее почитаемо, чем Слово? Если бы кто-то считал ересью говорить, что Земля движется, и если бы затем эксперименты показали, что это действительно так, то разве церковь не столкнулась бы с трудностями? Напротив, если бы творения и слова не могли прийти к согласию и мы считали бы Священное Писание вторичным, то от этого не было бы никакого вреда, поскольку его часто меняли, чтобы оно соответствовало массам, и часто приписывали Богу ложные качества. Следовательно, я должен спросить, почему мы настаиваем, что, когда бы ни заговорили о Солнце или о Земле, Священное Писание будет считаться абсолютно непогрешимым?»

23 июня 1633 года в возрасте 69 лет Галилео предстал перед судьями святой палаты и, стоя на коленях, «покаялся»:

«Я, Галилео Галилей, сын покойного Винченцо Галилея из Флоренции, 70 лет*, самолично поставленный перед судом, преклонив колена пред их эминенциями, достойными кардиналами генерал-инквизиторами против ере-

* На самом деле Галилео было 69 лет.

тической злобы во всем христианском мире, имея пред глазами Святое Евангелие, коего касаюсь собственными руками, клянусь, что всегда веровал, ныне верую и с помощью Божьей впредь веровать буду во все, что святая католическая и апостольская римская церковь за истинное приемлет, что проповедует и чему учит. Но так как я — после того, как мне от сего судилища сообщено было повеление, чтобы совсем оставил ложное мнение, будто Солнце есть центр мира и неподвижно, Земля же не центр и движется, и чтобы не смел держаться такого ложного мнения, не защищал его и не преподавал каким-либо способом или писанием, и после того, как мне указано было, что учение то противно Священному Писанию, — написал и напечатал книгу, в которой излагаю это осужденное уже учение и привожу с настойчивостью аргументы в его пользу, не давая опровержения оных, то подвергся посему суду, как сильно заподозренный в ереси, а именно что держусь мнения и верю, будто Солнце — центр мира и недвижно, Земля же движется. Желая изъять из умов ваших эминенций и всякого христианина-католика сие сильное, справедливо возникшее против меня подозрение, я с чистым сердцем и верою не ложною отрекаюсь от упомянутых заблуждений и ересей, проклинаю их и отвращаюсь от них и вообще от всяких заблуждений и сект, противных сказанной святой церкви. Клянусь, что в будущем ни устно, ни письменно не выскажу чего-либо способного возбудить против меня подобное подозрение. И если узнаю какого-либо еретика или внушающего подозрение в ереси, не премину донести о нем священному судилищу или инквизитору и ординарию того места, где буду находиться. Клянусь, кроме того, и обещаю все епитимьи, наложенные на меня или кои будут наложены, с точностью исполнять и соблюдать. А если, сохрани Боже, совершу что-либо противное сим моим обещаниям, протестациям и клятвам, то подлежу всем наказаниям и казням, кои священными канонами и другими общими и частными постановлениями постановлены и обнаружены против такого рода нарушителей. Да поможет мне Бог и Святое его Евангелие, коего касаюсь руками.

В удостоверение того, что я, Галилео Галилей, как выше приведено, отрекся, обещал и обязал себя, я собственноручно подписал сей акт и от слова до слова прочел его в Риме, в монастыре Минервы сего 22 июня 1633 года».

Существует история о том, что сразу же после своего «покаяния» Галилео воскликнул: «Eppur si muove!» («И все же она вертится!»), но это не правда и всего лишь почва для старого анекдота, согласно которому Галилео смотрел на вертящийся хвост дружелюбной собаки, по ошибке зашедшей в помещение святой инквизиции. Осужденный за ересь Галилео был помещен на свою виллу Арцетри вблизи Флоренции, как мы сейчас сказали бы, «под домашний арест». 8 января 1642 года полностью ослепший и уставший от жизни Галилео умер.

Глава 3

И СКАЗАЛ ГОСПОДЬ: «ДА БУДЕТ НЬЮТОН!»

В тот год, когда в своем флорентийском заточении умер Галилео, в семье фермера из Линкольншира по фамилии Ньютон родился первый ребенок, которого при крещении назвали Исаак. В первые годы учебы в школе Исаак не демонстрировал никаких признаков своего будущего величия. Он был мягким застенчивым мальчиком, немного отстающим в учебе. Из этого состояния его вывела первая драка с одноклассником, который, будучи одним из лучших учеников в классе, вел себя очень агрессивно по отношению к другим мальчикам. Получив от этого хулигана (чье имя не сохранилось в истории) удар в живот, Ньютон вызвал его на бой и победил благодаря «превосходству духа и решимости». Победив на физическом фронте, он решил дополнить свою победу в битве интеллектуальной и благодаря упорному труду сумел стать первым учеником в классе. Выиграв еще одну битву, на этот раз со своей матерью, которая хотела, чтобы он стал фермером, Ньютон в возрасте 18 лет поступил в Тринити-колледж и посвятил себя изучению математики. В 1665 году Ньютон получил степень бакалавра, но без каких-либо особенных достижений.

Успехи во время эпидемии

В разгар лета 1665 года в Лондоне началась Великая чума, и в течение нескольких месяцев один из каждых десяти лондонцев умер. Осенью университет в Кембридже закрылся из-за близости к центру эпидемии, и всех студен-

тов отправили по домам. Ньютон вернулся в родительский дом в Линкольншире, где и оставался в течение восемнадцати месяцев, пока университет не открыли снова.

Эти восемнадцать месяцев деревенского заточения стали самыми продуктивными в его жизни, и можно сказать, что именно в этот период у него родились все идеи, за которые ему благодарен мир.

Цитируя его собственные слова: «В начале 1665 года я нашел... правило, позволяющее свести бином любой степени к последовательности [так называемый бином Ньютона]. В мае того же года я разработал метод тангенсов... в ноябре прямой метод флуктуаций [то есть элементы того, что теперь называется дифференциальным исчислением], в январе следующего года получил теорию цветов, затем, в мае, я подошел к обратному методу флуктуаций [то есть к интегральному исчислению], в том же году я начал думать о том, чтобы расширить тяготение до орбиты Луны... и... сравнил силу, необходимую для удержания Луны на ее орбите, с силой тяготения на поверхности Земли».

Вся дальнейшая научная деятельность Ньютона была посвящена развитию идей, зародившихся в Линкольншире.

В возрасте 26 лет он был назначен профессором Кембриджского университета, а в тридцать избран членом Королевского общества — высшего научного сообщества Англии. Согласно его биографам, Ньютон был идеальным примером рассеянного профессора. Он «никогда не отдыхал и не проводил время, катаясь на лошади, прогуливаясь, играя в шары или занимаясь какими-то другими упражнениями, считая все время, которое пошло не на исследования, потраченным зря». Часто он работал почти до рассвета, забывая поесть, а если и появлялся в университетской столовой, то «его туфли были потрепаны, чулки не подвязаны, а голова плохо причесана». Будучи постоянно поглощен своими мыслями, он был очень наивен и непрактичен в повседневных делах. Рассказывают, что однажды Ньютон проделал дыру в двери своего дома, чтобы его кошка могла входить и выходить. Когда у кошки появились котята, он к большой дыре добавил маленькие для каждого котенка.

Как человек Ньютон был не очень приятным и часто вступал в споры с коллегами, что могло быть отражением его столкновения с одноклассником годами раньше. Он страшно поссорился с другим кембриджским физиком, Робертом Хуком (создателем теории упругости), из-за своей теории цвета, а также из-за приоритета в открытии закона всемирного тяготения. Кроме того, по вопросу приоритета у него были стычки с немецким математиком Готфридом Лейбницем из-за дифференциального исчисления и с голландцем Кристианом Гюйгенсом из-за теории света. Астроном Джон Флемстид практически перестал разговаривать с Ньютоном, описывая его как «коварного, амбициозного, чрезвычайно скупого на похвалу и несдержанного в споре... хорошего человека по существу, но не по характеру».

Во время своей работы в Кембридже Ньютон трудился над развитием своих блестящих идей, появившихся у него в возрасте 23—25 лет, но держал большинство своих открытий в секрете. Это следует из того, что их полное описание было опубликовано гораздо позже: работы по механике и тяготению он опубликовал в возрасте 44 лет, а работу по оптике — в 65 лет.

Principia Ньютона

В предисловии (датированном 8 мая 1686 года) к своей книге *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* («Математические начала натуральной философии»*) Ньютон писал:

«Так как древние придавали большое значение механике при изучении природы, то новейшие авторы, отбросив субстанции и скрытые свойства, стараются подчинить явления природы законам математики. В этом сочинении имеется в виду тщательное развитие приложений математики к физике. Древние рассматривали механику двояко: как рациональную (умозрительную), развиваемую точными доказательствами, и как практическую. К практической

* Натуральной философией в то время называлось изучение законов природы.

механике относятся все ремесла и производства, именуемые механическими, от которых получила свое название и сама механика. Так как ремесленники довольствуются в работе лишь малой степенью точности, то сложилось мнение, что механика тем отличается от геометрии, что все вполне точное принадлежит к геометрии, а менее точное относится к механике. Но погрешности заключаются не в самом ремесле или искусстве, а принадлежат исполнителю работы: кто работает с меньшей точностью, тот — худший механик, и, если бы кто-нибудь смог исполнять изделия с совершеннейшей точностью, тот был бы наилучшим из всех механиков...

Мы же, рассуждая не о ремеслах, а об учении о природе и, следовательно, не об усилиях, производимых руками, а о силах природы, будем заниматься главным образом тем, что относится к тяжести, легкости, силе упругости, сопротивлению жидкостей и к тому подобным притягательным или напирющим силам. Поэтому и сочинение это нами предлагается как математические основания физики. Вся трудность физики, как будет видно, состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления...

Было бы желательно вывести из начал механики и остальные явления природы, рассуждая подобным же образом, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления обуславливаются некоторыми силами, с которыми частицы тел, вследствие причин покуда неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или же взаимно отталкиваются друг от друга. Так как эти силы неизвестны, то до сих пор попытки философов объяснить явления природы остались бесплодными. Я надеюсь, однако, что или этому способу рассуждения, или другому, более правильному, изложенные здесь основания доставят некоторое освещение».

В процитированных выше словах Ньютон излагает программу так называемого «механистического представления» всех физических явлений, доминировавшую в физике вплоть до начала XX века, и уступившую свои позиции под влиянием теории относительности и квантовой теории. Сформу-

лировав свою цель, Ньютон продолжил развивать математическое описание механики в терминах настолько ясных и точных, что их можно без изменения использовать в любой современной книге по классической механике. Мы приведем здесь начальные пассажи из ньютоновской *Principia* всего с несколькими комментариями (в квадратных скобках), чтобы пояснить современные значения научных терминов XVII века.

О п р е д е л е н и я

«Определение I. Количество вещества [масса] является его мерой, зависящей одновременно от его плотности и объема.

Таким образом, воздух двойной плотности в двойном пространстве [объеме] будет по количеству больше в четыре раза, в тройном пространстве [объеме] — количество большее в шесть раз. То же самое относится к снегу и мелкой пыли, или пудре, которые сгущены путем сжатия, или сжижения, и ко всем телам, которые по какой-то причине сжаты различными способами... [Выражаясь современным языком, мы скажем, что масса любого предмета получается умножением его плотности на объем.]

Определение II. Количество движения является его мерой, зависящей одновременно от скорости движения и количества вещества. [Современным языком мы говорим, что количество движения, обычно называемое импульсом движения, или просто «импульсом», получается умножением скорости на массу движущегося объекта.]

Движение целого представляет собой сумму движения всех его частей, и, следовательно, для тела с двойным количеством [с удвоенной массой] и той же скоростью движение [импульс] будет вдвое большим, со скоростью вдвое большей — в четыре раза большим.

*Определение III. *Vis insita*, или природная сила, — это сила сопротивления, благодаря которой всякое тело, в зависимости от того, сколько силы у него есть, продолжает оставаться в этом состоянии, будь то состояние покоя или равномерного движения вперед по прямой линии.*

Эта сила всегда пропорциональна телу [массе] и ничем не отличается от инертности массы в нашем ее понимании.

Благодаря природной инертности вещества, тело трудно вывести из состояния покоя или движения. На основании этого самым подходящим именем для данной *vis insita* может быть инерция (*vis inerciae*), или сила инерции...

Определение IV. Приложенная сила — это действие в отношении тела, направленное на изменение его состояния: либо состояния покоя, либо равномерного прямолинейного движения.

Эта сила состоит только в действии и не сохраняется в теле, когда действие закончено. Потому что тело сохраняет каждое новое состояние [движения], благодаря одной своей инерции. Но приложенная сила может иметь разное происхождение: как, например, удар, давление или центростремительная сила».

Получив определения для таких понятий, как «масса», «импульс», «инерция» и «сила», Ньютон сформулировал основные законы движения:

«Закон I. Каждое тело продолжает находиться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока оно не будет изменено приложенной к нему силой [рис. 3.1, а].

Снаряды продолжают свое движение до тех пор, пока не будут заторможены сопротивлением воздуха или их не заставит опуститься вниз сила тяготения. Волчок, части которого за счет их сцепления постоянно отклоняются от прямолинейного движения, не перестанет вертеться, пока его не остановит воздух. Более крупные тела планет или комет, встречая меньшее сопротивление в свободных пространствах, сохраняют свое прямолинейное и круговое движение в течение более длительного времени.

Закон II. Изменение движения [то есть импульс] пропорционально приложенной движущей силе и направлено по прямой линии в направлении, в котором приложена эта сила [рис. 3.1, б].

Если сила вызывает движение, то удвоенная сила вызовет удвоенное движение, тройная сила — тройное движение, независимо от того, будет ли эта сила приложена сразу или постепенно и последовательно. И если до этого тело двигалось, то это движение (будучи всегда направлено

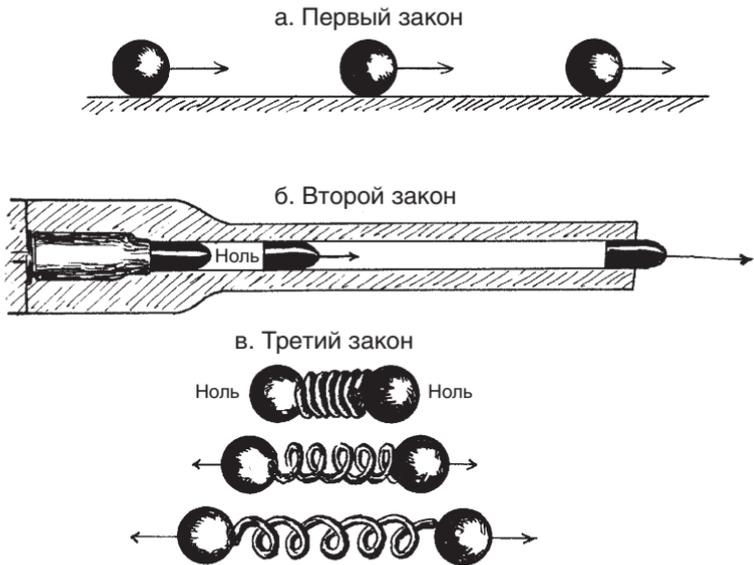


Рис. 3.1. Три закона Ньютона: шар на горизонтальной плоскости, на который в направлении его движения не действует никакая сила, движется по прямой с постоянной скоростью (*а*); пуля, находящаяся в дуле ружья, выталкиваемая пороховыми газами, движется с постоянно увеличивающейся скоростью (*б*); на два шара действует одинаковая сила сжатой пружины, помещенной между ними, если, как изображено на рисунке, они имеют равную массу, то будут двигаться в разных направлениях с одинаковой скоростью (*в*)

туда же, куда приложена эта сила) прибавляется, или вычитается из имевшегося движения в зависимости от того, совпадают ли они друг с другом по направлению или направлены в противоположные стороны; если же они направлены под углом друг другу, то, соединившись, они порождают новое движение, составленное из этих двух».

Второй закон Ньютона можно сформулировать несколько иначе. Поскольку количество движения равняется массе движущегося объекта, умноженной на его скорость, то величина изменения движения будет равняться массе, умноженной на величину изменения скорости, то есть ускорение. Таким образом, получаем, что ускорение объекта,

действующее на него благодаря какой-то силе, прямо пропорционально этой силе и обратно пропорционально массе объекта. На основании этого закона мы можем ввести единицу силы, определив ее как силу, действующую на объект массой 1 г, которая каждую секунду сообщает ему ускорение 1 см/с. Эта единица силы называется *дина*, и она достаточно маленькая, примерно такая, которую прикладывает муравей, чтобы толкать свою ношу. В инженерном деле часто используется единица, которая в 10^5 раз больше и называется *ньютон*.

Когда сила, действуя на какой-то объект, перемещает его на определенное расстояние, результат умножения силы на расстояние называется *работой*, проделанной этой силой. Если сила выражена в динах, а расстояние в сантиметрах, то работа будет измеряться в единицах, называемых *эргами*. В инженерных целях используется гораздо большая единица энергии, которая называется *джоулем*; 1 джоуль равен 10^7 эрг. Можно также ввести единицу мощности, которая будет говорить, сколько работы делается в единицу времени. Обычно ее измеряют в эргах в секунду, и у нее нет специального названия. В инженерных целях используют *ватт*, равный 1 джоулю в секунду, или 10^7 эрг/с, или лошадиную силу, равную 751 ватт, или 0,751 киловатта.

«Закон III. Каждому действию всегда противостоит равная ему реакция, иначе говоря, взаимные действия двух тел друг на друга всегда равны между собой и направлены в противоположные стороны [рис. 3.1, в].»

Какое бы тело ни двигало другое или ни давило на него, оно подвергается со стороны этого другого такому же воздействию. Если вы надавите пальцем на камень, камень всегда будет давить на этот палец. Если лошадь тащит камень, привязанный на веревке, то камень (если можно так сказать)... будет точно так же тащить лошадь назад и препятствовать ее продвижению точно так же, как она его тащит...»

Тогда почему, спросят некоторые, лошадь тащит камень, а не камень тащит лошадь? Ответ, конечно, в том, что их сила трения о землю различна. Четыре конских копыта сцепляются с грунтом сильнее, чем камень, который

тащит лошадь, и, если бы это было не так, камень остался бы на месте, а копыта лошади проскальзывали бы. Если поставить камень на ролики, это еще уменьшит силу трения и работа лошади станет гораздо легче. Когда трение отсутствует, что почти соответствует действительности для ледяной поверхности замерзшего пруда, движение двух объектов, один из которых тащит или толкает другой, тоже не будет прежним, если только их массы не равны друг другу, поскольку для приложенной силы ускорение всегда пропорционально массе. Если худой и толстый человек, стоя лицом к лицу на ледяной поверхности, толкнут друг друга, то худой отъедет назад с гораздо большей скоростью, чем толстый. Точно так же скорость отдачи у ружья будет гораздо меньше, чем скорость (гораздо более легкой) пули, выпущенной из его дула.

Принцип отдачи используется при создании любых видов ракет. Газы, полученные при сгорании ракетного топлива, с большой скоростью вылетают из сопла и в результате толкают ракету вперед. Окончательная скорость ракеты, полученная при выгорании топлива, зависит от отношения веса ракеты и веса топлива, и для достижения высокой производительности нужно, чтобы это отношение было как можно меньше. Для современных ракет отношение веса пустой ракеты к весу топлива почти такое же, как отношение пустой яичной скорлупы к телу самого яйца.

Здесь не место, чтобы обсуждать инженерные задачи современного ракетостроения, и мы ограничимся упоминанием одного инцидента, произошедшего на большом испытательном полигоне на мысе Канаверал во Флориде. В начале первого урока в первом классе начальной школы учителю захотелось узнать, что мальчики и девочки знают о трех R*. «Я знаю», — вызвался маленький Джонни. «Давай, — сказал учитель, — называй». «Десять, девять, восемь, — начал Джонни. — Семь, шесть, пять, четыре, три, два, один... к черту!»

* Отсыл к истории с малограмотным лорд-мэром Лондона, который, произнося тост за три R, имел в виду Reading, [w]riting and [a]rithmetic, то есть чтение, письмо и арифметику.

Возвращаясь к Ньютону в связи с задачами космических полетов, следует упомянуть, что он был первым, у кого появилась мысль о спутнике Земли. В третьей части своей *Principia* он пишет: «То, что за счет центростремительной силы планеты могут оставаться на определенных орбитах, можно легко понять, если рассмотреть движение снарядов. Камень, который, как предполагается, под давлением собственного веса вынужден отклониться от своего первоначального прямолинейного пути и, описав в воздухе кривую, в конце концов падает на землю; и чем больше скорость, с которой он брошен, тем больше расстояние, которое он пролетит, прежде чем упасть. Следовательно, мы можем предположить, что его скорость можно увеличить настолько, что он, прежде чем достигнет земли, опишет дугу в 1, 2, 5, 10, 100, 1000 миль и так далее, пока наконец не выйдет за пределы Земли и не окажется в космосе, не коснувшись ее. Пусть *AFB* [рис. 3.2] представляет поверхность Земли, *C* — ее центр, *VD*, *VE*, *VF* — кривые, которые описывает тело, брошенное в горизонтальном направлении с вершины большой горы [где-нибудь в горах Шотландии, несомненно] со все большей и большей скоростью. Благодаря тому, что небесные движения почти не замедляются маленьким или вовсе никаким сопротивлением пространства, где они происходят, чтобы соблюсти равенство вариантов, предположим, что около Земли тоже нет воздуха или что он наделен маленькой или никакой способностью к сопротивлению. Тогда по тем же причинам, по которым тело с меньшей скоростью описывает меньшую дугу *VD*, а тело с большей скоростью — большую дугу *VE*, увеличивая скорость, оно будет улетать все дальше и дальше к *F* и *G*. Если же скорость увеличить еще больше, оно, в конце концов, выйдет за пределы земной окружности и вернется на гору, с которой было брошено...»

«Но если мы теперь представим себе тела, брошенные в направлении линий, параллельных горизонту, с таких увеличивающихся высот, как 5, 10, 100, 1000 и более миль, или равных нескольким полудиаметрам Земли, то эти тела, в соответствии со своими скоростями и разной силой тяготения на разных высотах, будут описывать дуги либо

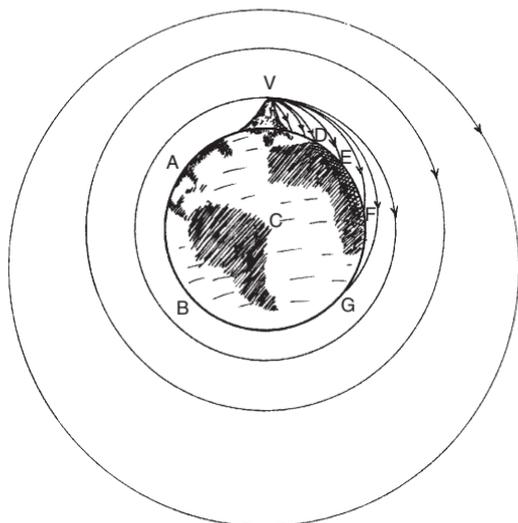


Рис. 3.2. Траектория спутника Земли как предельный случай траектории снарядов, падающих все дальше и дальше от горы, с которой их выпустили (адаптация оригинального рисунка из *Principia* Ньютона)

концентрические по отношению к Земле, либо эксцентрические и продолжают вращаться по этим орбитам, совсем как планеты вращаются по своим орбитам».

Этот пассаж содержит мысль о том, что одна и та же сила — сила тяжести — ответственна и за падение камня, и за движение небесных тел. Мысль, которая якобы впервые пришла в голову Ньютону, когда он наблюдал за падающим с дерева яблоком. Независимо от того, правдива эта «яблочная» теория или нет, она послужила поводом для написания забавного стихотворения, приведенного ниже:

Ньютон задумчиво гулял перед обедом,
Но был замечен фермером-соседом.
Пришлось ему, чтоб грубияном не прослыть,
О тяготенье мысли отложить
И у калитки в сад соседа
Остановиться для беседы.
А за забором яблони цвели,
От ветра наклоняясь до земли.

Сосед сказал Ньютону: «Стой!
Хочу поговорить с тобой.
По городу упорный слух идет,
Что ты снискал и славу, и почет,
И все, как говорят, за яблоки свои.
Подробно мне об этом Расскажи».

«Что ж, я готов, — кивнул ему Ньютон.
— Я расскажу тебе про свой закон.
Есть сила в нашем мире, и она
Над яблоками и Луной вольна.
И рано или поздно настает момент,
Когда она...»

«О нет, о нет! Достаточно, — не выдержал сосед.
— До этой силы мне и дела нет.
Ну, действует она, бог с ней, пускай.
Ты, главное, про яблоки всей правды не скрывай».
Сэр Исаак смутился и затих.
«Скажи мне, сколько ты берешь за них?»

Чтобы установить зависимость силы тяжести от расстояния до центра Земли, Ньютон решил сравнить падение камня (или яблока) на поверхность Земли с движением Луны, которое, согласно приведенной выше аргументации, можно также рассматривать как бесконечное падение. Таким способом Ньютон смог сравнить «астрономическую» силу, действующую на Луну, с «земной» силой, действующей на предметы, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни.

Его аргумент в несколько измененном виде представлен на рис. 3.3, где показана Луна, вращающаяся вокруг Земли по круговой (почти) орбите. В точке M Луна обладает определенной скоростью, перпендикулярной радиусу этого круга.

Если бы никаких сил не было, Луна продолжила бы движение по прямой и за единицу времени оказалась бы в точке M' . Однако с учетом того, что она оказалась в точке M'' , отрезок $M'M''$ следует рассматривать как расстояние, пройденное Луной в единицу времени в процессе ее *свободного падения в сторону* Земли. Согласно теореме Пифагора: $M'M'' = \sqrt{(EM^2 + (MM')^2} - EM$ (поскольку $EM'' = EM$), что,

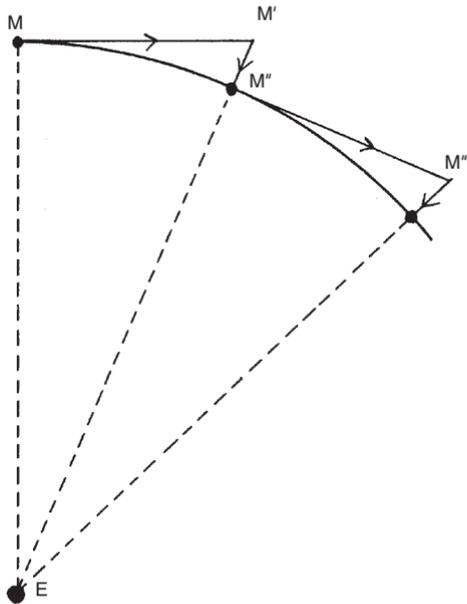


Рис. 3.3. Рассматривая круговое движение Луны вокруг Земли как бесконечное падение (см. рис. 3.2), Ньютон смог рассчитать ускорение, вызванное силой тяжести, действующей на Луну. Приведенный выше рисунок показывает, как это делается

как можно показать, алгебраически почти равно (для $MM' \ll EM$): $\frac{(MM')^2}{2EM}$ или $\frac{1}{2} \left(\frac{MM'}{EM} \right)^2 \times EM$, где MM'/EM , очевидно, является *угловой скоростью* Луны в ее движении вокруг Земли, то есть изменением углового положения Луны на ее орбите за 1 с. Поскольку Луна за месяц описывает полный круг, ее угловая скорость равняется 2π , деленное на продолжительность месяца в секундах $= 2,66 \times 10^{-6}$. Но при обсуждении движения с ускорением мы уже видели, что расстояние, пройденное за первую секунду, равно половине величины, называемой ускорением, поэтому приходим к выводу: ускорение, вызванное силой, удерживающей Луну на ее орбите, равно $(MM'/EM)^2 \times EM$. Использував данное выше значение угловой скорости и подставив вместо расстояния до Луны значение 384 400 км, или $3,844 \times 10^{10}$ см,

Ньютон получил значение ускорения силы тяжести на расстоянии до Луны, равное $0,27 \text{ см/с}^2$, что гораздо меньше, чем ускорение силы тяжести на поверхности Земли (981 см/с^2). Однако существует очень простая связь между этими двумя величинами, с одной стороны, и расстояниями от Луны и от падающего яблока до центра Земли — с другой. Действительно, отношение 981 к $0,27$ равняется 3640 , что в точности равно квадрату числа, представляющего собой отношение радиуса лунной орбиты к радиусу Земли. Таким образом, в результате Ньютон получил, что *сила земного притяжения уменьшается пропорционально квадрату расстояния до центра Земли.*

Обобщая это открытие на все материальные тела в мироздании, он сформулировал закон всемирного тяготения, согласно которому *все материальные тела притягивают друг друга с силой, прямо пропорциональной их массам и обратной пропорционально квадрату расстояния между ними.* Применяя этот закон к движению планет вокруг Солнца, он получил математическую формулировку трех законов Кеплера, описанных в предыдущей главе.

Развитие работ Ньютона великими математиками XVIII и XIX веков привело к рождению крупной области астрономии, получившей название небесная механика, которая позволяет с большой точностью рассчитывать движение планет Солнечной системы под действием взаимного притяжения. Один из главнейших триумфов небесной механики состоялся в 1846 году в связи с открытием новой планеты Нептун, существование и орбита которой были независимо друг от друга предсказаны французским астрономом У.Ж.Ж. Леверье и британским астрономом Дж.К. Адамсом на основании возмущений в движении Урана, вызванных силой тяготения неизвестной в то время планеты. Похожее событие произошло в 1930 году, когда в результате теоретических расчетов была открыта транснептуновая планета, позже названная Плутон.

Применяя свой закон тяготения к движению земного шара, Ньютон дал первое объяснение феномену «прецессии равноденствий», известному еще со времен Плу-тарха.

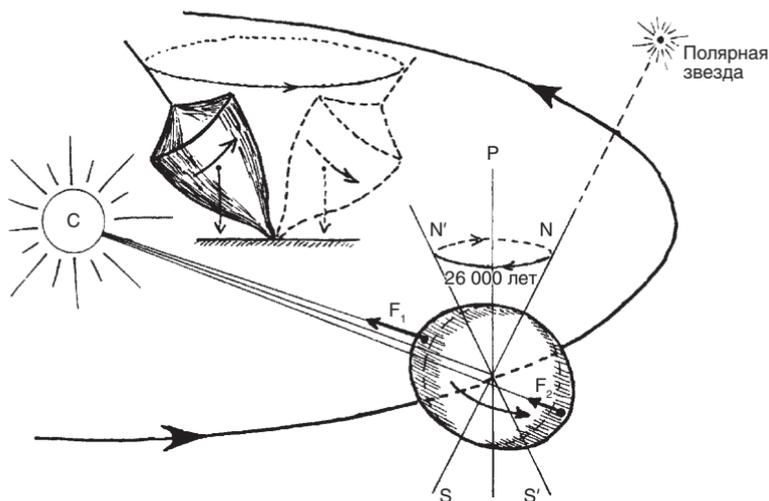


Рис. 3.4. Ньютоновское объяснение прецессии земной оси. Поскольку сила тяжести уменьшается с расстоянием, сила F_1 , действующая на экваториальную выпуклость, повернутую в сторону Солнца, больше, чем сила F_2 , действующая на выпуклость, находящуюся с обратной стороны. Таким образом, их совместное действие оказывает «выпрямляющее» действие на ось вращения Земли, то есть старается сделать ее перпендикулярной плоскости орбиты. Эта ситуация похожа на то, что мы видим в случае вращения волчка с наклонной осью, когда сила тяжести, то есть его собственный вес, стремится перевести ось в вертикальное положение. И точно так же, как волчок не падает на бок, пока продолжает вращаться и остается стоять, а его ось описывает вокруг вертикали коническую поверхность, земная ось не становится перпендикулярной к орбите, но описывает вокруг перпендикуляра конической поверхность

Ньютон показал, что, поскольку ось вращения Земли наклонена к плоскости ее орбиты (эклиптике), силы притяжения Солнца, действующие на экваториальные выпуклости земного шара, должны вызывать медленное вращение земной оси вокруг линии, перпендикулярной эклиптике, с периодом около 26 000 лет (рис. 3.4). Это объяснение столкнулось с сильным сопротивлением со стороны современных Ньютону астрономов, поскольку в то время на основании ошибочных измерений считалось, что Земля име-

ет форму не тыквы, то есть более широкую на экваторе, а, скорее, арбуза, то есть расстояние между полюсами больше, чем экваториальный диаметр.

Дабы уладить спор, французский астроном П.Л.М. де Лапертю организовал экспедицию в Лапландию с целью измерить длину одного градуса северных широт и имел массу приключений со стаей волков. Его измерения доказали, что точка зрения Ньютона верна, и Вольтер в шутку написал ему:

Vous avez confirme dans les pleins d'ennui
Ce que Newton connut sortir de chez lui*.

Рассуждая в том же духе, Ньютон объяснил явление океанских приливов различием силы притяжения Солнца, действующей на полушарие Земли, повернутое к нему и от него (рис. 3.5).

На 626 страницах ньютоновской *Principia* содержится информация по всем областям динамики твердых тел и жидкостей, но здесь мы приведем лишь еще одну задачу, потому что она простая и забавная. В ней рассматривается движение снарядов в среде, оказывающей сопротивление, например в воздухе или в воде. Как далеко продвигнутся снаряды, прежде чем перейдут в состояние покоя?

Графически ситуация представлена на рис. 3.6, где снаряд, выпущенный из орудия, двигается в воздухе или в воде.

Перемещаясь в среде, снаряд, очевидно, должен расталкивать среду в стороны, чтобы пробивать себе тоннель для движения вперед. При высоких скоростях силы трения имеют сравнительно небольшое значение и снаряд теряет основную часть энергии, чтобы передать высокую скорость среде, которую он расталкивает в стороны. Легко увидеть, что эта направленная в стороны скорость среды будет примерно той же, что и скорость продвижения снаряда вперед. Таким образом, снаряд остановится, когда масса среды, которую он оттолкнул в стороны, станет величиной того же

* В этих унылых землях вы подтвердили то, что Ньютон знал, не выходя из дома.

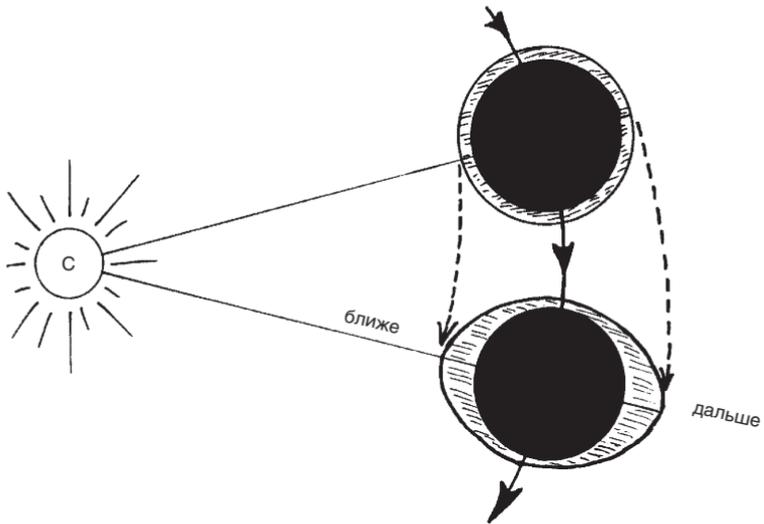


Рис. 3.5. Ньютонское объяснение океанских приливов. Поскольку сила притяжения уменьшается с расстоянием от Солнца, сила, действующая на океанскую воду на дневной стороне Земли, несколько *больше*, чем сила, действующая на земную сушу. Таким же образом, сила притяжения, действующая на океанскую воду на ночной стороне Земли, несколько *меньше*, чем та, что действует на твердую ее часть. В результате этой разницы поверхность воды на дневной стороне имеет тенденцию подниматься выше над океанским дном, тогда как на ночной стороне океанское дно как бы «тянется изнутри» к поверхности океана. Два этих эффекта выливаются в формирование водных выпуклостей, которые в сочетании с вращением Земли вокруг своей оси принимают облик приливных волн, перемещающихся вокруг Земли с периодом 24 часа

порядка, что и его собственная масса. Следовательно, можно сделать вывод, что длина тоннеля должна находиться в таком же отношении к длине снаряда, как плотность вещества снаряда к плотности среды,

$$\frac{L}{l} = \frac{\rho_p}{\rho_m} \text{ (приблизительно),}$$

что, конечно, верно, но только весьма приблизительно. Но даже если так, мы можем получить из этого несколько интересных результатов. Если мы стреляем стальными снаря-

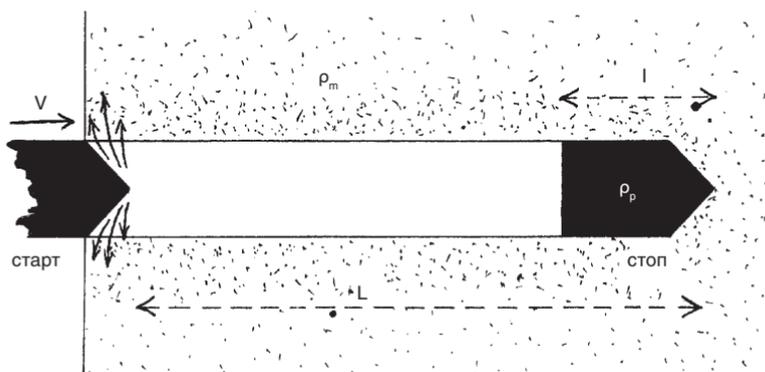


Рис. 3.6. Ньютоновская теория проникновения снарядов в среду

дами (с плотностью примерно в 10 раз больше, чем у воды) в воздухе (с плотностью примерно в 1000 раз меньше, чем у воды), снаряд должен остановиться, пройдя расстояние примерно в 10 000 раз больше, чем его собственная длина (если он не упадет на землю раньше). Таким образом, крупные снаряды морской артиллерии, длина которых может составлять 5 футов и больше, могут пролететь около 50 000 футов, или более 10 миль. С другой стороны, пуля для дамского револьвера длиной $\frac{1}{2}$ дюйма едва ли пролетит больше 400 футов. В воде, плотность которой только примерно в 10 раз меньше плотности металла, пуля потеряет свою энергию, пройдя расстояние, всего в 10 раз превышающее ее длину. Вот почему аквалангисты, чтобы поразить свою подводную добычу, используют длинные металлические стрелы. Интересно, что длина проникновения не зависит от начальной скорости снаряда (при условии, что эта скорость достаточно велика). Этот факт озадачил военных экспертов США, которые бросали с разной высоты разрывные бомбы, рассчитанные на то, чтобы глубоко проникнуть в землю, прежде чем взорваться. Глубина проникновения, похоже, не зависела от высоты, с которой бросали бомбы (таким образом достигавшие земли на разных скоростях), и эксперты чесали затылки, пока кто-то не указал им на теорию, предложенную по этому вопросу Ньютоном в его *Principia*.

Статика и динамика жидкостей

Исследования сэра Исаака в области равновесия и движения жидкостей были дополнены и расширены французским математиком Блезом Паскалем, которому было 19 лет, когда родился Ньютон, и швейцарским физиком Даниэлем Бернулли, которому было двадцать семь, когда Ньютон умер. Закон Паскаля, составляющий вместе с законом Архимеда основу гидростатики, гласит, что давление, производимое на текучую среду (будь то жидкость или газ) внутри закрытого сосуда, действует с одинаковой силой на единицу площади в любой части сосуда. Закон Паскаля находит широкое применение в создании различных гидравлических устройств. Действительно, если у нас есть два цилиндра *A* и *B* (рис. 3.7) с разными диаметрами, соединенные тонкой трубкой и снабженные движущимися поршнями, то общая сила, действующая на поршень в более широком цилиндре, будет больше, чем та, что действует на поршень в более узком, пропорционально их площадям. Таким образом, сравнительно небольшая сила, приложенная вручную к поршню узкого цилиндра, породит гораздо большую силу, действующую на поршень широкого цилиндра, которая сможет поднять тяжелую карету. Однако платой за это станет то, что перемещение поршня в широком цилиндре будет соответственно меньше, чем поршня в узком цилиндре.

Закон, или принцип, Бернулли как его часто называют, относится к движению жидкостей по трубам разного диаметра и на первый взгляд противоречит здравому смыслу. Представьте себе широкую горизонтальную трубу, которая в каком-то месте сужается, а потом снова расширяется (рис. 3.8, *a*). Вода течет по трубе, и ее давление в разных секциях трубы можно измерить с помощью высоты водяного столба в вертикальных трубках, приделанных в разных местах к основной горизонтальной трубе. Сначала может показаться, что давление в узкой секции будет выше, поскольку воде приходится «сжиматься», чтобы пройти по ней. Однако проведенный на практике эксперимент показывает, что ситуация прямо противоположная и давление воды в узкой секции ниже, чем в более широкой. Объяс-

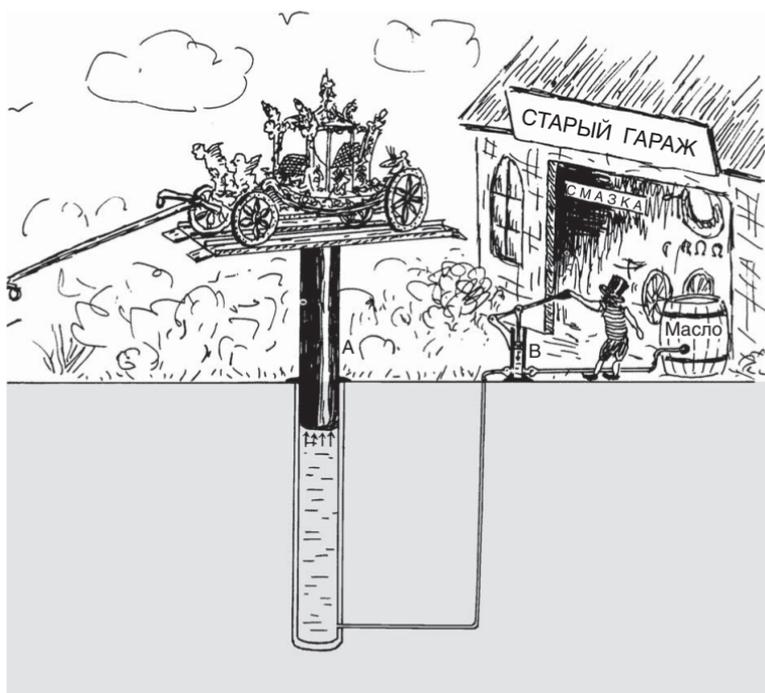


Рис. 3.7. Согласно принципу Паскаля, ручная сила может поднять тяжелую карету

нение можно получить, если рассмотреть изменение скорости потока в разных секциях трубы. В широкой секции вода течет сравнительно медленно и ускоряет свое течение, войдя в узкую секцию.

Чтобы ускорить движение воды, должна существовать сила, действующая в этом направлении, и единственная сила, которую можно себе представить в такой ситуации, — это *разность давления* между широкой и узкой трубой. Поскольку скорость воды возрастает после того, как вода входит в узкую трубу, эта сила должна действовать в направлении потока, и давление в более широкой трубе должно быть выше, чем в более узкой трубе.

Этот факт можно продемонстрировать, и не вызывая водопроводчика, а просто купив стеклянную трубку (сигарет-

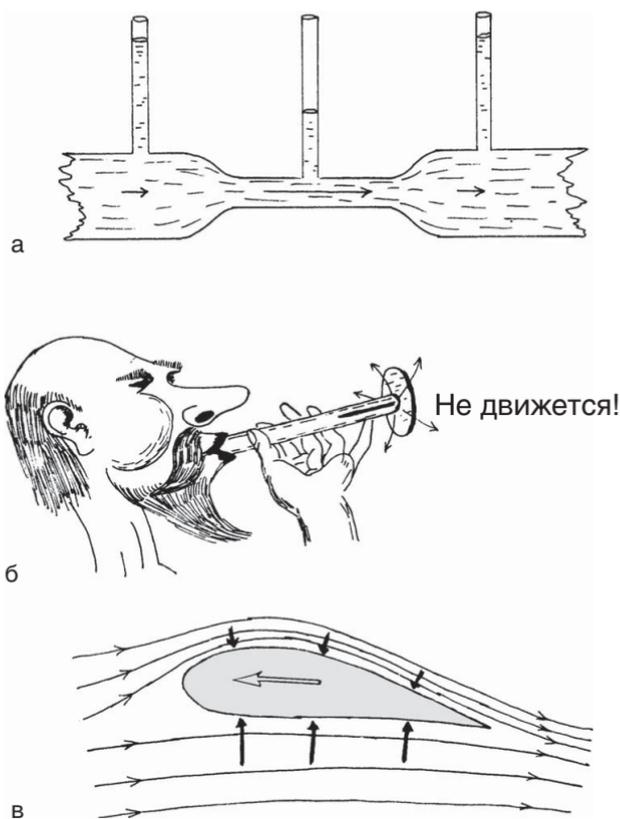


Рис. 3.8. Принцип Бернулли: простая демонстрация (а); хитрая трубка (б); как работает крыло самолета (в)

ный мундштук, вероятно, тоже сгодится), картонный круг и булавку (рис. 3.8, б). Проткните центр диска булавкой и просуньте ее в трубку, как показано на рисунке, чтобы вес диска давил на края трубки. Если теперь дунуть в другой конец трубки, можно было бы ожидать, что диск с легкостью отлетит в сторону. Попробуйте, и вы увидите, что это совсем не так, и чем больше вы будете дуть, тем сильнее диск будет прижиматься к краям трубки. Объяснение основано на принципе Бернулли. Воздух, вдуваемый в трубку, должен выходить через узкую круглую щель между концом трубки и

прижатым к нему картоном. Эта щель гораздо уже, чем сама трубка, поэтому давление воздуха здесь гораздо ниже, чем атмосферное давление снаружи. Таким образом, давление воздуха снаружи толкает картон к краям трубки.

Эффектом Бернулли объясняются также силы, которые поддерживают крылья летящего самолета. Как показано на рис. 3.8, в, профиль крыла таков, что, когда воздух движется поверх крыла, расстояние от его переднего края до заднего края больше, чем под ним. Следовательно, воздушная масса, движущаяся поверх крыла, имеет более высокую скорость и, согласно принципу Бернулли, более низкое давление, чем воздушная масса, движущаяся под крылом. Разница между этими давлениями поддерживает самолет.

Оптика

На этом мы, определенно, должны закончить разговор о ньютоновской механике, чтобы оставить место для обсуждения его оптики. Здесь основной вклад Ньютона состоит в исследовании цветов и основополагающем доказательстве, что белый цвет в действительности является сочетанием лучей разных цветов от красного до фиолетового. На самом деле исследования Ньютона по оптике предшествовали его фундаментальной работе по механике, изложенной в *Principia*. В возрасте 23 лет он купил стеклянную призму, чтобы «изучить с ее помощью феномен цвета», и, вероятно, все его фундаментальные открытия в этой области относятся к этому периоду жизни. Однако приблизительно в феврале 1692 года он оставил горящую свечу в своей комнате, когда пошел в часовню, и начавшийся пожар уничтожил его записи, включая большую работу по оптике, в которой содержались описания опытов и исследования, проведенные за двадцать лет. Таким образом, первое издание «Оптики» Ньютона появилось только в 1704 году, и можно только гадать, были ли такая задержка действительно вызвана пожаром или нежеланием Ньютона выносить свои идеи на суд его постоянного соперника Роберта Хука, который умер как раз за год до того,

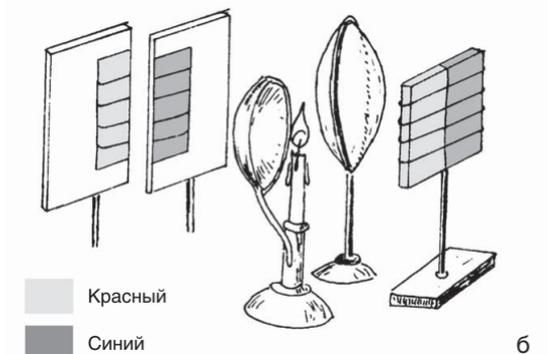
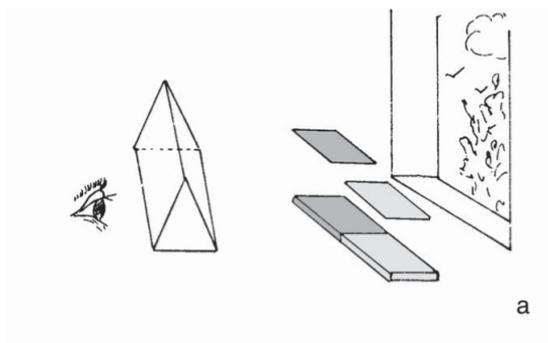


Рис. 3.9. Эксперименты Ньютона по рефракции света

как Ньютон отправил в печать свою «Оптику, или Трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света». В начале этой книги он описывает простой эксперимент, который доказывает, что свет разных цветов имеет разную преломляющую способность.

Чтобы это доказать, он взял длинный кусок картона, выкрасил одну его половину в ярко-красный цвет, другую — в синий, и, поместив его у окна, стал смотреть на него через стеклянную призму (рис. 3.9, а).

По словам самого Ньютона, он «обнаружил, что, если преломляющий угол призмы повернуть вверх, чтобы казалось, что преломление поднимает картон вверх, то его синяя

половина будет казаться поднятой выше, чем красная. Но если преломляющий угол призмы повернут вниз, так чтобы картон казался опущенным вниз за счет преломления, то его синяя половина будет казаться опущенной несколько ниже, чем красная». На основании этого эксперимента он решил, что синий свет преломляется сильнее, чем красный, и сделал вывод, что линза должна фокусировать синие и красные лучи на разных расстояниях. Чтобы подтвердить этот вывод, он взял листок бумаги, одна половина которого была выкрашена в синий, а другая в красный цвет, освещенный свечой («потому что эксперимент проводился ночью»), и, используя линзу, попытался получить четкое изображение куска бумаги (рис. 3.9, б). Для определения четкости изображения Ньютон использовал несколько черных ниток, натянутых поперек бумаги. В соответствии со своими ожиданиями он не смог сфокусировать обе половины листка одновременно. «Заметив, с максимально возможным старанием, места, где изображения красной и синей половины листа цветной бумаги казались самыми отчетливыми, я обнаружил, что там, где красная половина выглядела отчетливо, синяя половина казалась размытой, так что черные нити на ней были едва видны; там же, где наиболее четко была видна синяя половина, красная выглядела размытой, и я почти не мог различить на ней черных нитей». И как и ожидалось, изображение синей половины бумаги выглядело четко на более близком расстоянии, чем то, где четким было изображение красной половины.

Следующий эксперимент состоял в том, чтобы увидеть, что происходит, когда белый свет проходит через призму. Прodelав маленькое отверстие в оконной шторе, Ньютон поместил призму на пути проходящего через нее узкого луча солнечного света, а на некотором расстоянии позади нее — белый экран. Вместо круглого (камера-обскура) изображения солнца на экране, как было бы без призмы, он увидел продолговатое изображение, верхушка которого была слегка синеватой, а нижняя часть слегка красноватой. Это навело его на мысль, что белый свет может состоять из лучей разных цветов: от самых преломляемых синих лучей до наименее преломляемых красных. Если так, то продолго-

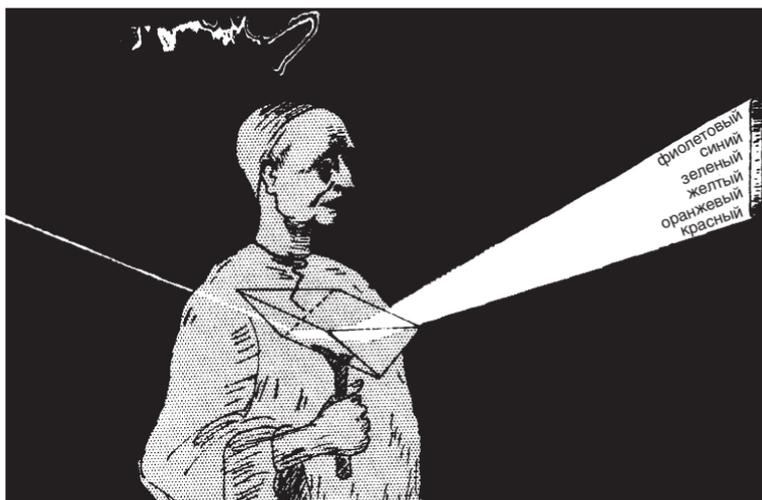


Рис. 3.10. Сэр Исаак Ньютон демонстрирует разложение белого света на множество спектральных цветов

ватое изображение на экране состояло бы из множества перекрывающихся друг друга изображений солнца в разном цвете, и только крайние были бы одно чисто синим, другое чисто красным. Чтобы избавиться от наложения изображений солнца на экране, Ньютон добавил перед лучом линзу, которая фокусировала бы на экране изображение маленькой дырочки в оконной шторе (рис. 3.10), и с удовлетворением увидел вертикальную полоску чистых цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий, фиолетовый со всеми промежуточными оттенками. Это был первый спектроскоп, и первое доказательство того, что белый свет является композицией лучей разных цветов, обладающих различной преломляющей способностью.

Современному читателю опыты Ньютона с призмой могут показаться детскими, поскольку сегодня их с легкостью может повторить каждый ребенок. Но все было совсем иначе во времена Ньютона, когда все считали, что разные цвета, получавшиеся при прохождении белого света сквозь красивые оконные витражи старых кафедральных соборов, — это нечто похожее на окраску белой ткани с помо-

стью ее погружения в растворы различных красителей. Теперь мы знаем, что сетчатка человеческого глаза содержит три вида светочувствительных клеток: одни реагируют на красный свет, другие — на зеленый, третьи — на синий. Когда все цвета спектра присутствуют в равных пропорциях, как в солнечном свете, под действием которого этот орган зрения формировался в течение сотен миллионов лет эволюции органического мира, у нас возникает ощущение «обычного», или, как мы его называем, белого света. Когда присутствует лишь часть спектра, у нас возникает ощущение разных цветов.

Одним из важных приложений ньютоновского открытия, что разные цвета обладают разной преломляющей силой, является его теория радуги. Эта красивая цветная дуга появляется на небе, когда солнце светит на нее с одной стороны, в то время как противоположная сторона покрыта тяжелыми дождевыми тучами. Согласно объяснению Ньютона, то, что мы видим в данном случае, на самом деле является отражением солнечных лучей от крошечных капелек дождя в туче или ниже. На рис. 3.11, являющемся адаптацией оригинального рисунка Ньютона из его «Оптики», показано, что происходит на самом деле.

Лучи белого света, идущие от солнца (показаны на рисунке черными линиями), падают на капельки воды и преломляются, проходя через них. За этим следует их внутреннее отражение и второе преломление на выходе из капли. В результате лучи разных цветов развертываются веером, и глаз наблюдателя, стоящего на земле спиной к солнцу, видит разные цвета в разных местах неба. Существование нескольких концентрических радуг объясняется предположением, что вместо того, чтобы отражаться один раз внутри капли, лучи света, идущие от солнца, отражаются несколько раз. Мы должны упомянуть здесь также о так называемых гало — бесцветных дугах, иногда наблюдаемых вокруг солнца и особенно вокруг луны. В отличие от радуги они появляются благодаря отражению (а не преломлению) лучей света от крошечных кристаллов льда, образующих на большой высоте облака, известные в метеорологии как *перистые* облака.

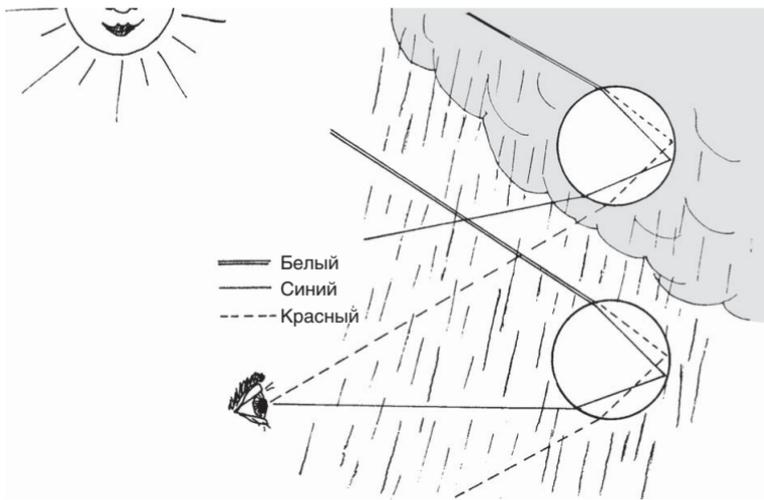


Рис. 3.11. Ньютоновское объяснение радуги

Показав, что лучи разных цветов имеют разную преломляющую способность, Ньютон ошибочно заключил, что линзы имеют внутренне присущий им дефект в формировании четких изображений предметов, поскольку лучи разных цветов не могут быть сфокусированы на одинаковом расстоянии от них. Это привело его к решению, что телескопы, использующие стеклянные линзы, как тот, что создал Галилей, не могут быть усовершенствованы и должны быть заменены телескопами, созданными на основании отражения света и не зависящими от цвета. В результате в 1672 году он сконструировал отражающий телескоп (или просто рефлектор), показанный на рис. 3.12.

Он состоял из параболического зеркала M , формировавшего изображения небесных объектов в точке O , внутри трубы. Прежде чем сфокусироваться в точке O , лучи света отражались маленьким зеркалом M' , расположенным на оси трубы, и отклонялись к точке O' , находящейся снаружи от трубы, где и можно было видеть изображение. Ошибка Ньютона в этом случае проистекала из его уверенности, что разные прозрачные материалы преломляют различные цвета одинаково. Только после его смерти было обнаруже-

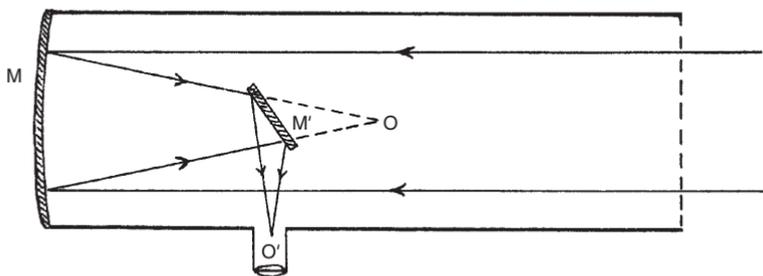


Рис. 3.12. Отражающий телескоп Ньютона

но, что это предположение неверно и что на самом деле можно сфокусировать красный и синий свет в одной точке за счет использования линз, сделанных из разных видов стекла (кронглас, флинтглас и т. д.). Тем не менее телескопы-рефлекторы, использующие большие параболические зеркала вместо линз, имеют много других практических достоинств, и два самых мощных астрономических телескопа (100-дюймовый на горе Уилсон и 200-дюймовый на горе Паломар) являются рефлекторами.

Другим ярким открытием Ньютона были так называемые кольца Ньютона, которые появляются вокруг точки соприкосновения, если поместить выпуклую линзу на плоское стекло. Эту работу он описывает следующими словами:

«Согласно наблюдениям, прозрачные субстанции, такие как стекло, вода, воздух и т. д., если их сделать очень тонкими за счет надувания пузырей или как-то иначе придать им форму тонкой пластины, приобретают разные цвета в зависимости от своей тонкости, хотя при большей толщине они выглядят совершенно прозрачными и бесцветными. Я не стану говорить об этих цветах, поскольку они, видимо, требуют более сложных размышлений и не являются необходимыми для установления свойств света в наших рассуждениях. Но благодаря тому, что они могут привести к дальнейшим открытиям, дополняющим теорию света, особенно в том, что касается строения частей природных тел, от которых зависят их цвета или прозрачность, я должен о них сказать...

Я взял два объективных стекла: одно плоско-выпуклое для телескопа в четырнадцать футов, другое — широкое двояковыпуклое для телескопа около пятидесяти футов; наложив на последнее стекло первое плоской стороной вниз, я слегка сжал их вместе для того, чтобы заставить цвета последовательно возникать в середине кругов, и постепенно поднимал верхнее стекло над нижним, чтобы они последовательно снова исчезали на том же месте. Окраска, появлявшаяся последней при сжатии стекол в середине других цветов, при первом своем появлении была похожа на круг почти однородного цвета от окружности к центру; при дальнейшем сжимании стекол этот круг становился шире, пока в его центре не появлялся новый цвет и первый круг не становился кольцом, окружающим новый цвет. Дальнейшее сжатие стекол увеличивало диаметр этого кольца, а ширина его орбиты, или периметра, уменьшалась, пока в центре не появлялся новый цвет. И так далее, пока третий, четвертый, пятый и последующие новые цвета не появлялись и последовательно не превращались в кольца, окружавшие самый внутренний цвет, а внутри в конце концов не появлялось черное пятно. И наоборот, при подымании верхнего стекла над нижним диаметр колец уменьшался, а ширина их орбиты увеличивалась, пока их цвета последовательно не доходили до центра, при этом они были достаточно широкие, и я мог различить их вид легче, чем раньше. И таким способом я наблюдал их последовательность и количество, как о том следует дальше.

За прозрачным центральным пятном, появившимся при соприкосновении стекол, следовали синий, белый, желтый и красный. Синий был в столь малом количестве, что я не мог различить его в кругах, полученных при помощи призм, также я не мог хорошо различить в них фиолетовый, однако желтый и красный были очень обильными и, казалось, простирались почти настолько же, как белый, и в четыре-пять раз больше синего. Следующие круги в порядке цветов, непосредственно окружавшие предыдущие, были: фиолетовый, синий, зеленый, желтый и красный; все они были обильны и ярки, за исключением зеленого, который имелся в малом количестве и казался более сла-

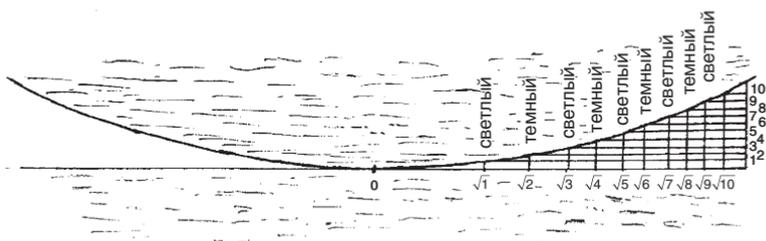


Рис. 3.13. Формирование колец Ньютона

бым и размытым, чем другие цвета. Из остальных четырех фиолетовый распространялся меньше всех и синий меньше, чем желтый или красный. Третья окружность или порядок был таков: пурпурный, синий, зеленый, желтый и красный, причем пурпурный был краснее, чем фиолетовый в предыдущей окружности, а зеленый был значительно отчетливее, являясь столь же живым и обильным, как и другие цвета, за исключением желтого; однако красный стал немного бледнее, очень сильно склоняясь к пурпурному. После этого следовала четвертая окружность — зеленая и красная. Зеленый был очень обильным и живым, склоняясь, с одной стороны, к синему, с другой — к желтому. Но в этой четвертой окружности не было ни фиолетового, ни синего, ни желтого, красный же был очень несовершенным и грязным. Последующие цвета становились все более несовершенными и размытыми, пока после трех или четырех смен они не переходили в совершенную безлизу».

На вкладке I сверху приведена фотография колец Ньютона, полученных для монохромного света, то есть света с одной длиной волны.

Измеряя радиус первых шести колец (в их самой яркой части), Ньютон обнаружил, что их квадраты составляют арифметическую прогрессию нечетных чисел: 1, 3, 5, 7, 9, 11. С другой стороны, квадраты радиусов темных колец составляют прогрессию четных чисел: 2, 4, 6, 8, 10, 12. Эта ситуация показана на рис. 3.13, где изображено сечение выпуклого и плоского стекла вблизи точки их соприкосновения.

На горизонтальной оси отложены расстояния до квадратных корней целых чисел: чисел: $\sqrt{1} = 1$; $\sqrt{2} = 1,41$; $\sqrt{3} = 1,73$; $\sqrt{4} = 2$; $\sqrt{5} = 2,24$ и т. д., на которых Ньютон наблюдал максимум и минимум света. Из этого рисунка мы видим, и это можно доказать математически, что вертикальные расстояния между двумя стеклянными поверхностями возрастают, как простая арифметическая прогрессия: 1, 2, 3, 4, 5, 6 и т. д. Зная радиус выпуклой линзы, Ньютон смог без труда рассчитать толщину воздушного слоя в тех местах, где появились яркие и темные кольца. Он пишет:

«...1/89 000-я часть дюйма — это толщина воздуха в самой темной части первого темного кольца, созданного перпендикулярными лучами; и половина этой толщины, умноженная на прогрессию 1, 3, 5, 7, 9, 11 и т. д., дает толщину воздуха в самой яркой части всех самых ярких колец, то есть 1/178 000, 3/178 000, 5/178 000, 7/178 000, и т. д. ... а 2/178 000, 4/178 000, 6/178 000 и т. д. — его толщина в самых темных частях всех темных колец».

В противовес процитированному выше предположению Ньютона цвета радуги на тонких слоях «не нужны для определения свойств цвета», кольца Ньютона являются лучшим доказательством волновой природы света — истины, которую Ньютон не желал признавать до самой смерти. Кольца являются результатом так называемой интерференции двух пучков света, отраженных двумя стеклянными поверхностями, которые разделяет переменное расстояние. Когда тонкий пучок света падает сверху на границу между стеклом верхней линзы и воздушным слоем между линзами, часть его отражается, тогда как другая часть проникает в воздух. Второе частичное отражение имеет место, когда свет проникает в стекло нижней линзы и оба этих отраженных пучка вместе, двигаясь вверх, достигают глаза наблюдателя. То, что происходит в этом случае, изображено на рис. 3.14. Для удобства волны изображены затемненными и светлыми отрезками, соответствующими их гребням и впадинам. Кроме того, чтобы избежать наложения, пучки света показаны не совсем перпендикулярными поверхности; это в любом случае соответствует реальным наблюдениям, поскольку источник света и голова наблюдателя не могут находиться на одной ли-

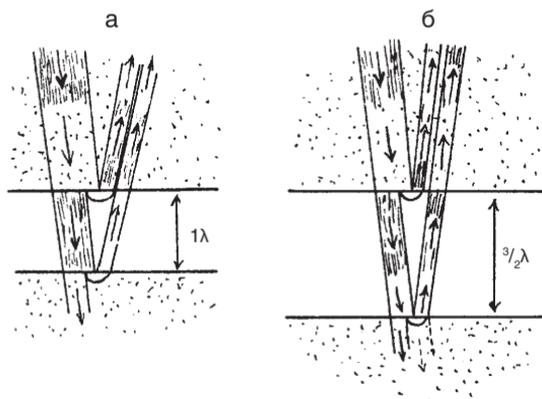


Рис. 3.14. Объяснение, данное Юнгом кольцам Ньютона

нии. На рис. 3.14, *а* видно, что происходит, когда толщина воздушного слоя равна половине длины волны падающего света (на рисунке длина волны соответствует общей длине белого и серого отрезка). В этом случае волна, отраженная от поверхности нижней линзы, соединяется с волной, отраженной от верхней, таким образом, что гребень первой волны совпадает с впадиной второй волны и наоборот. Если волны имеют одинаковую интенсивность, они гасят одна другую, иными словами, их интенсивность значительно снижается. На рис. 3.14, *б* представлен случай, когда толщина воздушного слоя равна половине (или $2/4$) длины волны. Теперь два отраженных пучка идут гребень к гребню, и впадина к впадине, и мы имеем увеличение интенсивности. На рис. 3.14, *б* толщина воздушного слоя равняется $3/4$ длины волны и ситуация похожа на ту, что приведена на рис. 3.14, *а*.

В эксперименте Ньютона толщина возрастает непрерывно наружу от точки соприкосновения, поэтому мы видим чередование темных и светлых колец. Поскольку свет разного цвета соответствует разной длине волны, радиусы колец разного цвета будут несколько отличаться, и мы, как и Ньютон, будем наблюдать кольца, похожие на радугу. Используя приведенные выше рисунки Ньютона для толщины воздуха, мы получим, что длина световой волны, которая порождает кольца этих радиусов, должна быть рав-

на $4/178\,000$ дюйма, или $0,58 \times 10^4$ см. Как мы теперь знаем, это просто длина волны желтого света — самой яркой части видимого спектра.

Но Ньютон яростно сопротивлялся волновой теории света, в основном потому, что не понимал, как она сможет объяснить прямолинейное распространение световых лучей. Он настаивал, что свет должен быть потоком частиц, мчащихся в пространстве с большой скоростью. Поэтому, чтобы объяснить появление колец интерференции, он разработал сложную теорию «приступов легкого отражения и прохождения», согласно которой «...каждый луч света, проходя сквозь преломляющую поверхность, переходит в определенное временное состояние, которое при дальнейшем продвижении луча приводит через равные интервалы к возвращению луча и при каждом возвращении располагает луч так, чтобы обеспечить легкое прохождение сквозь следующую преломляющую поверхность, а между возвращениями легкое отражение от нее».

Ньютоновские «приступы», очевидно, соответствуют тому, что мы сегодня называем длиной волны, и он сделал вывод, что «длина приступа» у красного света короче, чем у синего. Он пишет: «...Какого рода это действие или расположение? Я не исследую здесь, состоит ли оно из вращательного или колебательного движения луча, или среды, или чего-то еще».

Оппонентом Ньютона в споре о природе света и человеком, чья теория впоследствии победила, был голландский физик Кристиан Гюйгенс, который был на 13 лет старше его. Причины, по которым Гюйгенс предпочитал считать свет волной, распространяющейся через некую универсальную среду, заполняющую все пространство, а не пучком быстро движущихся частиц, лучше всего отражены в следующем отрывке из его книги *Traite de la lumiere*, опубликованной в 1690 году:

«По поводу прямолинейного распространения световых лучей.»

Процедуры доказательства в оптике, как и в других науках, где при изучении материи применяется геометрия, основаны на истинах, полученных опытным путем; напри-

мер, на том, что лучи света распространяются прямолинейно, что угол отражения равен углу падения и что преломление подчиняется правилу синусов, хорошо известны в наши дни и не менее верны, чем другие.

Большая часть тех, кто пишет по различным областям оптики, согласны признавать эти истины как данность. Некоторые из самых любознательных стремятся открыть их происхождение и причины, считая их по сути своей удивительными проявлениями природы. По этому поводу был высказан ряд остроумных соображений, однако не настолько удовлетворительных, чтобы более сильные умы не пожелали еще более удовлетворительных объяснений. С целью способствовать, насколько это в моих силах, разъяснению этого отдела естествознания, который не без основания признается одним из самых трудных, я хочу изложить здесь свои, посвященные ему размышления. Я сознаю, что многим обязан тем, кто первым начал рассеивать густой сумрак, окутывавший эти явления, и первым подал надежду, что их можно объяснить разумным образом. Однако меня ничуть не удивляет, что эти же исследователи довольно часто считали достоверными и убедительными мало очевидные рассуждения, так как я нахожу, что никто еще не дал вероятного объяснения таких замечательных базовых свойств света, как его распространение по прямым линиям или как тот факт, что видимые лучи, приходя из бесконечного числа различных мест, пересекаются, но нисколько не препятствуют друг другу.

Таким образом, в этой книге я постараюсь с помощью принципов, принятых в современной философии, дать более ясные и правдоподобные объяснения, во-первых, прямому распространению света, во-вторых, свойствам света, отражающегося при встрече с другими телами. Далее я объясню свойства лучей, про которые говорят, что они преломляются, проходя сквозь прозрачные тела разного рода, причем я коснусь также рефракции в воздухе, вызванной различной плотностью разных слоев атмосферы.

Затем я исследую причины странного преломления света в одном кристалле, который привозят из Исландии. Под конец я займусь различными формами прозрачных и от-

ражающих тел, с помощью которых лучи собираются в одной точке или отклоняются различным образом. При этом будет видно, с какой легкостью по нашей новой теории находятся эллипсы, гиперболы и другие кривые линии, которые для этой цели были остроумно применены Декартом, но также и те кривые, которые должны образовывать поверхность стекла, если другая его поверхность имеет заданную сферическую, плоскую или какую-то иную форму...

Поскольку сегодня в соответствии с этой философией считается достоверным, что зрительное ощущение возбуждается только под воздействием некоей движущейся материи, действующей на нервы в глубине наших глаз, то здесь мы имеем еще одно основание полагать, что свет заключается в движении вещества, которое находится между нами и светящимся телом. Более того, если принять во внимание чрезвычайную быстроту, с которой распространятся свет во все стороны, а также то, что, когда он приходит из различных и даже противоположных мест, лучи его проходят один через другой, не мешая друг другу, то станет совершенно понятно, что, когда мы видим светящийся предмет, это не может происходить вследствие переноса материи, которая доходит до нас наподобие пули или стрелы, пересекающих воздух. Это слишком противоречит указанным двум свойствам света, в особенности второму. Значит, свет должен распространяться другим способом; и привести нас к пониманию способа распространения света может то, что нам известно о распространении звука в воздухе.

Мы знаем, что звук через посредство воздуха, который представляет собой невидимое и неосязаемое тело, распространяется вокруг места, где он был произведен, движением, которое последовательно передается от одной части воздуха к другой, и что движение это распространяется одинаково быстро во всех направлениях, вследствие чего должны образовываться как бы сферические поверхности, которые все сильнее расширяются и в конце концов доходят до нашего уха. Несомненно, что и свет доходит от светящегося тела до нас каким-нибудь движением, сообщенным веществу, находящемуся между ним и нами, ибо мы уже видели, что это не может быть вызвано переносом

вещества от этого тела к нам. Вместе с тем, поскольку свет тратит на свое прохождение некоторое время — вопрос, который мы вскоре рассмотрим, — из этого следует, что движение, сообщенное веществу, постепенно и последовательно распространяется так же, как и при звуке, сферическими поверхностями и волнами. Я называю эти поверхности волнами по сходству с волнами, которые можно наблюдать на воде, куда брошен камень, и которые являют собой указанное выше постепенное распространение кругами, хотя оно происходит по другой причине и на плоской поверхности...»

Рассматривая распространение волн, как на поверхности воды, так и в воздухе, или в таинственном «мировом эфире», являющемся носителем легких волн, Гюйгенс основывал свои аргументы на простом принципе, который теперь носит его имя. Предположим, что мы имеем дело с самым знакомым и очевидным случаем, а именно бросаем камень на спокойную поверхность пруда. Мы увидим, что вокруг точки, куда, пробив поверхность пруда, упал камень, появляется круговая волна, точнее, шлейф волн. Если мы знаем положение волны в определенный момент, то каким образом можно определить положение волны через короткий промежуток времени после этого? Согласно принципу Гюйгенса, *каждую точку, находящуюся перед фронтом распространяющейся волны, можно считать источником новой, или вторичной, волны, и новое положение фронта волны является общей касательной к вторичным волнам, исходящим из всех точек волнового фронта в его предыдущей позиции.* Эта идея проиллюстрирована на рис. 3.15 для самых простых случаев круговой и плоской волны.

Самым блестящим применением принципа Гюйгенса стало его объяснение преломления света, показанное на рис. 3.16.

Предположим, что фронт плоской волны падает из левого верхнего угла на поверхность соприкосновения воздуха и стекла (или любых других сред). Когда этот волновой фронт находится в положении aa' и касается этой поверхности в точке a , от этой точки в стекле начинает распространяться круговая волна. Поскольку волновой

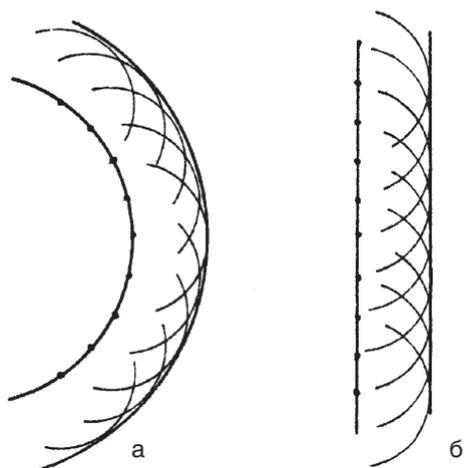


Рис. 3.15. Принцип Гюйгенса, описывающий распространение волн

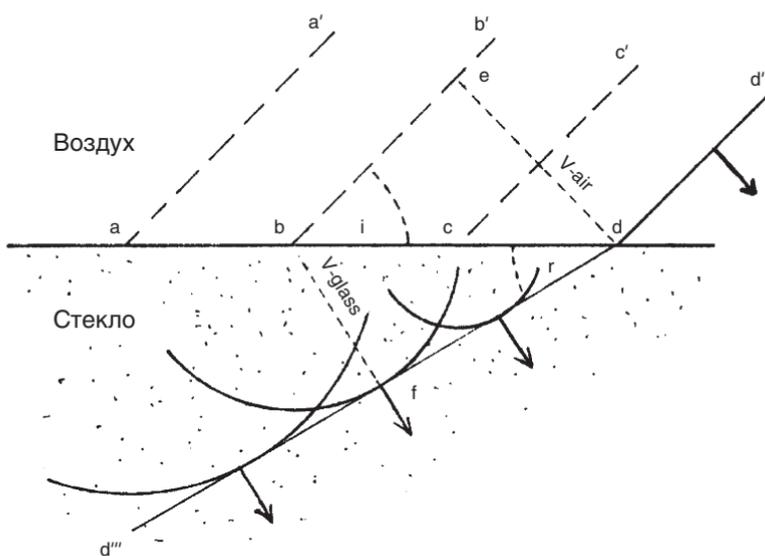


Рис. 3.16. Объяснение преломления света, данное Гюйгенсом

фронт в воздухе движется вперед, то в точках b , c и т. д. возникают другие, вторичные волны. На рисунке представлен момент, когда движущийся вперед волновой фронт находится в положении dd' и вторичные волны в стекле только начинают распространяться от точки d . Чтобы найти положение волнового фронта в стекле, нам нужно определить касательную ко всем вторичным волнам, которая в данном случае будет прямой линией. Если, как предполагается на рисунке, скорость света в стекле меньше, чем в воздухе (то есть радиусы вторичных круговых волн в стекле меньше, чем расстояния между последовательными положениями волнового фронта в воздухе), то волновой фронт в стекле будет наклонен вниз и преломленные лучи будут ближе к вертикали, чем падающие, как происходит действительности, когда свет проходит через стекло. Если скорость света в стекле была бы больше, чем в воздухе, то имела бы место противоположная ситуация. Чтобы найти отношение между углом падения i и углом преломления r , рассмотрим прямоугольные треугольники bde и ddf , имеющие общую гипотенузу. Согласно определению синуса:

$$\sin i = \frac{ed}{bd}; \quad \sin r = \frac{df}{bd}.$$

Поделив первое равенство на второе, получим:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{ed}{df} = \frac{V\text{-air}}{V\text{-glass}},$$

где $V\text{-air}$ и $V\text{-glass}$ — это скорости света в воздухе и в стекле соответственно. Это в точности совпадает с законом Снелла с тем дополнением, что отношение двух синусов, называемое коэффициентом преломления, равно отношению скоростей света в двух средах. Следовательно, скорость света в более плотной среде (например, в стекле) меньше, чем в более разреженной (например, в воздухе).

Интересно отметить, что корпускулярная теория света Ньютона привела бы нас к прямо противоположным выводам. Фактически, чтобы объяснить преломление лучей, входящих из воздуха в воду на базе корпускулярной теории, требовалось бы предположить наличие какой-то силы, перпендику-

лярной границе раздела, которая затягивает частицы света внутрь, когда они пересекают эту границу. В этом случае, конечно, скорость в стекле была бы больше, чем в воздухе.

Победа волновой теории света

Несмотря на очевидные преимущества волновой теории света Гюйгенса перед корпускулярной теорией Ньютона, она не могла добиться признания в течение очень долгого периода времени. Отчасти это происходило из-за огромного авторитета Ньютона среди современников, отчасти из-за неспособности Гюйгенса развить свои взгляды с достаточной математической точностью, чтобы сделать их неуязвимыми для противников. Таким образом, вопрос о природе света висел в воздухе целый век до появления статьи английского физика Томаса Юнга, озаглавленной: «Описание опытов и исследований звука и света». В этой статье Юнг объясняет явление колец Ньютона на основании волновой природы света и описывает свой собственный эксперимент, в котором интерференцию двух световых пучков можно продемонстрировать более простым способом. В этом эксперименте (рис. 3.17) он использовал две щели, сделанные достаточно близко друг к другу в экране, закрывающем окно затемненной комнаты.

Если щели достаточно большие, солнечный свет, проходя через них, образует два световых пятна на экране, помещенном на некотором расстоянии от окна. Но если щели очень маленькие, пучки света, проходя через них, рассеиваются в соответствии с принципом Гюйгенса, и два пятна размываются, частично перекрывая друг друга. В той области, где на экран попадает свет от обеих щелей, Юнг наблюдал последовательность узких полос цвета радуги, разделенных темными интервалами, очень похожую на кольца Ньютона. Когда щели в оконном экране располагались на расстоянии 1 мм, а второй экран стоял на расстоянии 1 м от окна, полосы были около 0,6 мм шириной. Объяснение этого явления основано на интерференции световых волн, так же как и в случае колец Ньютона. Точка *a* на экране, находящаяся ровно посередине

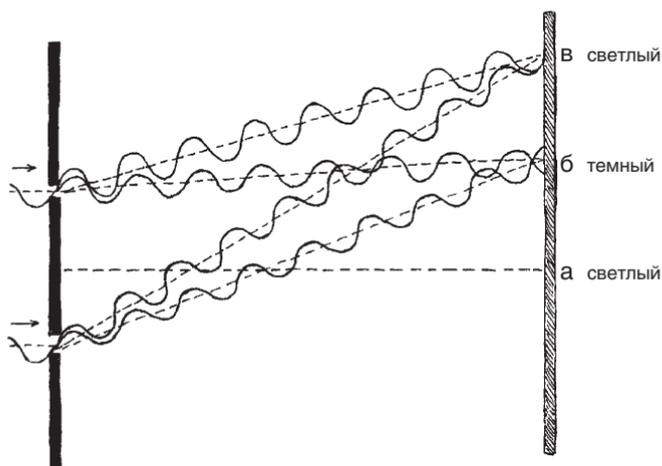


Рис. 3.17. Эксперимент Юнга по интерференции

расстояния между центрами двух изображений, является равноудаленной от двух щелей O и O' , и световые волны попадают туда в фазе, то есть гребень к гребню и впадина к впадине. Движения двух волн складываются вместе, и мы получаем усиление света. То же самое верно для точки c , расстояния которой от O и O' отличаются на одну длину волны. С другой стороны, в точки b и d , для которых $bO - b'O$ и $dO - d'O$ отличаются на $1/2$ длины волны и $1 1/2$ длины волны соответственно, волны попадают в противофазе и гребень накладывается на впадину. Здесь наблюдаются темные полосы.

Работы Томаса Юнга и его великого современника француза Огюстена Жана Френеля уверенно подтвердили справедливость волновой теории света, и, таким образом, Гюйгенс после смерти одержал победу в своем споре с Ньютоном длиной в целую жизнь.

Кристалл из Исландии

Еще одной задачей, за которую брались, но так и не решились ее и Ньютон, и Гюйгенс, была задача поляризации света. В 1669 году датский философ Эразмус Бартолин от-

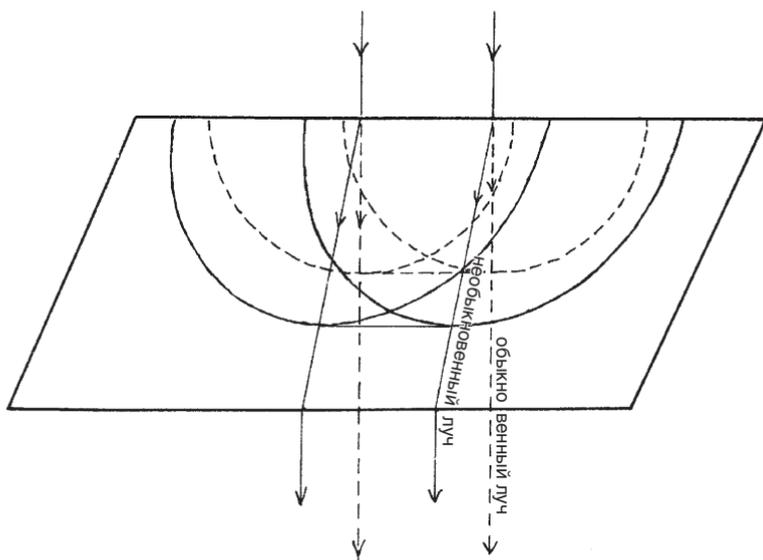


Рис. 3.18. Двойное преломление в объяснении Гюйгенса

крыл, что кристаллы прозрачного минерала под названием исландский шпат имеют странное свойство расщеплять проходящие через них в определенном направлении лучи света на два отдельных луча (вкладка I снизу). Если кристалл поворачивать по кругу в направлении падающего луча, один из двух получившихся лучей, называемый *обыкновенный луч*, останется на месте, тогда как другой — *необыкновенный луч* будет двигаться по кругу вместе с кристаллом. Гюйгенс интерпретировал этот феномен, предполагая, что световая волна, войдя в исландский шпат (и некоторые другие кристаллы), расщепляется на две волны, одна из которых с некоторой скоростью распространяется по кристаллу во все стороны и другую, скорость которой зависит от направления по отношению к оси кристалла. Идея Гюйгенса в отношении того, как это различие в скорости распространения приводит к формированию двух лучей, показана на рис. 3.18 и основана, естественно, на принципе Гюйгенса.

Когда пучок света падает вертикально на поверхность кристалла исландского шпата, формируется две группы

вторичных волн: сферических и эллипсоидных. Сферические волны создают волновой фронт, который тянется в том же направлении, что и фронт падающей волны, в то время как эллипсоидные волны вызывают непрерывное смещение результирующего волнового фронта в сторону, формируя, таким образом, необыкновенный луч. После того как оба луча выходят из кристалла, в воздухе формируются только сферические волны, и два пучка становятся параллельными. Несмотря на то что объяснение Гюйгенса совершенно верно, он не смог объяснить, почему световые волны в этом кристалле распространяются двумя разными способами. Он считал, что это происходит потому, что колебания в световых волнах направлены в сторону распространения волн, как у звука, но в таком случае не должно быть никакой разницы, если кто-то вращает кристалл вокруг направления падающего пучка. С другой стороны, Ньютон, не веривший в волны Гюйгенса, стремился объяснить это явление (известное как двойное преломление), предполагая, что частицы, составляющие обыкновенный и необыкновенный лучи, ориентированы по-разному в отношении перпендикуляра к лучу. Во втором издании своей «Оптики» он сравнивает различие между этими двумя лучами с различием между двумя длинными стержнями, один из которых имеет круглое поперечное сечение, а другой — прямоугольное. При повороте первого стержня вокруг его оси никакой разницы не заметно, что, определенно, не так для второго стержня. «Каждый луч света, — пишет Ньютон, — имеет две противоположных стороны, изначально наделенные свойством, вызывающим необычное преломление, и другие две противоположных стороны, не наделенные этим свойством».

Очевидно понимая, что лучи света должны иметь какие-то поперечные свойства (то есть перпендикулярные к направлению его распространения), Ньютон не смог наглядно представить, какими они могут быть.

И только значительно позднее, благодаря работе французского физика Этьена Малю (1775—1812) и других, мысли Гюйгенса и Ньютона по этому вопросу были соединены вместе в единую точку зрения. Нет сомнения, что свет —

это не что иное, как волна, распространяющаяся в пространстве, но при этом колебания среды имеют место не в направлении ее распространения, а перпендикулярно ему. Разница между обыкновенным и необыкновенным лучом в кристалле исландского шпата заключается в том, что в первом случае колебания имеют место в плоскости, проходящей через луч и ось кристалла, а во втором случае они перпендикулярны ей.

Открытие поперечной природы световых колебаний не положило конец головной боли физиков следующих поколений. На самом деле поперечные колебания могут существовать только в твердых телах, способных сопротивляться разрезанию и сгибанию. Это значит, что мировой эфир, предполагаемый носитель света, был не сильно разреженным газом, как представлял себе Гюйгенс, а твердым телом! Но если весь эфир твердый, то как могут планеты и другие небесные тела двигаться в нем практически без всякого сопротивления? И даже если предположить, что мировой эфир очень легкая, легко разрушаемая материя, как широко используемый сегодня пенопласт, движение небесных тел проделывало бы в нем так много тоннелей, что он непременно потерял бы свои свойства переносить световые волны на большие расстояния! Эта головная боль терзала физиков многих поколений, пока с ней в конце концов не покончил Альберт Эйнштейн, который выбросил эфир из окна кабинетов физики.

Закат Ньютона

В возрасте 50 лет Ньютон решил оставить научную жизнь и начал присматривать себе более доходное место. Ему предложили должность руководителя лондонского Чартерхауса (престижной школы для отпрысков британской аристократии), но он считал ее недостаточно высокой. В письме, где он отказывается от этого места, Ньютон писал: «Я благодарю вас за предложенное место в Чартерхаусе, но не вижу в нем ничего, ради чего стоило бы суетиться. Не считая кареты [которая, очевидно, была ему предложена], о которой

я и не думал, это всего лишь 200 фунтов в год и заточение в Лондоне, где мне не нравится ни воздух, ни образ жизни; кроме того, я считаю нецелесообразным вступать в соревнование, в которое вступил бы ради лучшего места».

В 1696 году в возрасте 54 лет Ньютон был назначен смотрителем монетного двора и начал делать деньги, как фигурально, так и буквально. В 1705 году он был посвящен в рыцари, стал сэром Исааком и удостоился многих других почестей. Но последняя четверть века его жизни (он умер в 1727 году в возрасте 85 лет) не была отмечена важными открытиями, которые сыпались как из рога изобилия, когда ему не было и двадцати пяти. Некоторые из его биографов говорят, что дело было в старости, другие пишут, что он исчерпал все возможные идеи, отпущенные на долю его эры. В любом случае он сделал достаточно!

Глава 4

ТЕПЛО КАК ЭНЕРГИЯ

Впервые изучением феномена тепла занимался доисторический пещерный человек, который научился разводить костер, чтобы согреться в то время, когда солнце не давало ему достаточно тепла. Его ближайший помощник, доисторическая пещерная женщина сделала еще одно открытие — различные съедобные продукты, если их подержать над огнем или в кипящей воде, становятся гораздо вкуснее и легче перевариваются. Понятия горячего и холодного присущи человеку от рождения, как и всем другим живым существам, а температура окружающей среды запоминается и служит сигналом для миллиардов нервных окончаний, расположенных на поверхности кожи. Но ответ психики на температуру часто вводит в заблуждение, и незрячий человек не может сказать, была ли его рука обожжена раскаленным железом или куском сухого льда. В обоих случаях ощущения одинаковы, потому что они являются всего лишь ответом психики на повреждение ткани.

Термометры

Первый настоящий научный инструмент для измерения температуры был изобретен в 1592 году Галилео, который использовал для этой цели стеклянную колбу с очень узким горлом. Эта колба была до половины заполнена подкрашенной водой и помещена вверх ногами в миску с подкрашенной водой. При изменении температуры воздух, содержащийся в колбе, расширился или сжимался, и стол-

бик воды в горлышке поднимался вверх или опускался вниз. Галилео не позаботился снабдить устройство температурной шкалой, поэтому его инструмент следовало бы назвать термоскоп, а не термометр. Модификация термоскопа Галилео была предложена в 1631 году Реем и заключалась лишь в переворачивании колбы Галилео, в которой нагрев и охлаждение регистрировались с помощью подъема уровня воды.

В 1635 году Фердинанд, герцог Тосканский, интересовавшийся наукой, сделал термометр, использовавший спирт (который замерзает при более низкой температуре, чем вода), помещенный в трубку, запаянную сверху, чтобы спирт не испарялся. Наконец, в 1640 году ученые из итальянской Академии Линчеи создали прототип современного термометра с использованием ртути и смогли по меньшей мере частично убрать воздух из верхней части запаянной трубки. Интересно отметить, что на это открытие в целом ушло около полувека, сравните всего лишь с несколькими годами, которые прошли с открытия электромагнитных волн до создания первого радиотелеграфа или с открытия деления урана до создания первой атомной бомбы.

Законы газового состояния

Пока Ньютон в Кембридже занимался гравитацией и светом, другой англичанин, Роберт Бойль, в Оксфорде трудился над механическими свойствами и сжимаемостью воздуха и других газов. Услышав об изобретении воздушного насоса, созданного Отто фон Герике, Бойль существенно улучшил его конструкцию и начал серию опытов по измерению объема воздуха при различных величинах низкого и высокого давления. Эта работа завершилась тем, что мы знаем как закон Бойля, который гласит: *«Объем заданного количества любого газа при заданной температуре обратно пропорционален величине оказываемого на него давления»* (рис. 4.1).

Почти веком позже француз Жозеф Гей-Люссак, изучая расширение газов при нагревании, открыл еще один важный

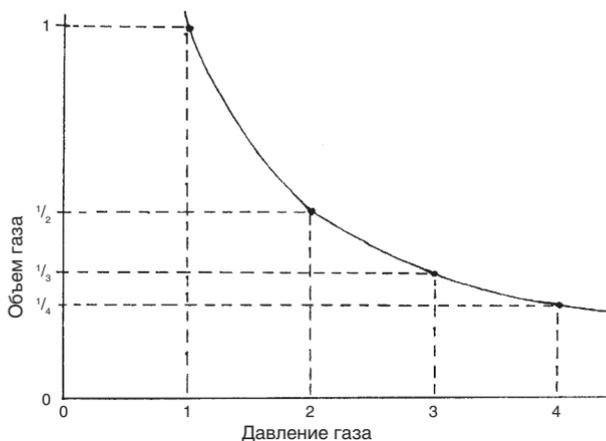


Рис. 4.1. Графическое представление закона Бойля об обратно пропорциональной зависимости между объемом и давлением газа

закон, который гласит, что *давление любого газа, заключенного в заданном объеме, возрастает на $1/_{273}$ от его исходного объема при повышении температуры на один градус Цельсия.* Этот же закон был открыт на два года раньше другим французом, Жаком Шарлем, и потому был назван «законом Шарля».

Газовый термометр и абсолютная температура

Эти два закона подчеркивают простоту внутренней структуры газов, поскольку сжимаемость и температурное расширение жидких и твердых веществ являются предметом более сложных законов и существенно зависят от природы вещества. Простота законов, управляющих поведением газов независимо от их химической природы, делает газовый термоскоп, сконструированный Галилео, гораздо более рациональным инструментом измерения температуры, чем любое другое устройство, созданное позже. Различные жидкости, такие как вода, спирт, ртуть и т. д. (как и твердые вещества, которые тоже можно использовать для создания термометров), при нагреве расширяются по-разному; вода даже сжимается вместо того, чтобы расширять-

ся, когда температура на несколько градусов превосходит температуру замерзания. Таким образом, если сделать два термометра, использующие разные жидкости, отметить на них положение столбика жидкости при двух разных температурах (скажем, температуре замерзания и кипения воды) и поделить расстояние между ними на равное число отрезков (100° в случае шкалы Цельсия), эти два термометра будут показывать разные значения между любыми двумя конечными точками. Вместе с тем, поскольку все газы расширяются при нагревании одинаковым образом, они являются гораздо более стандартным материалом для измерения температуры. Используя газовый термометр, как это делал Галилео, не нужно определять, является ли этот газ обычным воздухом, водородом, гелием или любым другим. Современная версия газового термометра показана на рис. 4.2 и основана скорее на измерении давления, а не объема нагретого газа. Когда температура повышается, газ расширяется и толкает вниз ртуть в левой стеклянной трубке. Сохраняя исходный объем, газ вызывает подъем ртути в правой стеклянной трубке, и измерение температуры определяется разницей h между двумя уровнями ртути.

Имея установленную температурную шкалу на базе этого газового термометра, можно, взяв его за стандарт, градуировать все другие термометры. Используя газовый термометр и начав с атмосферного давления (когда два столбика ртути в стеклянной трубке находятся на одинаковом уровне), получаем, как упомянуто раньше, что при повышении или понижении температуры на 1°C давление газа возрастает или уменьшается на $1/273$ от его первоначального значения соответственно. Таким образом, если начать с 0°C (точка замерзания воды) и охладить газ на 273° , то ожидаемое давление газа упадет ниже нуля, и газ должен сжаться до нулевого объема (рис. 4.3).

Точка, в которой это должно произойти, называется *абсолютным нулем*, а температура, отсчитываемая от этой точки, называется *абсолютным значением температуры* ($T^{\circ}\text{abs} = 273 + T^{\circ}\text{C}$). Конечно, газы при охлаждении никогда не доходят до математической точки исчезновения объема, и незадолго до абсолютного нуля они конденсиру-

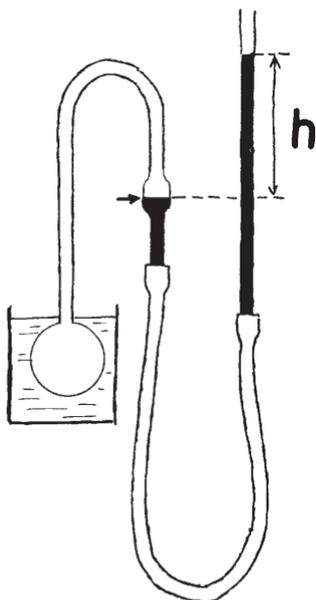


Рис. 4.2. Принцип газового термометра. Чем выше температура жидкости в емкости слева, тем выше должен быть h — уровень ртути в подвижной трубке справа, чтобы столбик ртути в стеклянной трубке в середине оставался на постоянном месте, указанном стрелкой

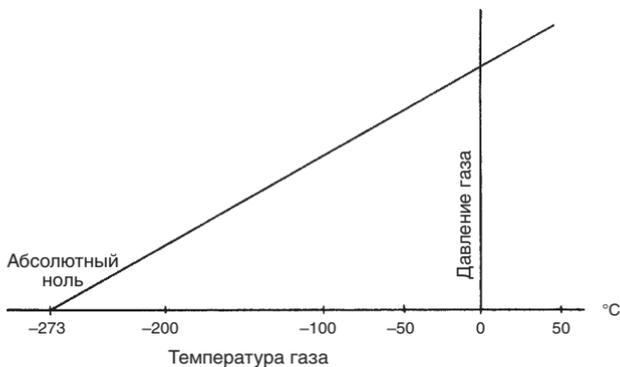


Рис. 4.3. График показывает зависимость давления газа (содержащегося в заданном объеме) от температуры. При температуре на 273°C ниже точки замерзания воды давление газа становится равным нулю

ются в жидкости, которые дальше не сжимаются. Тем не менее точка абсолютного нуля играет очень важную роль в теплофизике, как температура, при которой происходило бы математическое сжатие газа в точку, если бы молекулы газа были бесконечно малы по размеру и не существовало бы сил притяжения между молекулами. (К обоим условиям очень близко подходят такие разреженные газы, как гелий, неон, аргон и т. д.)

Тепло как жидкость

Несмотря на то что люди говорили о тепле с незапамятных времен — в южных землях о его избытке, в северных о недостатке, — первым человеком, который заговорил о тепле как об определенной физической сущности, количество которой может быть измерено так же, как измеряют количество воды или керосина, был, вероятно, шотландский ученый, занимавшийся как физикой, так и химией, Джеймс Блэк (1728—1799). Он представил тепло как некую невесомую жидкость, которая способна проникать во все материальные тела, повышая их температуру. Смешав галлон кипящей воды с галлоном ледяной воды, он заметил, что температура смеси находится ровно посередине между двумя начальными температурами. Этот факт он интерпретировал, сказав, что после смешивания избыток тепла в горячей воде распределился равномерно между двумя порциями. Блэк определил единицу тепла, как его количество, необходимое, чтобы поднять температуру 1 фунта воды на 1 °F (мы используем слово «калория», называя количество тепла, необходимого, чтобы повысить температуру 1 г воды на 1 °C). Он пришел к выводу, что тела равного веса, но состоящие из разных материалов, нагретые до одинаковой температуры, содержат разное количество тепла, поскольку, если смешать равные по весу количества горячей воды и холодной ртути, то полученная температура будет гораздо ближе к изначальной температуре воды, чем ртути. Таким образом, при охлаждении на 1° определенного количества воды высвобождается больше тепла, чем необходимо



Рис. 4.4. Людвиг Больцман (слева), Сади Карно (в центре), Джосайя Гиббс (справа) — основатели современной теории тепла

для нагрева на 1° такого же количества (веса) ртути. Это привело его к понятию *теплоемкости* материала, которая характеризуется количеством тепла, необходимого для его нагрева на 1° . Другим важным понятием, введенным Блэком, стала *скрытая теплота* — количество тепла, необходимого, чтобы превратить лед в воду (и то и другое имеет температуру 0°C), или кипящую воду — в пар (и то и другое имеет температуру 100°C). Блэк считал, что добавление заданного количества невесомой тепловой жидкости к куску льда ослабляет его структуру, превращая в жидкость, и таким же образом добавление тепла горячей воде ослабляет ее структуру еще больше, превращая ее в пар.

Аналогия между теплом и жидкостью была развита дальше другим молодым французом, Сади Карно (рис. 4.4), который умер в 1832 году в возрасте 36 лет. Карно сравнил паровой двигатель, в котором механическая работа выполнялась теплом, поступавшим от бойлера, с водяным колесом, где работа выполнялась водой, падающей с высоты. Эта аналогия привела его к выводу, что, как и в случае водяного колеса, где количество работы, производимой заданным количеством воды, возрастает пропорционально разнице между уровнями воды над и под колесом, количе-

ство механической энергии, которое может быть произведено паровым двигателем, должно быть пропорционально разнице температур между бойлером, где создается пар, и кулером, где он конденсируется. Однако он считал, что, как и в случае водяного колеса, количество тепла, выходящего из кулера, равно тому, которое отбирается из бойлера, и что механическая работа производится благодаря определенному количеству «падений» тепла от высокой температуры к низкой. Теперь мы знаем, что это предположение было ошибкой, что паровые двигатели превращают часть тепла, протекающего через них, в механическую энергию и что количество тепла, поступающего в конденсатор, меньше именно на эту часть тепла.

Тепло как движение

Мысль о том, что тепло — это своего рода внутреннее движение материального тела, а не особая субстанция, как думали Блэк и другие, впервые пришла в голову профессиональному военному и была подкреплена опытами, проведенными на оружейном заводе. Бенджамин Томсон родился в Массачусетсе и в молодые годы участвовал в Войне за независимость. Затем он изменил свои пристрастия в пользу Англии и вскоре стал заместителем государственного секретаря в министерстве по делам колоний. Впрочем, позже он уехал в Баварию в качестве военного советника и за реорганизацию германской армии получил титул графа Румфорда. В промежутках между своими армейскими занятиями он уделял много внимания вопросам науки, и в частности природе тепла. Его не удовлетворяли современные ему представления о том, что тепло — это некое вещество, такое же, как все другие химические вещества, которое, соединяясь со льдом, дает воду (лед + тепло = вода) или высвобождается в различных процессах горения. Причиной его сомнений был тот факт, что тепло возникает «из ниоткуда» в процессе трения, который, очевидно, не имеет ничего общего с химическим превращением. Наблюдая за расточкой пушек на оружейном заводе в Мюнхене, он задавался вопросом, почему

изделия так нагреваются, особенно когда бур становится тупым. Томсон рассматривал возможность того, что материальные тела могут иметь большую теплоемкость, когда они представлены большим блоком, чем когда они разбиты на мелкие фрагменты. Это могло бы объяснить высвобождение тепла в процессе расточки пушек, порождающем большое количество металлической стружки. Он тщательно измерил теплоемкость целой металлической болванки и теплоемкость металлической стружки того же веса и обнаружил, что они совершенно одинаковы. Тогда он попытался сравнить вес горячих болванок и их же вес, когда они были холодными, в попытке обнаружить вес исчезнувшей тепловой жидкости, но результат оказался отрицательным.

Согласно рисункам, приведенным в его статье в *London Philosophical Transactions* (1799 г.), калория не могла весить больше 0,000013 мг. Теперь мы знаем, что любая форма энергии обладает весомой массой, которая получается согласно знаменитому уравнению Эйнштейна при делении его на квадрат скорости света. В действительности вес одной калории тепла составляет 0,00000000004 мг, что значительно меньше погрешности любых измерений. Все это привело Томсона к выводу, что тепло не может быть обычным веществом и должно быть неким видом движения. Он пишет: «Что такое тепло? Оно не может быть материальной субстанцией. Мне кажется сложным, если не совсем невозможным, представить тепло чем-то иным, нежели то, что в этих экспериментах [расточке пушек] постоянно передается куску металла, когда появляется тепло, а именно движением».

Механический эквивалент тепла

Спустя несколько десятилетий идеи графа Румфорда получили дальнейшее развитие в статье немецкого врача Юлиуса Роберта Майера «Заметки о силах неживой природы», опубликованной в 1842 году. Майер осуществил эксперимент на бумажной фабрике, где для размешивания целлюлозной массы, помещенной в большой котел, использовалась сила лошади, ходившей по кругу. Измеряя

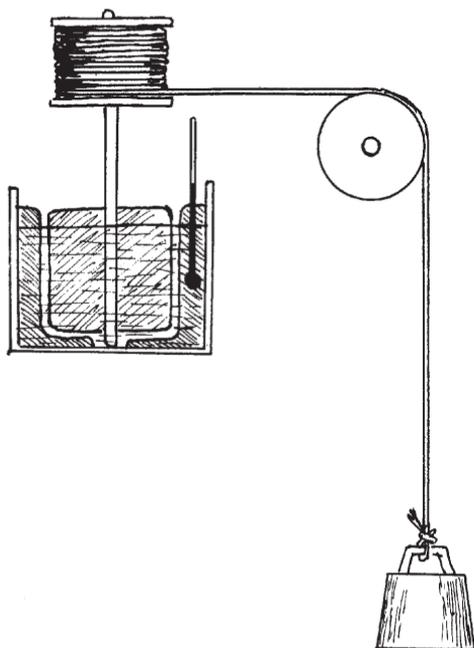


Рис. 4.5. Эксперимент Джоуля по превращению механической энергии в тепло. Опускающийся груз вращает лопасти в наполненном водой резервуаре и за счет внутреннего трения повышает температуру воды. Сравнивая работу, проделанную опускающимся грузом, с повышением тепла, содержащегося в воде, Джоуль получил значение механического эквивалента тепла

повышение температуры целлюлозы, он построил график количества тепла, полученного при заданном количестве механической работы, проделанной лошадей. Однако, будучи слишком занятым своей медицинской практикой, он так никогда и не продолжил эти исследования для получения более точных результатов, и слава от точного измерения механического эквивалента тепла досталась англичанину Джеймсу Прескотту Джоулю.

В своих опытах Джоуль использовал устройство, схематично изображенное на рис. 4.5 и состоявшее из наполненного водой резервуара с вращающейся осью, к которому были прикреплены несколько лопастей для перемешивания

воды. Свободному вращению воды в резервуаре препятствовали специальные пластины, закрепленные на стенках резервуара, которые увеличивали внутреннее трение. Ось с лопастями приводилась в движение за счет груза, подвешенного через блок, и работа, производимая опускающимся грузом, превращалась в тепло трения воды. Зная количество воды в резервуаре и измеряя повышение температуры, Джоуль смог рассчитать общее количество произведенного тепла. В то же время произведение веса груза на расстояние, на которое он опускается, дает значение механической работы. Повторяя этот эксперимент много раз при разных условиях, Джоуль установил, что полученное тепло прямо пропорционально проделанной работе. Объявляя результаты своих исследований, он писал: «Работа, проделанная грузом в 1 фунт на расстоянии в 772 фута, будучи потраченной на производство тепла, дает повышение температуры 1 фунта воды на 1 градус по Фаренгейту». Это утверждение, представленное в других единицах, используется в наши дни повсеместно для пересчета тепловой энергии в механическую работу и наоборот.

Термодинамика

Когда равенство тепловой и механической энергии, известное в наши дни как первый закон термодинамики, было сформулировано впервые, настало время расширить работы Сади Карно, касавшиеся законов превращения одной формы энергии в другую. Пионерская работа в этом направлении была сделана во второй половине XIX века немецким физиком Рудольфом Клаузиусом и британским физиком лордом Кельвином. Из повседневного опыта мы знаем, что тепло всегда течет от более горячих тел к более холодным и никогда не течет в обратном направлении. Мы также знаем, что механическая энергия может быть полностью превращена в тепло, например при трении, тогда как полное превращение тепла в механическую энергию не представляется физически возможным. Действительно, как это почти показал Сади Карно, производство механиче-

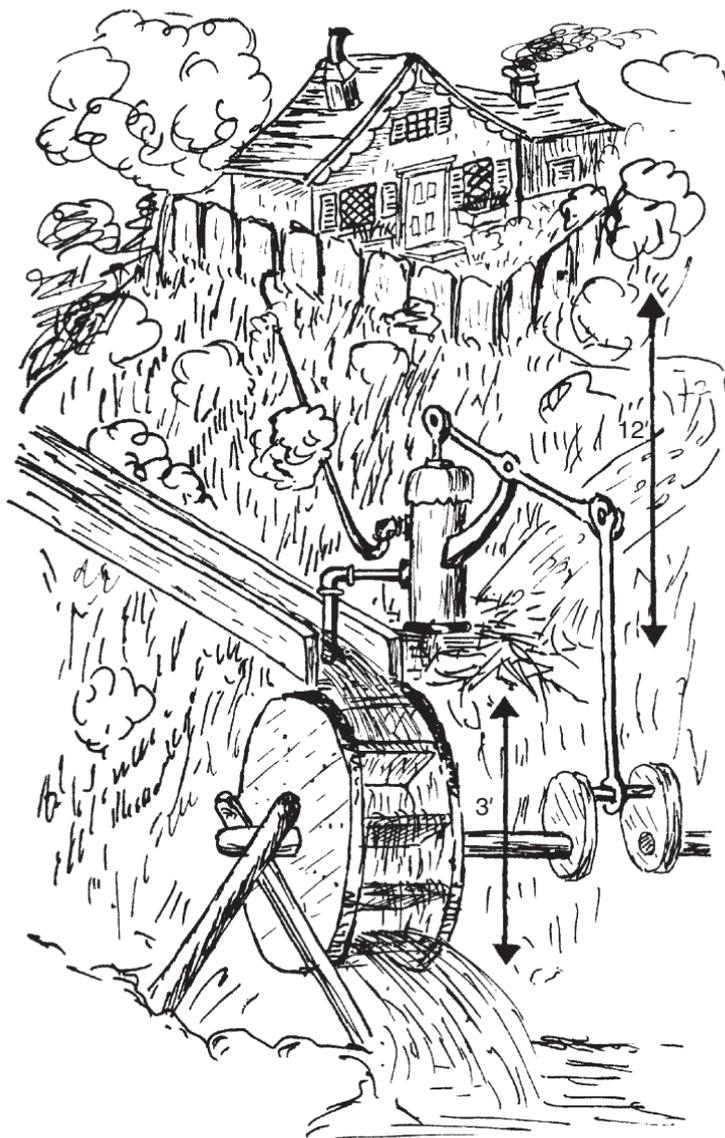


Рис. 4.6. Гидродинамическая аналогия теплового двигателя, которая превращает в механическую энергию часть тепла, текущего из области с высокой температуры в область с низкой температурой

ской работы связано с «понижением» тепла от высоких температур к низким. В то время как Карно считал (ошибочно), что тепло остается неизменным при прохождении от бойлера к кулеру, первый закон термодинамики утверждает, что некоторое его количество теряется и эквивалентное ему количество появляется в виде механической работы, выполняемой двигателем. Ситуация аналогична той, которая существует с домом на холме, который берет воду из речки, протекающей внизу. Вместо того чтобы использовать насос с электрическим мотором, обитатели дома решают использовать насос с водяным колесом, работающим в той же речке, как показано на рис. 4.6. При этом одна часть речной воды поступает в водопад, вращающий колесо, а другая часть поднимается к дому на холме.

Очевидно, что невозможно прокачать всю воду из речки полностью, поскольку тогда в ней не останется воды для работы насоса. Работа, производимая падающей водой или требуемая, чтобы поднять оставшуюся часть вверх, равна количеству воды, умноженному на высоту ее подъема, поэтому лучшее, что можно сделать, — это организовать все таким образом, чтобы количество воды, оставшейся в речке, было ровно таким, чтобы его хватило для прокачки оставшейся воды в дом. Например, если высота дамбы равна 3 футам, а дом находится на 12 футов выше насоса, то, обозначив через x часть воды, которая поднимается в дом, запишем:

$$12x = 3(1 - x),$$

из чего вытекает:

$$x = \frac{3}{12+3} = \frac{1}{5}.$$

Таким образом, при данных условиях невозможно прокачать в дом более одной пятой части воды. Как будет показано позднее, в этом случае тепло, протекающее из области с высокой температурой в область с низкой температурой, частично превращается в механическую энергию. Та часть тепла, которая может быть превращена в работу, выражается равенством:

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 и T_2 — это абсолютные температуры в бойлере и в конденсоре. Температура кипящей воды 100°C или 373°abs , и если конденсор охлаждается льдом, то его температура 0°C или 273°abs . Таким образом, максимальная эффективность парового двигателя равна $100/373 = 26\%$. В действительности из-за потерь тепла и по другим техническим причинам эффективность парового двигателя даже ниже.

Утверждение о том, что *невозможно превратить тепло в механическую энергию без «понижения» от более горячего места к более холодному месту*, известно как второй закон термодинамики. Оно эквивалентно следующему утверждению: *тепло само собой не потечет от холодного места к горячему*. Если бы мы могли добиться, чтобы тепло само потекло от кулера к бойлеру, мы получили бы порочный круг и паровые двигатели работали бы без всякого топлива. Это было бы похоже на механическое устройство, где вода сама текла бы вверх по холму, а затем стекала бы вниз на колесо водяной мельницы!

При математическом описании термодинамики вводится понятие энтропии, обычно обозначаемое через S и определяемое как количество тепла, полученное или потерянное телом, деленное на температуру (абсолютную) тела. Используя понятие энтропии, можно переформулировать вышеуказанный второй закон термодинамики следующим образом: *энтропия в любой изолированной системе (то есть системе, которая не имеет теплового или механического взаимодействия с окружающим) может только возрасти или оставаться постоянной*. Допустим, что мы положили кубик льда в стакан теплой воды и тепло потекло ото льда к воде, охлаждая кубик льда ниже нуля и нагревая воду до кипения. Согласно второму закону термодинамики, это невозможно, поскольку означало бы убывание энтропии в системе лед—вода.

Действительно, пусть T_1 — температура теплой воды, а T_2 — температура кубика льда, так что $T_1 > T_2$. Предположим, что определенное количество тепла, обозначенное Q ,

спонтанно потекло от кубика льда к окружающей его теплой воде. Количество тепла, полученное водой, будет $+Q$, а изменение энтропии $\Delta S_1 = +\frac{Q}{T_1}$.

Количество тепла, полученное кубиком льда, будет равно $-Q$, поскольку лед теряет тепло, а изменение энтропии кубика льда будет равно $\Delta S_2 = -\frac{Q}{T_2}$. Таким образом, общее изменение энтропии в системе лед—вода будет $\Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2} = Q \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$. Поскольку $T_1 > T_2$, из этого

следует, что $\frac{1}{T_1} < \frac{1}{T_2}$, и, следовательно, величина в скобках отрицательна. Таким образом, поток тепла от кубика льда к воде соответствовал бы уменьшению энтропии, что противоречит второму закону термодинамики. Однако если тепло перетекает от теплой воды ко льду, то знаки меняются, изменение энтропии становится положительным, и процесс соответствует правилам термодинамики. Конечно, этот аргумент применим только к изолированным системам, то есть к системам, куда снаружи не поступает никакой энергии. В случае кухонного холодильника или оконного кондиционера тепло откачивается из морозильной камеры или из комнаты в более теплый воздух снаружи, и в этом случае уменьшение энтропии компенсируется работой, выполняемой электрическим током, приводящим в движение мотор.

Закон возрастания энтропии также позволяет нам довольно просто вывести выражение для эффективности теплового двигателя. Пусть температура в бойлере и в кулере равна T_1 и T_2 , соответственно. Предположим, что из бойлера утекает определенное количество тепла $-Q_1$. Кулер получит меньшее количество тепла $-Q_2$, а разность $Q_1 - Q_2$ превращается в механическую энергию. Тогда энтропия в бойлере будет уменьшаться на величину Q_1 / T_1 , а в кулере будет возрастать на Q_2 / T_2 . Поскольку возрастание энтропии в кулере должно быть больше или по крайней мере равно уменьшению энтропии в бойлере, мы можем написать:

$$\frac{Q_1}{T_1} \leq \frac{Q_2}{T_2}.$$

Из чего следует, что:

$$\frac{Q_1}{Q_2} \leq \frac{T_1}{T_2} \text{ или } \frac{Q_2}{Q_1} \geq \frac{T_2}{T_1}.$$

С помощью простых алгебраических преобразований получаем:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

что совпадает с формулой, упомянутой ранее.

Игрушка «пьющие птицы»

Забавной игрушкой, созданной на основе принципа теплового двигателя, является японская пьющая птица (рис. 4.7). Она состоит из стеклянного вакуумного контейнера в виде двух шаров, соединенных длинной трубкой. Пар из эфира, изначально наполнявшего шар-тело, поднимается в шар-голову, который является кулером, потому что слой покрывающего его гигроскопического материала постоянно остается влажным. Сконденсированный эфир собирается в нижней части шара-головы, но не может опуститься вниз, поскольку трубка доходит до середины этого шара. Когда аккумулируется достаточное количество эфира, голова становится тяжелее, чем тело, и поворачивает трубку в почти горизонтальное положение, таким образом позволяя эфиру переместиться назад в шар-тело, что заставляет птицу снова выпрямиться. Каждый раз, когда птица наклоняется, ее нос опускается в воду, что позволяет сохранять голову холодной.

Если вместо воды наполнить стекло водкой или, даже лучше, чистым спиртом, охлаждение головы будет более интенсивным и птица будет двигаться быстрее. Если же накрыть птицу стеклянным куполом, воздух внутри будет быстро насыщаться паром и движение прекратится. При

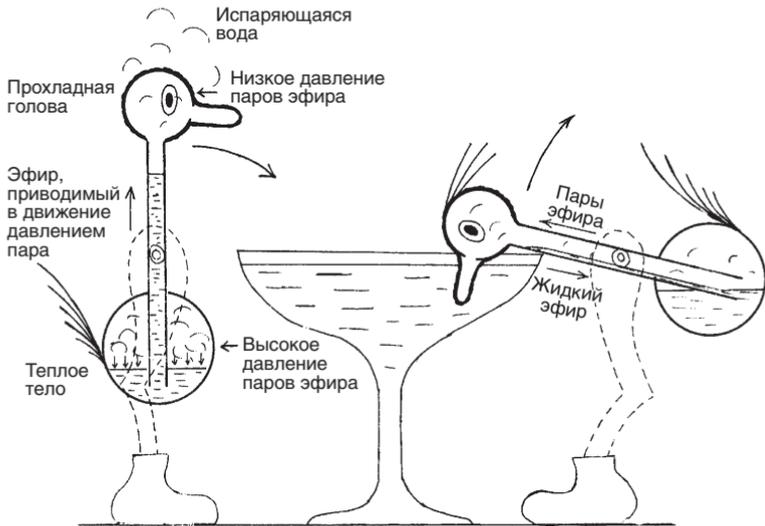


Рис. 4.7. Японские пьющие птицы

высокой влажности атмосферного воздуха птицы двигаются менее эффективно. В действительности автору не удалось заставить их двигаться в типичный летний день в Вашингтоне.

В связи с этой игрушкой, работающей на принципе испарения воды, можно поднять интересный физический вопрос. Если к оси, вокруг которой двигается птица, прикрепить какой-нибудь механизм с блоком, то можно получить определенное количество механической энергии и сделать насос, качающий воду из расположенного внизу моря. На какой высоте от уровня моря можно поместить птицу, чтобы она продолжала работать?

Мы можем рассматривать ее как тепловую машину, где тепло течет от более теплого тела к более холодной голове и частично превращается в механическую энергию. Скрытое тепло испарения воды (из холодной головы птицы) составляет 539 калорий на грамм, что эквивалентно $2 \times 27 \times 10^{10}$ эрг механической энергии. Это же значение должно также представлять количество тепла, текущего от более теплого воздуха в теле птицы, когда из ее головы испаряется 1 грамм

воды (потому что в теле птицы нет ни аккумуляции, ни потери тепла). Эффективность превращения тепла в механическую энергию составляет $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$. В нашем случае и T_1 и T_2 близки к 300 К (температура воздуха в комнате), и разность $T_1 - T_2$ составляет всего несколько градусов. Пусть эта разность равна, скажем, 3 °С, тогда эффективность окажется около 1%, так что испарение 1 г воды из головы птицы даст около 2×10^8 эрг. Чтобы поднять 1 г воды на высоту 1 см, нужно совершить работу, равную ускорению силы тяжести, которое имеет значение около 1000 (981) см/с², так что при испарении 1 г воды из головы птицы получается механическая работа, способная поднять еще один грамм воды с уровня моря на высоту 2×10^5 см, или на 2 км. Конечно, приведенные выше расчеты очень грубы, и различные виды потерь энергии значительно снизят эти цифры, но факт тот, что пьющие птицы могут пить воду из моря, находясь на достаточно большой высоте!

Вечный двигатель первого и второго типа

С древних времен люди мечтали о машинах, которые могли бы работать бесконечно, не потребляя топлива или какого-то другого источника энергии извне. Описанная в главе 2 бесконечная цепочка Стевиуса часто использовалась как возможный вариант такой машины, пока сам вышеуказанный Стевиус не показал, что она не будет работать, если правильно учесть законы механического равновесия на наклонной плоскости.

Поскольку вечный двигатель первого рода противоречит первому закону термодинамики, то есть закону превращения энергии, то стоит рассмотреть вечный двигатель второго типа. Но он противоречит второму закону термодинамики. Действительно, если бы мы могли превратить 100% тепла в механическую энергию, то механические устройства могли бы превзойти все широко рекламируемые проекты из области атомной энергетики. Можно было бы построить океанские лайнеры, которые качали бы воду из

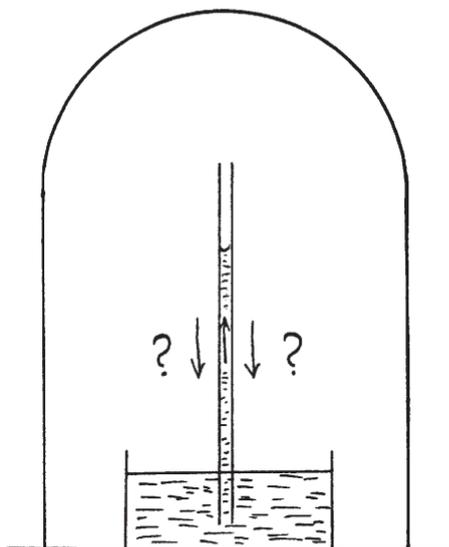


Рис. 4.8. Пример термодинамической аргументации. Если бы давление пара сверху на вогнутый мениск в капиллярной трубке было таким же, как над поверхностью воды в миске, то вода находилась бы в состоянии бесконечного движения в направлении, указанном стрелками

моря, извлекали бы из нее тепло для своих двигателей, а за борт выбрасывали полученные куски льда. Можно было бы создавать двигатели для автомобиля и самолета, которые, забирая обычный воздух, использовали бы его тепло в качестве движущей силы и выбрасывали из выхлопных труб ледяные струи. Можно было бы...

Но все эти прекрасные возможности запрещены вторым законом термодинамики — законом увеличения энтропии!

Как только мы принимаем законы термодинамики, мы можем использовать их при обсуждении различных физических явлений и для доказательства множества важных утверждений относительно них. Рассмотрим, например, миску с водой и капиллярной трубкой, торчащей из воды вертикально вверх (рис. 4.8). Чтобы изолировать эту систему от окружающей среды, накроем ее стеклянным колпаком и откачаем из-под него воздух.

Известно, что вода поднимается по капиллярной трубке, образуя вогнутый мениск. Теперь спросим себя, что происходит. Прежде всего, часть воды в миске превратится в водяной пар, который наполнит внутренность стеклянного колпака. Благодаря силе притяжения плотность и давление пара будут выше в нижней части и ниже вверху, так же как в случае земной атмосферы. Мы знаем, что для любой заданной температуры существует определенное давление пара, при котором он уравнивается с жидкостью. Если давление пара слишком велико, то его часть конденсируется в жидкость; если оно слишком мало, то некоторое количество воды испаряется, создавая больше пара. Теперь мы с помощью термодинамической аргументации докажем, что давление пара на вогнутую поверхность жидкости в капиллярной трубке меньше, чем на плоскую поверхность воды в миске. Предположим, что это неверно и давление пара не зависит от кривизны поверхности жидкости. Что произойдет в этом случае? Поскольку из-за силы гравитации давление пара на поверхности мениска ниже, чем на поверхности воды в миске, вода внутри капиллярной трубки будет испаряться и конденсироваться в миске. Это вызовет движение воды вверх по капиллярной трубке, и это движение будет продолжаться бесконечно. Мы могли бы поместить в капиллярную трубку своего рода водяную мельницу, и устройство работало бы вечно, что противоречит второму закону термодинамики. Поскольку этот закон не может нарушаться, приходим к выводу, что *давление пара на вогнутую поверхность ниже, чем на плоскую*. Аналогичным образом (если взять закрытую капиллярную трубку, в случае которой мениск находится ниже уровня воды в миске и является выпуклым) получаем, что *давление на выпуклой поверхности жидкости выше, чем на плоской*. Чем уже капиллярная трубка, тем больше разность высот и, следовательно, тем больше изменение давления пара. Используя постоянные числовые значения поверхностного натяжения (которое определяет высоту водяного столба в капиллярной трубке) и плотности водяного пара (которая определяет разницу давления между уровнем воды в миске и уровнем воды в трубке), мы можем получить

формулу зависимости давления пара на изогнутой поверхности воды. Если эта формула была бы неверна, вода постоянно текла бы по капиллярной трубке и мы имели бы вечный двигатель второго рода.

Вывод, полученный выше, имеет большое значение для понимания такого явления, как дождь. Тучи, плывущие высоко в небе, состоят из бесчисленного числа крошечных водяных капель (тумана), которые настолько малы и легки, что практически не падают вниз. Одни из этих капель больше, другие меньше. Каков результат различия в размере капель? Как мы только что видели, давление пара на выпуклые поверхности больше, чем на плоские, и разница давления увеличивается с убыванием радиуса кривизны. Таким образом, давление пара на поверхностях более мелких капель будет выше, чем на поверхностях более крупных. В результате этой разницы пар будет течь от мелких капель в сторону крупных, конденсируясь на их поверхностях и еще больше увеличивая их размер. Более мелкие капли будут постепенно испаряться и в конце концов исчезать. Растущие капли вскоре станут слишком большими, чтобы парить в воздухе, и на наши головы и зонты польется дождь.

Кинетическая теория тепла

Дальнейшему развитию теории тепла и корреляции основных законов термодинамики с идеей о том, что тепло — это энергия движения крохотных частиц — молекул, из которых состоят все материальные тела, имевшему место в последней четверти XIX века, мы обязаны в основном Людвигу Больцману из Германии, Джеймсу Клерку Максвеллу из Англии и Джосае Гиббсу из США (рис. 4.4 и 5.16). Рассматривая движение бесчисленного количества крошечных молекул, составляющих материальные тела, конечно, невозможно (да и бессмысленно) следить за траекторией каждой отдельной частицы. Что мы хотим знать, так это *усредненное* поведение молекул при разных физических условиях, и это приводит нас к использованию статистики. Статистические методы используются в отношении людей всегда, когда речь

идет о большом количестве индивидуумов. Страховые компании, правительственные агентства, занимающиеся продуктами, производимыми фермерами, и т. д. основывают свою политику на статистических данных и не интересуются подробностями смерти мистера Джона Доу или частностями, имеющими отношение к ферме Джремайа Смита. Оценивая население США примерно в 170 000 000, а число молекул в 1 см^3 в 20 000 000 000 000 000 000, мы видим, что в случае с молекулами законы статистики должны работать гораздо лучше, чем в случае с людьми.

В случае газов применить статистический подход проще, чем в случае жидкостей и твердых тел, поскольку в газах молекулы свободно двигаются в пространстве, сталкиваясь друг с другом и натываясь на стенки емкости. Стенки емкости, содержащей газ, находятся под постоянным обстрелом молекул, отскакивающих от них назад, что в целом составляет постоянную силу давления газа. Допустим, что такое же количество газа заключено в контейнере, составляющем по объему половину первоначального. Поскольку в этом случае число молекул на единицу объема будет в два раза больше, в заданную площадь стенки в секунду будет ударяться вдвое больше молекул, и, значит, давление газа удвоится. Это объясняет закон обратной пропорциональности давления газа и его объема, открытый Робертом Бойлем.

Теперь рассмотрим, что случится, если молекулы начнут двигаться быстрее. Эффект будет двойным: 1) большее число молекул дойдет в секунду до заданной площади стенки; 2) сила контакта, которая определяется механическим импульсом (количеством движения в терминологии Ньютона) молекул, возрастет. Поскольку оба эффекта пропорциональны скорости молекул, давление будет возрастать, как квадрат скорости, или, что то же самое, как кинетическая энергия молекул. Мы знаем, что согласно закону Гей-Люссака давление газа, содержащегося в постоянном объеме, пропорционально его абсолютной температуре, из чего следует, что *абсолютная температура является простой мерой энергии теплового движения молекул*. О каких молекулах идет речь, не имеет значения, поскольку один из основных законов статистической механики, известный как закон равновесно-



Рис. 4.9. Кривая распределения скоростей Максвелла

го распределения энергии, гласит, что *в случае смешивания большого числа частиц из двух или более различных масс средняя кинетическая энергия частицы остается неизменной*. Таким образом, например, в смеси молекул водорода с молекулами кислорода, которые в шестнадцать раз тяжелее, скорость молекул кислорода в четыре раза меньше скорости молекул водорода, так что результат умножения их масс на квадрат их скорости будет одинаков. При комнатной температуре, то есть при температуре около 300°abs , энергия теплового движения будет около $0,0000000000000002$ эрг, что в случае молекул воздуха соответствует скорости $50\,000$ см/с.

Конечно, энергия теплового движения, определяемая абсолютной температурой, является лишь средней величиной для большого количества частиц и, как всегда в случае статистических показателей, энергия одной конкретной частицы может существенно отличаться от среднего значения. Благодаря случайности их взаимных столкновений некоторые молекулы могут на короткое время приобретать значительно большую скорость, тогда как другие могут временно замедлять движение. Используя законы статистической механики, можно рассчитать процент молекул газа, скорость которых на несколько порядков отличается от средней скорости. Кривая распределения скоростей, которая впервые была рассчитана Максвеллом и носит его имя, показана на рис. 4.9.

Другим важным понятием статистической теории газов является понятие среднего свободного пути, то есть среднего расстояния, которое частица проходит между двумя столкновениями. В атмосферном воздухе средний свободный путь молекул очень мал, всего около 0,00001 см, тогда как в случае разреженного газа, заполняющего межзвездное пространство, молекула может пройти много миль, прежде чем встретится с другой. Малое значение свободного пути объясняет тот факт, что молекулам, несмотря на их быстрое движение, требуется очень много времени, чтобы пройти из одного конца комнаты в другой. На самом деле они находятся в положении футболиста с мячом, рвущегося к линии ворот, который практически на каждом шагу вынужден бороться со своими противниками. Конечно, если у футболиста есть цель и он старается добежать до нее, то молекулы движутся вслепую и после каждого нового столкновения могут отлететь в любом случайном направлении. Математически можно показать, что в случае каждого такого движения, называемого случайным блужданием, среднее расстояние, пройденное после множества шагов, равняется длине каждого шага, умноженной на квадратный корень общего числа шагов, а не на число шагов, как было бы, если бы они были направлены в одну сторону. Таким образом, получаем формулу:

Пройденное расстояние = длина шага \times $\sqrt{\text{количество шагов}}$.

В случае молекул воздуха длина каждого шага равна 0,00001 см, и если им нужно пройти расстояние, скажем, 10 м (1000 см), то приведенная выше формула дает нам, что общее число (случайных) шагов должно быть равно

$$\left(\frac{1000}{0,00001} \right)^2 = 10\,000\,000\,000\,000\,000.$$

При скорости 50 000 см/с каждый шаг будет сделан за 0,00001/0,0000000002 с, так что общее время путешествия составит 10 000 000 000 000 000 \times 0,0000000002 = 2 000 000 с, то есть 20 дней!

Как кинетическая теория тепла влияет на основной закон термодинамики, который гласит, что во всех термо-

динамических процессах энтропия должна возрастать? Что представляет собой энтропия с точки зрения статистической теории движения молекул? Почему тепло всегда течет от более теплых тел к более холодным и почему невозможно полностью превратить определенное количество тепла в механическую энергию, тогда как в том, чтобы превратить механическую энергию в тепло, нет проблем? Ответ на все эти вопросы приходит совершенно естественно, если представить, что происходит с молекулами в этих случаях. Рассмотрим емкость, разделенную на две половины термоизоляционной перегородкой. Наполним одну половину горячим газом, а другую холодным газом и уберем перегородку. Что произойдет? Очевидно, что быстрые молекулы горячего газа будут терять свою энергию, сталкиваясь с более медленными молекулами холодного газа, и процесс будет продолжаться до тех пор, пока не установится равновесное распределение энергии между всеми молекулами, то есть температура в обеих частях емкости не станет одинаковой. Похожая ситуация будет в случае ведра, нижняя половина которого заполнена черными бусинами, а верхняя — белыми. Если потрясти ведро, бусины перемешаются, так что и белые и черные бусины окажутся равномерно распределены по всему объему сверху донизу. Можно ли снова разделить их, если потрясти ведро? Теоретически да. Фактически нет причин, почему такое разделение не может иметь места, но очень маловероятно, что оно произойдет! Мы можем веками или даже миллионами лет трясти ведро, пока по какой-то случайности все черные бусины снова не окажутся внизу, а белые наверху. То же самое справедливо и для молекул. В принципе возможно, что одна половина молекул будет замедлена случайными столкновениями ниже средней скорости, а другая половина соответственно ускорится. Но это маловероятно!

Похожая ситуация существует в случае превращения механической энергии в тепло и наоборот. Представьте, что пуля попадает в стальную стену. Пока пуля летит к своей цели, все ее молекулы двигаются вместе в одном направлении и с одинаковой скоростью. (Это общее движение молекул, конечно, накладывается на их нерегулярное движение

при исходной температуре пули.) Когда пуля останавливается, ударившись о стену, это упорядоченное движение превращается в хаотичное движение отдельных частиц, усиливая изначальное тепловое движение молекул, из которых состоят пуля и стена. Мы снова можем представить себе обратный процесс, при котором молекулы, формирующие один конец металлического стержня, нагретого огнем, по чистой случайности имеют скорости, направленные в одну сторону и такие, что кусок металла отлетает в сторону, как пуля, выпущенная из ружья. Но это снова было бы исключительно маловероятное событие. Таким образом, мы видим, что закон увеличения энтропии — это просто утверждение, что *во всех естественных процессах упорядоченное движение молекул имеет тенденцию становиться хаотичным и случайным*. Все процессы идут в направлении от менее вероятного варианта движения молекул к более вероятному, и увеличение энтропии соответствует увеличению вероятности варианта движения молекул.

Следующим ниже простым способом можно вывести отношение между вероятностью заданного варианта движения молекул и энтропией, впервые предложенное Больцманом. Рассмотрим две термодинамические системы A и B , которые могут быть, например, двумя емкостями, заполненными двумя разными газами под разным давлением, или любые другие более сложные системы, содержащие жидкости, их испарения, твердые кристаллы, их растворы в жидкостях и т. д. Если обе системы имеют одинаковую температуру T и мы организуем их тепловой контакт между собой, никакого теплового потока в какую-либо сторону не возникает и обе системы останутся в тех же состояниях, в которых они находились, когда были разъединены. Предположим, что снаружи в системы поступает некоторое количество тепла, причем система A получает Q_A калорий, а система B — Q_B калорий. Если предположить, что системы разъединены, рост их энтропии составит Q_A/T и Q_B/T . Если считать их единой составной системой, то общий рост энтропии будет

$$\frac{Q_A + Q_B}{T}.$$

Постольку

$$\frac{Q_A + Q_B}{T} = \frac{Q_A + Q_B}{T},$$

получаем, что *энтропия составной системы равна сумме энтропий ее частей*.

Как выглядит эта ситуация с точки зрения вероятности различных вариантов движения молекул? Как выразить вероятность для составной системы *A* и *B* через вероятности для систем *A* и *B* по отдельности? Согласно математической теории вероятности, *вероятность составного события* (то есть события, которое должно удовлетворять нескольким независимым условиям) *определяется вероятностями независимых событий, из которых оно состоит*. Так что, если студентка, идущая на свидание вслепую, надеется, что ее ждет «высокий красивый брюнет», то вероятность, что ее надежды сбудутся, определяется вероятностями того, что он высокий, что он красивый и что он брюнет. Если шансы, что мужчина высок, равны $1/4$ (то есть один из четырех), шансы, что он брюнет, равны $1/3$, а что он красив — $1/50$, то вероятность выполнения всех трех условий будет:

$$1/4 \times 1/3 \times 1/50 = 1/600,$$

то есть один из шестисот.

Таким образом, если в составной термодинамической системе энтропии складываются, то вероятности должны перемножаться. Какая математическая зависимость между двумя величинами удовлетворяет этому условию? Да, конечно, логарифмическая зависимость. Поэтому энтропия должна меняться, как логарифм вероятности, и мы получаем:

$$S = k \log P,$$

где *k* — числовой коэффициент, который называется постоянной Больцмана.

Приведенная выше формула является мостом между классической термодинамикой и кинетической теорией тепла и позволяет нам рассчитывать все термодинамические величины на основании статистических соображений.

Демон Максвелла

Очень важным персонажем статистической физики является демон Максвелла — результат мысленного опыта Джеймса Клерка Максвелла (рис. 5.16), который внес такой большой вклад в эту область науки. Представьте себе крошечного, но очень активного демона (рис. 4.10), который может видеть отдельные молекулы и достаточно ловок, чтобы управляться с ними, как чемпион по теннису управляется с теннисными мячиками. Такой демон мог бы помочь нам преодолеть закон возрастания энтропии, манипулируя маленьким окошком в стене, разделяющей две камеры с газами *A* и *B*. Ставня этого окошка способна скользить без всякого трения, и демон открывает ее, когда видит особенно быструю молекулу, летящую в сторону окна, и закрывает, если приближающаяся молекула движется медленно. Таким образом, все быстрые молекулы из распределения Максвелла попадают в камеру *B*, а все медленные остаются в камере *A*. В результате тепло утекает в неправильном направлении, и *B* становится горячее, а *A* — холоднее, что нарушает второй закон термодинамики.

Почему это невозможно сделать без помощи реального демона, но с использованием какого-нибудь крошечного, хитро сконструированного физического устройства, которое работало бы подобным образом? Чтобы разобраться в ситуации, вспомним загадочный вопрос, заданный знаменитым австрийским физиком Эрвином Шрёдингером (рис. 7.19) в его очень интересной брошюре «Что такое жизнь?». «Почему атомы такие маленькие?» На первый взгляд этот вопрос кажется довольно бессмысленным, но он имеет смысл, и на него можно ответить, если переформулировать его и спросить: «Почему мы такие большие (по сравнению с атомами)?» Ответ состоит просто в том, что такой сложный организм, как человеческое существо с его мозгом, мышцами и т. д., не может состоять из нескольких дюжин атомов, точно так же, как нельзя построить большой готический собор всего из нескольких камней.

Демон Максвелла, как и любое механическое устройство, которое могло бы его заменить, должен был бы состоять из небольшого числа атомов и не смог бы выполнять возложенные на него сложные задачи. Чем меньше количество ча-

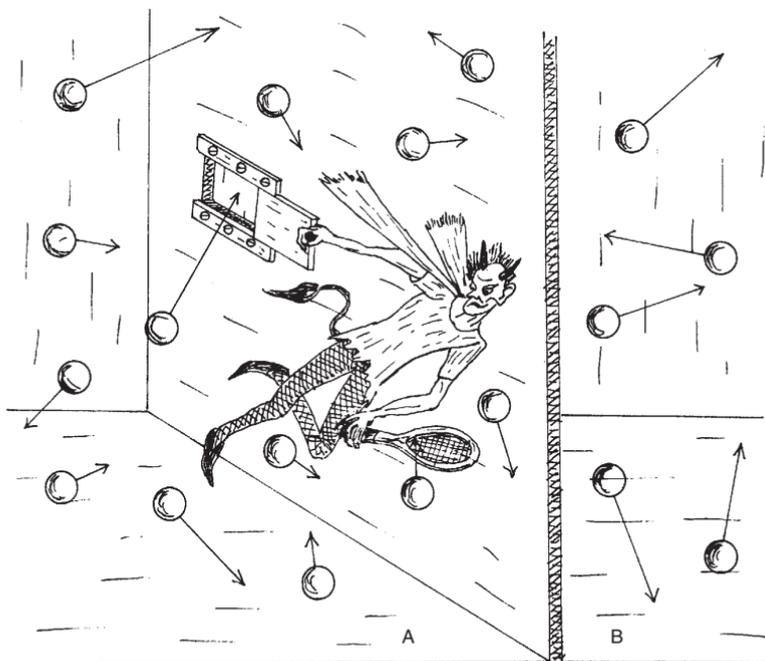


Рис. 4.10. Демон Максвелла, который якобы может разделять быстрые молекулы и медленные молекулы

стиц, тем больше статистических отклонений в их поведении, и автомобиль, в котором одно из четырех колес может внезапно подпрыгнуть и стать рулевым колесом, а радиатор стать топливным баком и наоборот, едва ли стал бы надежным транспортным средством! Точно так же демон Максвелла, реальный, или механический, будет совершать так много статистических ошибок, управляясь с молекулами, что общий результат окажется полностью провальным.

Микроскопическое движение тепла

Очень большие и очень маленькие цифры из мира молекул, приведенные выше, являются результатом вычислений, поскольку молекулы и их движения слишком малы,

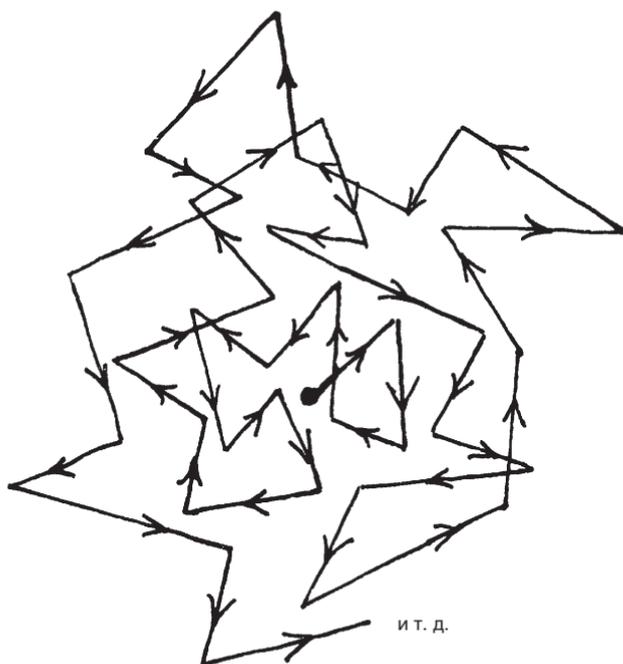


Рис. 4.11. Случайное блуждание — это движение тела, при котором направление движения часто и нерегулярно меняется в результате столкновения с другими телами, будь то молекулы, сталкивающиеся с другими молекулами, или пьяный, наткнувшийся на фонарные столбы. Ясно, что при таком блуждании тело проходит вперед меньше, чем при движении строго прямолинейно, и можно показать, что в этом случае среднее расстояние от начальной точки равно длине одного прямого шага, умноженной на квадратный корень числа шагов

чтобы их можно было увидеть даже в микроскоп. Однако случается, что мы можем перейти пропасть между невидимыми молекулами и большими телами, которые встречаются в повседневной жизни, наблюдая за поведением крохотных частиц диаметром 1 микрон (μ) или около того, с одной стороны, достаточно маленькими, чтобы играть заметную роль в движении тепла, с другой стороны, достаточно большими, чтобы их можно было увидеть с помощью хорошего микроскопа. Британский ботаник Роберт Браун

первым заметил, что споры растений, плавающие в воде, никогда не останавливаясь, исполняют какую-то «тарантеллу», беспорядочно дергаясь туда и обратно, словно их подталкивает какая-то невидимая сила (рис. 4.11). Сам Браун и современные ему ученые не могли объяснить это странное поведение крохотных частиц, и прошел почти век, прежде чем французский физик Жан Перрен объяснил, что это результат многочисленных толчков, которые они получают от молекул воды, участвующих в тепловом движении. Исследования броуновского движения, проведенные Перреном, предоставили неопровержимое доказательство правильности кинетической теории тепла и позволили физикам непосредственно наблюдать статистические законы движения, которые до этого были лишь теоретическими предположениями. Точная математическая теория броуновского движения была разработана молодым Альбертом Эйнштейном в одной из трех статей, которые он опубликовал в 1905 году. Другие две статьи были по квантовой теории света и теории относительности. Сегодня статистическая теория тепла под более общим названием «статистическая физика» по своей полноте и ясности сравнима только с ньютоновской механикой.

Движение тепла и распространение звука

Хорошо известно, что звук — это не что иное, как волна сжатия, распространяющаяся в воздухе и других материалах. При экспериментальных исследованиях обнаружился удивительный факт, что скорость звука не зависит от плотности воздуха и что на уровне моря она такая же, как в разреженных верхних слоях атмосферы. С другой стороны, эта скорость зависит от температуры воздуха, будучи прямо пропорциональна квадратному корню абсолютной температуры. Как можно объяснить эти факты с точки зрения молекулярной структуры и теплового движения?

Для того чтобы сделать это, мы должны вспомнить, что воздух состоит из множества молекул, хаотично двига-

ющихся в пространстве со скоростью, которая возрастает при повышении температуры. Когда появляется волна сжатия воздуха, скажем, от вибрирующего камертона, молекулы воздуха, находящиеся ближе всего к вилке камертона, отталкиваются в направлении движения и, сталкиваясь с другими молекулами, находящимися дальше (в следующем тонком воздушном слое), сообщают им толчки. Те, в свою очередь, толкают молекулы в следующем слое и, таким образом, сжатие распространяется по воздуху, формируя звуковую волну. Поскольку молекулы воздуха должны пролететь сравнительно большое расстояние (так называемый свободный путь), прежде чем они ударят молекулы следующего слоя воздуха, скорость распространения в основном определяется тепловой скоростью молекул. Эта динамическая картина объясняет два вышеуказанных факта, касающиеся скорости звука. Действительно, при заданной температуре тепловая скорость молекул остается неизменной независимо от того, сжат газ или разрежен. С другой стороны, поскольку кинетическая энергия молекул пропорциональна абсолютной температуре, их скорость возрастает, как квадратный корень этой температуры. И то, что справедливо для скорости молекул, должно быть так же справедливо и для скорости звука.

Совершенно иная ситуация возникает, когда скорость объекта, который производит сжатие газа, превышает скорость движения молекул при заданных условиях. Такое происходит, например, когда газы, образующиеся при взрыве, толкают окружающий воздух или когда воздух расталкивается в стороны крыльями или телом сверхзвукового самолета или ракеты. В этом случае тепловая скорость молекул недостаточно велика, чтобы они могли убежать от наступающего «толкателя», и они начинают натекать друг на друга, образуя кучу, в результате чего повышается плотность воздуха. Различие между этим случаем и описанным выше схематично показано на рис. 4.12. Наступающий фронт сильно сжатого газа образует то, что называется ударной волной. Благодаря сильно повышенной плотности ударные волны обладают способностью оказывать очень большое давление, которому они обязаны своей разруши-

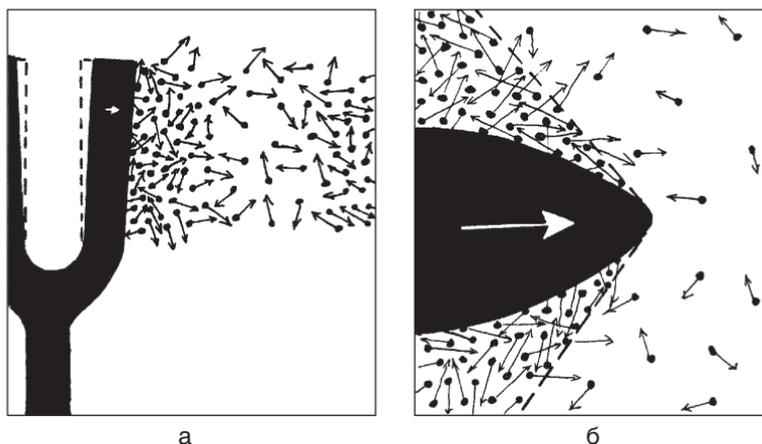


Рис. 4.12. Формирование звуковой волны в случае, когда «толкатель» движется медленнее, чем молекулы (а), и формирование ударной волны (стоячей), когда «толкатель» движется быстрее их (б)

тельной силой. В случае взрывов распространение горячих газов замедляется, сжатый воздух отделяется от исходного «толкателя» и продолжает двигаться в виде ударной волны. В случае сверхзвуковых самолетов и ракет, которые летят с постоянной скоростью, толкаемые вперед своими моторами, ударная волна остается неподвижной по отношению к движущемуся телу и потому называется стоячей ударной волной.

Излучение света горячими телами

Хорошо известно, что при нагревании до достаточно высокой температуры все материальные тела становятся светящимися. Именно так пламя порождает свет в старомодных газовых печках; так же порождают свет горячие нити современных электрических ламп. В масштабе космоса свет излучают Солнце и звезды, потому что их поверхности очень горячие. Из повседневного опыта известно, что при сравнительно низких температурах, как в

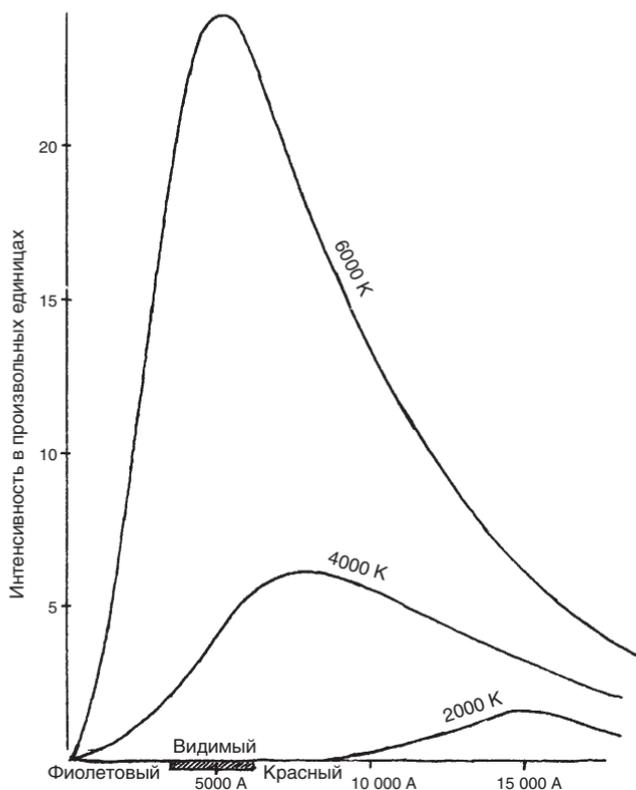


Рис. 4.13. Распределение энергии в непрерывном спектре, излучаемом телами при трех различных температурах

случае комнатных нагревательных приборов, мы имеем излучение тепла, но не видимого света. Кухонные нагревательные приборы при температуре $600\text{--}700^\circ\text{C}$ раскалены докрасна и излучают слабый красный свет. Нить электрической лампочки, нагретая до температуры выше 2000° , излучает яркий свет, который, однако, кажется желтоватым по сравнению со светом яркой электрической дуги, которая функционирует при температуре от 3000° до 4000° . Поверхность Солнца при температуре около 6000° излучает свет, который богаче в голубом диапазоне, чем свет от всех вышеупомянутых источников. Таким образом, *при повы-*

шении температуры излучаемая радиация становится более интенсивной и более богатой в диапазоне коротких световых волн. На рис. 4.13 показано распределение интенсивности между различными длинами волн, излучаемых материальными телами при различных температурах.

При температуре 2000 К вся энергия находится в области тепловых лучей длинных волн с нулевой интенсивностью в видимом диапазоне, показанном заштрихованным отрезком. При температуре 4000° К имеется излучение некоторого количества видимого света, но интенсивность красных лучей существенно превосходит интенсивность желтых, зеленых и синих лучей. При температуре 6000 К (температура на поверхности Солнца) максимальная интенсивность падает на желтую область спектра, и мы воспринимаем цвет смеси как белый свет. При еще более высоких температурах максимум интенсивности сдвигается в область невидимых ультрафиолетовых лучей. Существуют звезды, которые настолько горячи (несколько сот тысяч градусов), что большая часть излучаемого ими света приходится на долю невидимых ультрафиолетовых лучей.

Излучение света горячими телами подчиняется двум важным законам, открытым во второй половине XIX века:

Закон Вина, открытый немецким физиком Вильгельмом Вином (1864—1928). Он гласит, что *длина волны, соответствующая максимальной интенсивности в спектре, обратно пропорциональна (абсолютной) температуре излучающего горячего тела*. Из рис. 4.13 видно, что если при температуре 6000 К максимум интенсивности приходится на 5000 А, то при температуре 2000 К он смещается к 15 000 А.

Закон Стефана—Больцмана был открыт немецким физиком Йозефом Стефаном (1835—1893), а затем обоснован теоретически с использованием термодинамических аргументов Людвигом Больцманом, которого мы упоминали ранее в этом тексте. Этот закон гласит, что *общее количество энергии, излучаемой горячим телом, пропорционально четвертой степени его (абсолютной) температуры*. Действительно, на рис. 4.13 область, ограниченная кривой для 6000 К, в $3^4 = 81$ раз больше, чем область, ограниченная кривой для 2000 К.

Излучение света горячими газами

Излучение света горячими телами, обсуждавшееся в предыдущем параграфе, относилось к случаю твердых или жидких веществ, таких как расплавленное железо на литейном заводе*.

Совершенно иную ситуацию мы встречаем в случае света, излучаемого горячими газами. Если посмотреть через призму на свет, излучаемый газовой (или керосиновой) лампой, то виден непрерывный спектр, содержащий все цвета от красного до фиолетового. Но можно заметить, что на самом деле этот непрерывный спектр исходит не от газов в пламени, а, скорее, от крохотных твердых частичек содержащейся в нем сажи. Если добиться полного сгорания газа, как в горелке Бунзена, созданной немецким физиком Робертом Вильгельмом Бунзеном (1811—1899), получится пламя, которое, будучи очень горячим, излучает очень белый свет. Бунзен использовал свою горелку для изучения излучения различных веществ, находящихся в газообразном состоянии. Если поместить в пламя горелки Бунзена небольшое количество натрия (который можно использовать в форме хлорида натрия, то есть обычной поваренной соли), пламя становится ярко-желтым. При анализе этого света с помощью призмы, следуя старому методу Исаака Ньютона, выясняется, что спектр состоит из волн одного-единственного желтого диапазона, а все волны другой длины полностью отсутствуют (рис. 4.14, *a*). Похожим будет эксперимент с калием, который дает пламя ярко-красного цвета, то есть волны, расположенные в спектре еще правее. Другие вещества, превращенные грелкой Бунзена в пар, дают другие цвета, иногда единичные, иногда с несколькими составляющими.

* Вещество, из которого состоит Солнце, находится в газообразном состоянии, благодаря чрезвычайно высокой температуре, меняющейся от 6000 К на поверхности до 20 000 000 К в центре. Однако если не считать тонкого внешнего слоя, называемого хромосферой, газы, составляющие тело Солнца, сжаты до плотности, сравнимой с плотностью обычных твердых или жидких веществ и, следовательно, излучают непрерывный спектр.

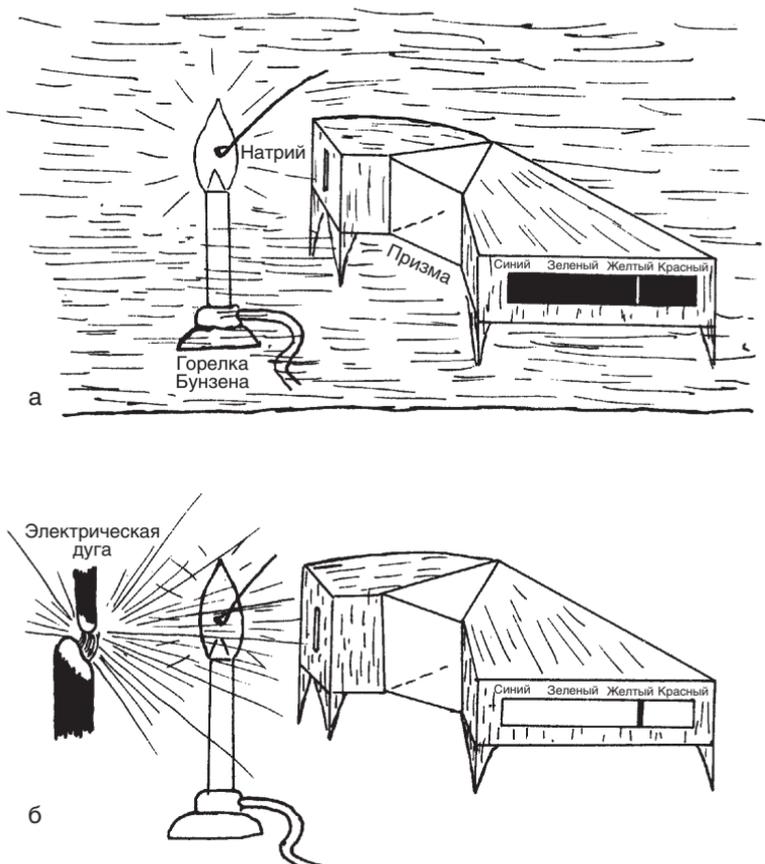


Рис. 4.14. Натрий, помещенный в горячее пламя, излучает характерную желтую линию (а). Когда белый свет от электрической дуги, содержащий волны всех длин, проходит через пламя, содержащее натрий, на том месте, где раньше было яркое излучение, появляется темная линия поглощения (б)

Почему горячий газ излучает свет строго определенной длины волны (или, что то же самое, строго определенной частоты), в то время как горячие твердые тела или жидкие вещества излучают волны всех длин, составляющих цветовой спектр? Как мы увидим дальше в этой книге, атом или молекулу можно сравнить с музыкальным инструментом,

единственная разница в том, что они излучают не звуковые, а световые волны. Музыкальный инструмент, будь то скромный камертон или большой рояль, сделан таким образом, чтобы порождать только определенный набор звуковых частот (для камертона одних, для рояля других), которые звучат одна за другой в соответствии с мелодией. Атомы и молекулы тоже излучают световые волны определенной длины, характерные для каждого из них. В газах атомы и молекулы свободно летают в пространстве, время от времени сталкиваясь друг с другом. При каждом столкновении они «возбуждаются» (если температура достаточно высока) и улетают дальше, вибрируя и излучая характерные для них световые волны. Таким образом, пары натрия, меди, железа или чего-то еще излучают характерные для них цвета спектра, по которым их можно распознать. Между тем в твердых телах атомы плотно прижаты друг другу, и ситуация больше напоминает большой ящик, в который кое-как, друг на друга свалены все инструменты симфонического оркестра. Если потрясти ящик, послышится шум, представляющий собой слышимые частоты и не имеющий ничего общего с отдельными характеристиками сложенных туда инструментов. Аналогично атомы, стиснутые в куске металла или в любом другом твердом (или жидком) веществе, полностью теряют свойства, присущие им в чистом виде, и свет, излучаемый раскаленным докрасна железом, не сильно отличается от того, что излучает раскаленная докрасна медь или что-либо еще.

Специфика светового излучения различных веществ составляет основу важного метода спектрального анализа, который позволяет определять химический состав любого заданного вещества, просто наблюдая свет, излучаемый его испарениями.

Поглощение света

Давайте теперь вернемся к эксперименту (рис. 4.14, а) с горелкой Бунзена, в пламя которой помещено некоторое количество натрия. Предположим, что мы поместили по-

зади пламени очень сильный источник света с непрерывным спектром, например электрическую дугу (рис. 4.14, б). Свет от раскаленного добела электрода дуги проходит сквозь пламя и, падая на щель, создает радужную полосу в спектроскопе. Но мы заметим, что непрерывность цвета прерывается узкой темной линией ровно в том месте, где была желтая линия от натрия. Такой эффект создается благодаря важному явлению, называемому *резонансом*, возникающему во всех случаях, когда мы имеем дело с какими-либо колебаниями. Представьте себе ребенка на качелях, которого качает отец. Если отец толкает качели ритмично, делая это в такт с движением самих качелей, то амплитуда этого движения становится все больше и больше, и ребенок будет либо доволен, либо испуган. Но если отец отвлекается на хорошенькую няню, стоящую поблизости, и не подталкивает качели в нужное время, ничего хорошего из его усилий не выйдет. Иногда он будет толкать качели, когда они уходят от него, и это будет помогать, но иногда он будет толкать, когда качели движутся на него, и это будет мешать. Чтобы увеличить амплитуду любого колебания, нужно прикладывать силу с периодичностью, равной периоду колебания самого объекта. Если поместить два одинаковых камертона близко друг к другу и заставить один из них колебаться, ударив по нему молоточком, исходящие от него звуковые волны в скором времени приведут в движение второй камертон. Но если два звучащих камертона имеют разные периоды колебаний, ничего не произойдет. Похожим образом, чтобы настроить радиоприемник или ТВ на нужную программу, нужно повернуть ручку, задающую частоту колебаний, так, чтобы эта частота совпала с частотой вещательной станции.

Эксперимент с пламенем, содержащим натрий, относится к той же категории. Атомы натрия резонируют с той длиной волны непрерывного спектра от дуги, которую они сами излучают и распространяют во всех направлениях, ослабляя, таким образом, исходный луч. В этом случае черная линия поглощения, конечно, не очень темная. На самом деле она может быть даже ярче, чем исходное излучение, но кажется очень темной по сравнению с другими

частями непрерывного спектра от дуги. Закон, гласящий, что *все вещества поглощают свет той же частоты, которую они могут излучать*, был открыт немецким физиком Густавом Киркхоффом (1824—1887), и носит его имя. Этот закон имеет огромное значение во многих направлениях физики, химии и астрономии. Одним из его важнейших применений является исследование химического состава Солнца и других звезд.

В начале XIX века немецкий физик Йозеф фон Фраунхофер (1787—1826), повторяя опыты Ньютона с солнечным спектром, использовал призмы гораздо более высокого качества и с удивлением увидел, что цвета радуги перекались большим числом очень тонких черных линий. Происхождение этих линий Фраунхофера можно легко объяснить на основании того, о чем ранее говорилось в этой главе. Мы установили, что, хотя тело Солнца целиком состоит из газообразного вещества, оно излучает непрерывный спектр просто потому, что его атомы сжаты так тесно, что у них нет места, чтобы излучаемые волны не накладывались на излучение соседей. Однако самый внешний слой солнечного тела, называемый хромосфера, состоит из сильно разреженных горячих газов и *действительно* излучает чистые видимые тона. Когда непрерывный спектр из *фотосферы* (то есть *плотного тела Солнца*) проходит сквозь хромосферу, те волны, которые соответствуют присутствующим в ней химическим элементам, поглощаются и ослабевают, и в первоначальной чистой радуге появляются темные линии Фраунхофера. Использование спектрального анализа в астрономии привело к огромным достижениям в нашем знании о Солнце и звездах и открыло глазам человека бесконечные горизонты мироздания, в котором мы живем. На вкладке II мы воспроизвели видимую и ультрафиолетовую часть спектра Солнца, полученного Фраунхофером. Спектр получен с помощью современных инструментов.

Глава 5

ЭРА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Ранние открытия

Как мы утверждали в главе 1, явления электричества и магнетизма были известны древним грекам и, вероятно, остальному Древнему миру. Однако первые систематические исследования этих явлений были предприняты только с началом возрождения искусства и науки. Сэр Уильям Гильберт, личный врач королевы Елизаветы I и современник Галилео, провел тщательное исследование магнитных взаимодействий и опубликовал свои результаты в книге *De Magnete*, где содержится описание всех основных качественных свойств магнитов. Гильберт был ярким приверженцем картины мира, данной Коперником, и надеялся, что силы, которые удерживают планеты на их орбитах при вращении вокруг Солнца, могут быть объяснены как результат магнитного притяжения. Чтобы изучить эту проблему более глубоко, он соорудил шары из магнетита (магнитного железняка) и изучал поле вокруг них с помощью крошечной магнитной стрелки, помещенной в разные места и на разные расстояния от шаров. Гильберт обнаружил, что в одной точке сферы максимально притяжение одного конца стрелки, а в противоположной точке максимально притяжение другого конца. В разных точках на поверхности сферы стрелка всегда ориентируется в определенном направлении вдоль большой окружности, соединяющей точки максимального притяжения, или магнитные полюса сферы. Это было очень похоже на поведение стрелки компаса в различных точках на поверхности Земли, и Гильберт

пришел к выводу, что наш глобус можно рассматривать как гигантский магнит с полюсами, расположенными вблизи географического Северного и Южного полюсов. Такая концепция существовала веками и, будучи расширена математически великим немецким математиком Карлом Гауссом, является на сегодняшний день стандартным элементом теории земного магнетизма. Вместе с тем попытки Гильберта представить магнитные силы причиной движения планет вокруг Солнца полностью провалились, и прошло более ста лет, прежде чем Ньютон объяснил это движение силами всемирного тяготения, которые не имеют никакого отношения к магнетизму.

Когда у Ньютона уже родились мысли о всемирном тяготении, но он еще держал их в секрете, немецкий физик Отто фон Герике, больше всего известный своими экспериментами с так называемыми магдебургскими полусферами (двумя металлическими полусферами, которые, откачав из них воздух, соединили вместе, после чего их не могли растащить в стороны две упряжки лошадей), попытался объяснить притяжение между планетами и Солнцем электрическими взаимодействиями. Несмотря на то что в решении этой задачи он, как и Гильберт, потерпел неудачу, Герике сделал много важных открытий, касающихся свойств электрических зарядов. Он обнаружил, что янтарь, если его потереть, притягивает к себе легкие предметы, например маленькие кусочки бумаги, и в то же время два легких предмета, если их прислонить к натертому янтарю, будут потом отталкиваться друг от друга. Он также обнаружил, что электрический заряд может быть перенесен от одного тела к другому не только с помощью непосредственного контакта, но также с помощью мокрой веревки или, еще лучше, металлической проволоки, протянутой между ними. Дальнейшие исследования электричества, проведенные в начале XVIII века Дю Феем, привели к открытию существования двух видов электричества: того, которое появляется, если потереть янтарь, сургучную печать, твердую резину и другие, похожие на смолу материалы, и того, которое возникает, если потереть стекловидные материалы, такие как стекло или слюда. Эти два вида электричества

были названы «смоляным» и «стеклянным» электричеством, и было установлено, что электрические заряды одного типа отталкиваются, а электрические заряды разных типов притягиваются. Предполагалось, что электрически нейтральные тела содержат равное количество электричества обоих типов, тогда как электрически заряженные тела имеют превышение одного типа электричества над другим. Феномен, который впервые наблюдал Отто фон Герике, объяснили взаимодействием между этими двумя типами электрических флюидов. Предположим, что мы потеряли шар из твердой резины и он получил заряд смоляного электричества. Если поднести близко к нему маленький незаряженный предмет, в котором сбалансированы оба типа электричества, то смоляное электричество будет оттеснено в дальнюю сторону этого тела, а стеклянное электричество окажется притянутым к той стороне, которая ближе всего к резиновому шару. Поскольку электрические взаимодействия уменьшаются с увеличением расстояния, сила притяжения, действующая на стеклянный заряд, будет больше, чем сила отталкивания смоляного заряда, и совокупным эффектом будет притяжение между этими телами. Если вместо шара из твердой резины взять шар из стекла, результат будет тем же самым, за исключением того, что типы зарядов поменяются местами. Таким образом, нейтральные тела всегда будут притягиваться к заряженным телам. Явление разделения зарядов в изначально незаряженном теле называется электрической поляризацией, или индукцией. Теперь если обеспечить контакт двух маленьких тел с большим заряженным телом, то они зарядятся электричеством одного типа и, будучи отодвинуты в сторону, станут отталкиваться друг от друга.

Во время ранних исследований электричества были изобретены два очень важных электрических приспособления: *лепестковый электроскоп* и *лейденская банка*. Этот электроскоп (рис. 5.1, а), то есть инструмент, показывающий наличие электрического заряда, был впервые создан английским физиком Хоксби в 1705 году и состоял из двух соломинок, прикрепленных рядом друг с другом к нижнему концу металлического стержня. Когда стержень заряжали

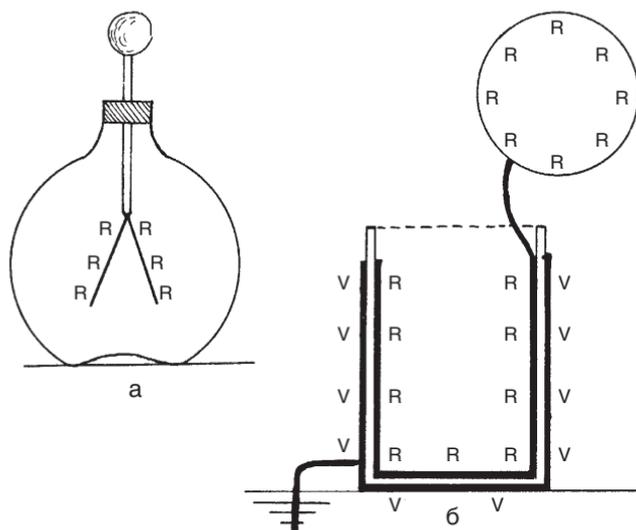


Рис. 5.1. Лепестковый электроскоп (а) и лейденская банка (б)

смоляным или стеклянным электричеством, обе соломинки становились заряженными одинаковым типом электричества и отклонялись друг от друга. Мы до сих пор используем это приспособление, только заменив соломинки гораздо более легкими листочками золота. Лейденская банка (рис. 5.1, б), сделанная группой ученых из университета города Лейдена, была задумана, чтобы собирать большое количество электричества. Ее сделали из обычной цилиндрической стеклянной банки, внешняя и внутренняя сторона которой были обернуты тонкой серебряной фольгой. Если внешняя фольга заземлена (то есть соединена с землей), а внутренняя соединена с заряженным телом или наоборот, то электричество (либо смоляное, либо стеклянное) пытается уйти в землю, но его останавливает слой стекла. Таким образом, в банке скапливается большое количество электричества, и, соединив с помощью проволоки внешнюю и внутреннюю фольгу, можно получить впечатляющий разряд. Сегодня эта старинная лейденская банка превратилась в разнообразные конденсаторы, состоящие из большого числа металлических пластин, разделенных тон-

кими слоями воздуха, стекла или слюды. Такие конденсаторы, способные хранить большое количество электричества, используются во всех направлениях физики и электротехники. В частности, первый ускоритель ядерных частиц, созданный в 1930 году в Кембриджском университете Джоном Кокрофтом и И.Т.С. Уолтоном, состоял из батареи таких конденсаторов, которую можно было зарядить до 1 млн вольт. Когда конденсаторы разряжали через стеклянную трубку, содержащую водород, они создавали поток «атомных снарядов» такой огромной энергии, что, попадая в мишень из лития, помещенную в конце трубки, они расщепляли атомы лития надвое.

К тому же периоду относится работа великого американского государственного деятеля и писателя Бенджамина Франклина, который заинтересовался физикой уже в зрелом возрасте 40 лет. Он не был удовлетворен маленькими разрядами, которые можно получить, если потереть галошу о меховое пальто, и хотел поиграть с большими молниями, подобным тем, которые Зевс бросал с неба во время грозы. Поэтому он направлял воздушных змеев в грозовые тучи, чтобы собирать из них электричество. Мокрые веревки, державшие змея, служили прекрасными проводниками, и с их помощью ему удавалось заряжать лейденские банки, а затем получать из них разряды. Его исследования, собранные в книге «Опыты и наблюдения над электричеством, сделанные в Филадельфии, Америка» (1753), позволили ему стать членом Лондонского королевского общества и ассоциированным членом Парижской королевской академии наук. Бросая своими опытами вызов Зевсу, он был не столь успешен в теоретической интерпретации электричества как явления, предложив всего одну гипотезу. Он утверждал, что «различные» типы электричества — это всего лишь один тип электрических флюидов и что два типа электризации соответствуют *избытку* или *недостатку* этих невесомых флюидов. Соответственно, он назвал тело с *избытком* стеклянного электричества (например, стеклянный стержень, если его потереть) *положительно* заряженным телом, а тело с его *недостатком* (например, резиновый стержень, если его потереть) *отрицательно* заряженным

телом. Когда два тела: одно содержащее избыток, другое — недостаток электрических флюидов, встречаются вместе, электрический ток должен течь от первого тела, где есть избыток, ко второму, где есть недостаток. Эти идеи Бенджамина Франклина привели к современной терминологии, согласно которой электрический ток течет от положительного электрода (анода) к отрицательному (катоде). Сегодня мы знаем, что идея Дю Фоя о двух типах электрических флюидов ближе к реальности, чем гипотеза Франклина, хотя ситуация гораздо сложнее, чем представления каждого из них. Существуют и положительно, и отрицательно заряженные частицы, и для каждой частицы, несущей обычно либо положительный, либо отрицательный заряд, имеется соответствующая античастица, несущая противоположный заряд. Франклин был ближе к истине в случае электрического тока в металлическом проводе, где передача электричества происходит исключительно благодаря движению электронов, если не считать того, что электроны не несут смоляное, как и стеклянное, электричество. Сегодня можно иногда услышать предложение, что следует поменять местами названия положительного и отрицательного электричества, чтобы обычное направление тока от $+$ к $-$ совпадало с направлением движения электронов. Однако если бы это было сделано, то возникли бы проблемы с ускорителями, которые обстреливают атомы-мишени высокоэнергетическими протонами. Вместо того чтобы вытекать из «дула» ускорителя, электрический ток должен был бы течь из мишени. А в случае жидкостей, где электричество несут и положительные и отрицательные ионы, движущиеся в противоположных направлениях, такое изменение терминологии было бы совсем ни к чему.

Закон электрической и магнитной сил

В течение второй половины XVIII века физики многих стран проводили количественные исследования электромагнитных сил. Одно из первых величественных открытий в этом направлении сделал француз Шарль Огюстен де Ку-

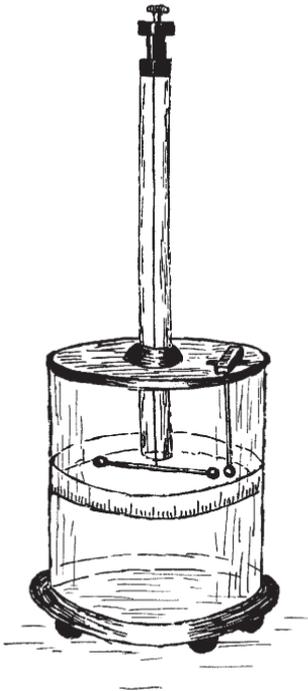


Рис. 5.2. Крутильные весы Кулона

лон, который создал так называемые крутильные весы для измерения очень слабых сил. Как можно видеть на рис. 5.2, где представлен рисунок инструмента, сделанного Кулоном, он состоит из легкого стержня, подвешенного на длинной тонкой нити с двумя одинаковыми шариками на концах. Когда на эти шарики не действуют никакие силы, стержень находится в некотором устойчивом положении. Если один из шариков электрически заряжен и в непосредственной близости к нему помещен другой заряженный шарик, электрическая сила, действуя на подвижный шарик, заставит стержень поворачиваться вокруг точки подвеса, пока крутящий момент не будет уравновешен действующей силой. Поскольку нить очень тонкая, слабая сила, действующая на шарик, приве-

дет к существенному отклонению стержня от первоначальной позиции и угол поворота будет пропорционален этой силе.

Заряжая подвижный и неподвижный шарики разным количеством электричества и меняя расстояние между ними, Кулон открыл закон, носящий его имя, согласно которому силы электрического притяжения и отталкивания прямо пропорциональны произведению двух зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними (рис. 5.3). Используя этот закон, можно определить *единицу электростатического заряда*, как заряд, который действует с силой 1 дина на равный ему заряд, помещенный на расстоянии 1 см от него. На практике используется гораздо большая единица заряда, называемая *кулон*, которая

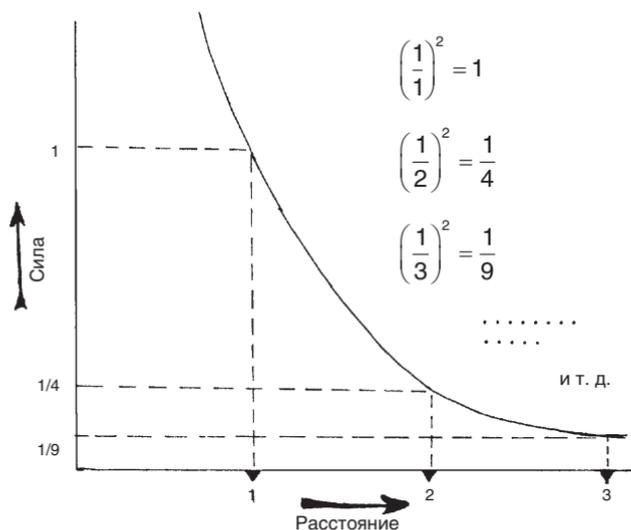


Рис. 5.3. Кривая закона Кулона

равняется 3 млрд маленьких единиц электростатического заряда, определенных выше. Используя те же самые крутильные весы и подвешивая на нити магнит, и еще один, опущенный вертикально через щель в крышке контейнера, Кулон доказал, что взаимодействие двух магнитов подчиняется такому же закону.

Соответственно, единица намагничивания определяется как сила магнитного заряда, который с силой в 1 дину притягивает или отталкивает аналогичный магнитный заряд, помещенный на расстоянии 1 см от него.

Примерно в то же время в Англии жил очень нелюдимый человек по имени Генри Кавендиш, сын английского пэра. Он не имел близких друзей, боялся женщин, и женской прислуге в его большом доме, расположенном в лондонском районе Клэптон-Коммон, было приказано не показываться ему на глаза, а пожелания по приготовлению еды получать с помощью записок, которые он оставлял на столике в холле. Он не интересовался ни музыкой, ни каким-либо искусством и все время проводил в устроенной в его большом доме личной лаборатории, где он проводил опыты по физи-

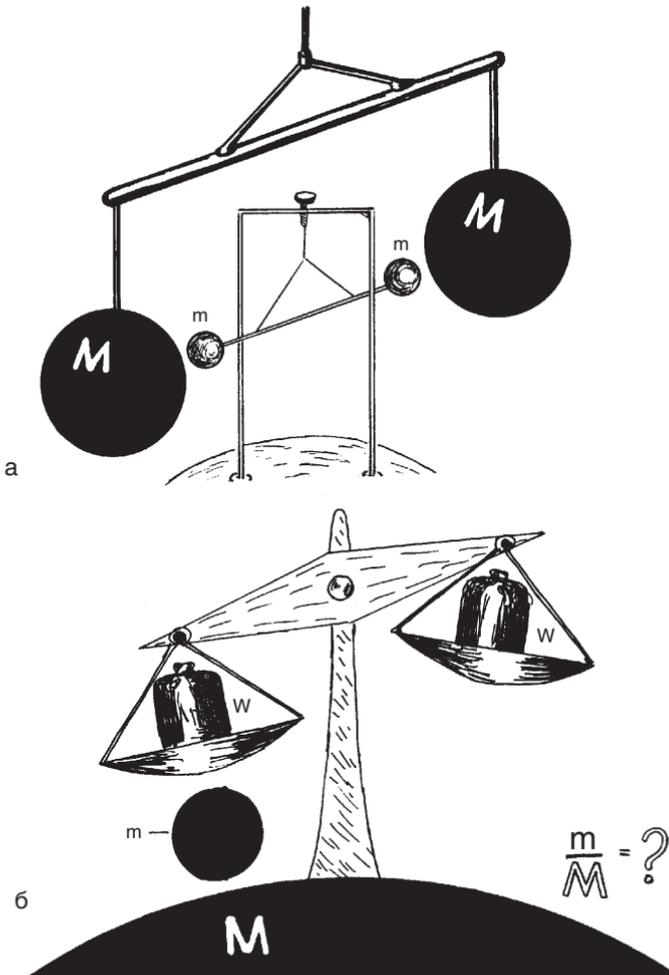


Рис. 5.4. Устройство Кавендиша для измерения гравитационного притяжения было похоже на устройство Кулона для измерения электрических сил. Меняя положение двух больших грузов M , подвешенных к потолку, можно было наблюдать изменение положения двух маленьких грузов m , подвешенных на очень тонкой нити (а). Также показан модифицированный метод Кавендиша. Два груза w , предварительно находившиеся в равновесии под действием земного притяжения (массы Земли M), приходят в движение, когда под один из них помещают дополнительный груз m (б)

ке и химии. Его работу прерывали только традиционные прогулки для здоровья и редкие посещения обедов в клубе Королевского общества, где он получал информацию о том, что делают другие физики и химики. За время своей долгой жизни (он умер в возрасте 79 лет) Генри Кавендиш опубликовал только горстку сравнительно несущественных статей. Но после его смерти на его банковском счете было обнаружено около миллиона фунтов, а в его лаборатории было найдено двадцать стопок листов с записями. Очень долгое время эти записи оставались в руках его родственников, но, когда они были опубликованы, стало ясно, что Генри Кавендиш был одним из величайших ученых-экспериментаторов, когда-либо живших на земле. Он открыл все законы электрических и магнитных взаимодействий в то же время, что и Кулон, а его работа по химии могла сравниться с работой Лавуазье. Более того, он применил весы для изучения очень слабых гравитационных сил между маленькими объектами и на базе этих опытов получил точное значение массы Земли (рис. 5.4). Его именем не названа ни одна физическая единица, но лаборатория Кавендиша в Кембридже является одним из самых современных в мире центров научных исследований.

Разряд от электрического угря

Уроженцы Африки и Южной Америки давно знакомы с удивительной тропической речной рыбой, которая больно бьет током каждого, кто пытается ее схватить. В середине XVIII века британский корабль привез несколько экземпляров этой рыбы в Лондон, и биологи начали ее изучать. Было обнаружено, что разряд возникает, только если одновременно прикоснуться одной рукой к верхней части головы рыбы и к нижней части ее тела. Этот факт и ощущение от удара током напоминали эффект от недавно изобретенной лейденской банки, и рыбу назвали *sirius electronicus*, или электрический угорь. Когда ученые подтвердили, что эту рыбу можно использовать, чтобы заряжать лейденскую банку, не осталось сомнений в том, что они имеют дело с электрическим разрядом. Электричество, производимое рыбой, при-

влекло внимание итальянского физиолога Луиджи Гальвани, который изучал феномен мускульного сокращения лягушачьих лапок — любимого деликатеса в ресторанах Болоньи. Однажды (как гласят рассказы о нем) он заметил, что отрезанные лягушачьи лапки, подвешенные на медных крючках к железной балюстраде его балкона, дергаются, как живые, когда прикасаются к железным прутьям. Решив проверить это «при контролируемых условиях», Гальвани провел эксперимент, датированный в его записной книжке 20 сентября 1786 года, где он использовал вилку с одним железным и одним медным зубцом, которой он прикасался к нерву и мышце лягушачьей лапки. Лапка тут же сокращалась при каждом прикосновении, и Гальвани пришел к выводу, что это похоже на удар током, производимый электрическим угрем. Однако он был абсолютно не прав в своем предположении, и вскоре его друг итальянский физик Алессандро Вольта доказал, что электрический ток, вызывающий сокращение лягушачьей лапки, — это совершенно *неорганическое* явление, которое можно наблюдать всегда, если концы провода, сделанного из двух спаянных вместе проводов из разного металла, опустить в водный раствор соли. Вольта назвал это явление *гальванизмом* в честь своего друга физиолога и создал то, что называют батареей Вольта, используя большое количество чередующихся медных и железных или цинковых дисков, разделенных слоями ткани, намоченной соевым раствором. Батарея Вольта стала прототипом современных электрических батареек, которые используются во множестве самых разных приборов. В марте 1800 года Вольта послал для публикации рукопись, описывавшую его открытия, в Королевское общество Лондона, которое в то время было международным центром по обмену научными идеями. В этой статье он пишет:

«Да, устройство, о котором я вам рассказываю и которое наверняка вас удивит, это не что иное, как набор хороших проводников разного типа, расположенных в определенном порядке. 30, 40, 60 и более кусков меди или лучше серебра, каждый из них положен на кусок олова или, что гораздо лучше, цинка, и такое же количество слоев воды или какой-то другой жидкости, которая проводит ток луч-

ше, чем простая вода, например, соленой воды, шелока или кусков картона, кожи и т. д., хорошо вымоченных в этих жидкостях. Такие слои прокладываются между каждой парой или комбинацией из разных металлов, и эта чередующаяся последовательность трех типов проводников — всегда в одном и том же порядке — это все, из чего состоит мое новое устройство, которое имитирует, как я уже говорил, эффекты лейденских банок или электрических батарей, порождающих такой же разряд...

В этой статье я намерен дать вам более подробное описание этого устройства и кое-каких похожих приспособлений, а также самых замечательных экспериментов с ними».

Оригинальный рисунок, сделанный самим Вольта, показан на рис. 5.5.

Затем произошла одна очень неприятная вещь. Господа Карлайл и Николсон, которые отвечали за публикации в Королевском обществе, положили рукопись на полку, повторили опыты Вольта и опубликовали результаты под своими именами. Но обман не сработал. Результаты исследований Алессандро Вольта стали известны из других источников, Карлайла и Николсона обвинили в плагиате, и они канули в небытие. И сегодня *батарея Вольта* и *вольт*, как единица электрического потенциала, напоминают нам об этом талантливом итальянском ученом. *Электрический потенциал* характеризует степень электризации заряженных тел. Предположим, у нас есть большой сферический проводник, заряженный определенным количеством электричества, и мы хотим увеличить этот заряд. Это можно сделать, поместив с помощью заизолированного держателя маленький металли-



Рис. 5.5. Батарея Вольта

ческий шар, заряженный определенным количеством электричества, на некотором расстоянии от большого шара (теоретически на бесконечном расстоянии), и затем обеспечить контакт между ними. Из-за кулоновского отталкивания двух шаров для того, чтобы обеспечить этот контакт, необходимо будет проделать определенную работу. Работа, которую необходимо проделать, чтобы увеличить заряд большого шара на единицу электризации, называется электрическим потенциалом. Если измерять электрический заряд в *кулонах*, а работу в *джоулях*, электрический потенциал будет измеряться в *вольтах*.

Электромагнетизм

Несмотря на то что ранние исследователи электрических и магнитных явлений должны были почувствовать некую глубинную связь между ними, они не могли ее уловить. Электрические заряды никак не влияли на магниты, как и магниты на электрические заряды. Честь открытия моста между электричеством и магнетизмом досталась датскому физiku Гансу Христиану Эрстеду, который, узнав о работе Алессандро Вольта, создал свою собственную электрическую батарею и провел с ней разнообразные опыты. Однажды в 1820 году, когда он направлялся читать лекцию в Копенгагенском университете, его посетила идея. Если статическое электричество никак не влияет на магниты, то, возможно, дело будет обстоять иначе, если попытаться заставить электричество двигаться по проводу, соединяющему полюса батареи Алессандро Вольта. Придя в аудиторию, набитую толпой молодых студентов, Эрстед поставил на стол лектора батарею Вольта, соединил два противоположных конца платиновой проволокой и поместил рядом с ним стрелку компаса. Стрелка, которой полагалось всегда показывать направление север—юг, повернулась и встала перпендикулярно проволоке (рис. 5.6).

На аудиторию это не произвело большого впечатления, но на Эрстеда произвело. После лекции он остался в аудитории, пытаясь разобраться с необычным явлением, кото-

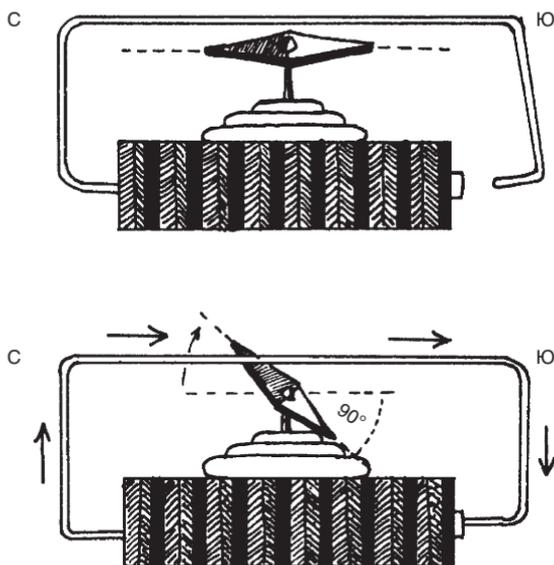


Рис. 5.6. Открытие Эрстеда — взаимодействие электрического тока и магнита

рое только что открыл. Сначала он подумал, что движение стрелки компаса могло быть вызвано тепловым потоком, идущим от провода, нагретого электричеством. Чтобы это проверить, Эрстед поставил кусок картона между проводом и компасом, перекрыв поток воздуха. Ничего не изменилось. Тогда он повернул батарею Вольта на 180° , чтобы ток в проводе пошел в противоположном направлении. Стрелка компаса тоже повернулась на 180° , и теперь ее северный конец указывал в том направлении, куда раньше указывал южный. Эрстеду стало совершенно ясно, что существует взаимосвязь между магнитами и движущимся электричеством, и направление, в котором поворачивается стрелка компаса, зависит от направления, в котором течет ток в проводе. Эрстед записал все факты и наблюдения, относящиеся к этому открытию, и отправил их для публикации во французский журнал *Annales de Chimie et de Physique*. Статья появилась в конце 1820 года со следующим примечанием от издателей: «Читатели *Annales*, должно быть,

заметили, что мы не слишком охотно поддерживаем заявления об удивительных открытиях и до сегодняшнего дня были вполне удовлетворены этой политикой. Но что касается статьи господина Эрстеда, полученные им результаты, какими бы удивительными они ни казались, сопровождаются такими многочисленными подробностями, что не оставляют места для ошибки».

Таким образом, *электромагнетизм*, как его назвал Эрстед, стал реальностью!

Когда новости об открытии Эрстеда дошли до Парижа, оно привлекло внимание французского математика и физика Андре Мари Ампера, который за несколько коротких недель обнаружил, что электрический ток действует не только на магнитную стрелку, но два электрических тока действуют друг на друга. Между двумя параллельными проводниками существует притяжение, если ток в них течет в одном направлении, и отталкивание, если направления движения токов противоположны (рис. 5.7). Он показал, что виток медной проволоки, который может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, если по нему течет ток, ориентируется в направлении север—юг, как стрелка компаса, а два таких витка взаимодействуют между собой почти так же, как два магнитных стержня. Это привело его к мысли, что природный магнетизм вызван электрическим током, текущим в намагниченных телах. Он решил, что каждая молекула магнитного вещества содержит внутри себя круговой ток и, следовательно, представляет собой крошечный электромагнит. Когда вещество не намагничено, каждый молекулярный электромагнит ориентирован в любом случайном направлении, и общий результат равен нулю. В намагниченных телах молекулярные магниты ориентированы, по крайней мере частично, в одном направлении, что является причиной их магнитного притяжения или отталкивания.

Эти выводы Ампера полностью подтверждены современной физикой, которая считает, что магнитные свойства атомов или молекул вызваны вращением электронов вокруг ядра или их быстрым вращением вокруг своих осей. Поскольку Ампер был первым, кто четко сформулировал идею об электрическом токе, как движении электричества

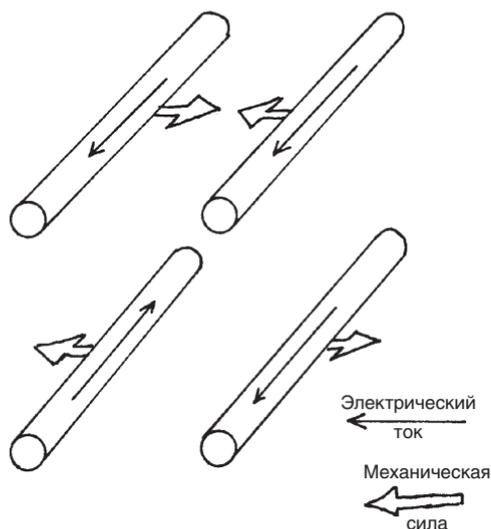


Рис. 5.7. Законы Ампера о взаимодействии между токами

по проводу, единица электрического тока носит его имя. Один *ампер* определяется как ток, при котором через поперечное сечение проводника проходит 1 кулон в секунду.

Будучи великим ученым в своей области, Ампер оставался при этом классическим рассеянным профессором. Говорят, что во время лекций он часто использовал тряпку, которой стирают мел с классной доски, вместо носового платка, а однажды, гуляя по улицам Парижа, принял кузов грузового кеба, остановившегося на повороте, за доску и принялся писать на нем математические формулы. Когда кеб тронулся с места, он пошел, а потом побежал за ним, полный решимости закончить вывод выражения. Однажды, когда Наполеон Бонапарт посещал Парижскую академию, Ампер не узнал его, и Наполеон с улыбкой заметил: «Вот видите, сэр, как плохо редко встречаться с коллегами. Я никогда не видел вас в Тюильри, но знаю, как заставить вас прийти, хотя бы для того, чтобы поздороваться со мной!» И пригласил его на следующий день во дворец на обед. Но на следующий день его место за обеденным столом осталось пустым: Ампер забыл о приглашении!

Законы электрической цепи

В то время как Ампера интересовали в основном магнитные эффекты, связанные с электрической цепью, немецкий физик Георг Симон Ом, в то время работавший школьным учителем в Кёльне, хотел понять, как сила электрического тока зависит от материала проводника, по которому он течет, и электрического потенциала, который заставляет его двигаться. Он использовал несколько последовательно соединенных батарей Вольта, которые создавали электрическое напряжение разного уровня, и гальванометр, еще раньше созданный Ампером, в котором сила электрического тока измерялась с помощью отклонения магнитной стрелки. Используя провода разной длины и разного сечения, сделанные из разных металлов, Ом обнаружил, что сила тока прямо пропорциональна поперечному сечению провода, обратно пропорциональна его длине и зависит от материала, из которого он сделан. Он также открыл, что для любого заданного провода сила тока пропорциональна разности *электрических потенциалов* между двумя концами последовательно соединенных батарей Вольта, которые обеспечивают прохождение тока по проводу. Ситуация очень похожа на ту, когда качают воду по трубе, заполненной каким-нибудь стекловолокном, которое оказывает сопротивление свободному прохождению жидкости. В этом случае сила потока воды тоже будет возрастать вместе с давлением, производимым насосом, и увеличением поперечного сечения трубы, и падать с увеличением длины трубы, а также будет зависеть от природы и количества материала, находящегося в трубе, который сопротивляется свободному течению воды*.

Таким образом, Ом ввел понятие электрического *сопротивления* различных проводников, заявив, что сила тока прямо пропорциональна разности электрических потенци-

* Эта аналогия полностью соответствует современным взглядам на электрический ток в металлических проводах, согласно которым он вызван потоком так называемых свободных электронов, прокладывающих себе путь под действием электрического напряжения сквозь плотную гущу атомов, из которых состоит металл.

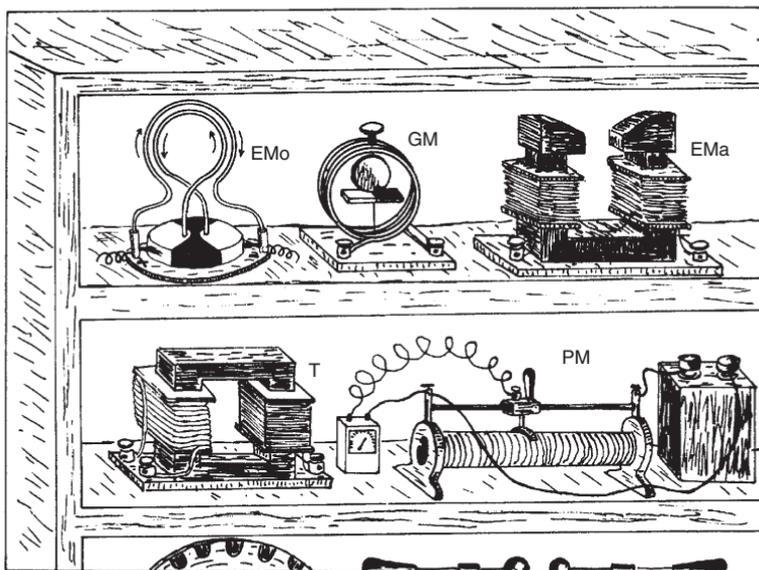


Рис. 5.8. Различные электроприборы:

Электромотор (Е.Мо). Электрические токи проходят в противоположных направлениях по двум электрическим цепям, одна из которых подвижная, другая неподвижная. Результирующие силы отталкивания вынуждают подвижную цепь повернуться вокруг своей оси. Однако благодаря скользящему контакту нижнего диска направление тока меняется на противоположное, и цепь вынуждена поворачиваться дальше.

Гальванометр (Г.М.). Когда электрический ток проходит по виткам, маленький магнит, подвешенный на тонком проводе, поворачивается. Чем сильнее ток, тем больше угол поворота, который измеряется с помощью светового луча, отраженного от маленького зеркала.

Электромагнит (Е.Ма.). Когда через катушки проходит постоянный ток, между полюсами появляется сильное магнитное поле.

Трансформатор (Т.). Когда переменный ток определенного напряжения проходит через катушку с маленьким количеством витков (*слева*), в катушке с гораздо большим количеством витков из тонкой проволоки появляется гораздо большее напряжение (*справа*).

Потенциометр (Р.М.). Ток от батареи проходит через реостат. Переменное напряжение может быть получено от провода, присоединенного к скользящему контакту, при перемещении его вправо или влево

алов, порождающих ток, и обратно пропорциональна сопротивлению проводника, которое, в свою очередь, зависит от материала проводника, пропорционально его поперечному сечению и обратно пропорционально его длине. Свои открытия он опубликовал в 1827 году в статье, озаглавленной «Математическое исследование гальванической цепи», положившей начало всем будущим исследованиям электрических цепей. Закон Ома можно выразить двумя простыми формулами:

$$\text{сила тока} = \frac{\text{разность электрических потенциалов}}{\text{сопротивление провода}}$$

и

$$\text{сопротивление провода} = C \frac{\text{поперечное сечение провода}}{\text{длина провода}},$$

где C — константа, характеризующая используемый материал. В его честь единица электрического сопротивления названа 1 ом . Она равняется сопротивлению, которое оказывает ток в 1 ампер при разности потенциалов 1 вольт. Иногда вместо электрического потенциала говорят об электрической проводимости, которая является его прямой противоположностью. Достаточно естественно, что единица электрической проводимости была названа *тхо**, как противоположность *омт* (*ом*). На рис. 5.8 показаны различные электрические приборы, использованные при экспериментальных исследованиях электричества.

Открытия Фарадея

Майкл Фарадей (рис. 5.9), который довел классические исследования явлений электричества и магнетизма до апогея и открыл новую эру, называемую нами современной физикой, родился в 1791 году недалеко от Лондона в семье кузнеца. Семья была слишком бедной, чтобы оставить его в школе, и в 13 лет он стал мальчиком на побегушках в книж-

* Сейчас используется единица сименс: международное обозначение S , русское $См$.



Рис. 5.9. Майкл Фарадей и его трубки

ном магазине некоего мистера Робау. Годом позже мистер Робау взял его учеником переплетчика на срок семь лет. Фарадей не только переплетал книги, которые приходили в магазин, но и читал многие из них от первой до последней страницы, что возбудило в нем горячий интерес к науке.

О своей юности Фарадей писал следующее: «Будучи учеником, я любил читать научные книги, которые были у меня под рукой, и среди них мне особенно нравилась книга „Беседы о химии“ Марке и трактаты об электричестве из „Британской энциклопедии“. Я делал простые опыты, которые можно было себе позволить, потратив несколько пенсов в неделю, и соорудил электрическую машину, сначала из стеклянного пузырька, а потом из настоящего цилиндра, а также другие электрические устройства подобного рода».

В течение последнего года обучения, когда ему едва перевалило за двадцать (и когда открытия Гальвани и

Вольта были еще свежими научными новостями), он написал своему старому другу Бенджамину Эбботу:

«Недавно я провел несколько несложных гальванических опытов, просто чтобы проиллюстрировать себе главные принципы этой науки. Я пошел в магазин, чтобы купить никеля, и чуть не забыл спросить, нет ли у них мягкого цинка. Потом спросил и купил немного — ты уже видел такой? Первая порция, которую я получил, состояла из самых тончайших листочков, какие только возможны. Мне сказали, что этого хватит, чтобы сделать электрическую палочку, или, как я раньше ее называл, электрический столб. Я взял его, чтобы сделать диски и, соединив их с медяками, соорудить маленькую батарею. Первая, которую мне удалось собрать, состояла из огромного числа пластин — а именно из семи пар — невероятного размера в полпенса!!!

Я, сэр, я сам, вырезал семь дисков размером с полпенни каждый. Я сам покрыл их семью монетками в полпенса и проложил между ними семь или, точнее, шесть кусочков бумаги, намоченной в растворе хлористого калия!!! Но не стоит смяться, мой дорогой Э. Скорее удивись, какой эффект произвела эта нехитрая установка. Ее оказалось достаточно, чтобы произвести разложение сульфата магнезии — что меня очень удивило, потому что я не знал и не мог знать, что это вещество подходит для подобных целей. Должен сказать, эта мысль меня поразила. Я организовал с помощью медной проволоки контакт между верхом и низом батареи и раствором. Ты можешь поверить, что именно медь разложила сульфат — я имею в виду, ту часть, которая была погружена в раствор? В том, что гальванический эффект имел место, я уверен, потому что оба провода ненадолго покрылись пеной и каким-то газом и по раствору от отрицательного провода побежал постоянный поток очень мелких пузырьков, похожих на маленькие частички. Доказательством, что сульфат разложился, стало то, что примерно через два часа прозрачный раствор стал мутным; в него проникла магнезия».

Так было открыто химическое разложение вещества под действием электрического тока, или *электролиз*, как назвал его Фарадей. В последовавшие за этим годы работы над

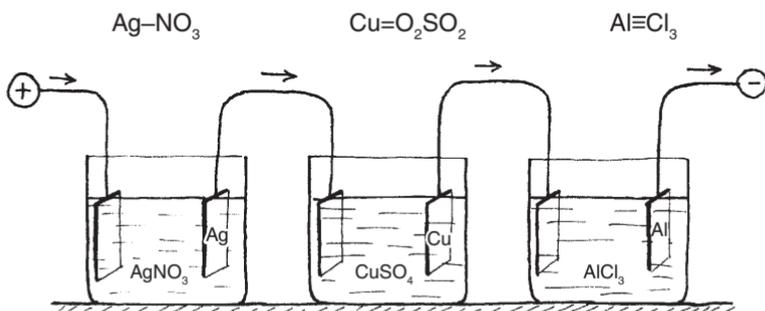


Рис. 5.10. Демонстрация законов электролиза Фарадея. Если пропустить электрический ток через растворы нитрата серебра, сульфата меди и хлорида алюминия, металлы будут оседать на электродах. Было обнаружено, что количество осажденного металла прямо пропорционально количеству электричества, поданного на электрод (первый закон Фарадея). Также было обнаружено, что если количество осажденного серебра было равно 108 г/моль (атомный вес серебра), то количество осажденной меди было только 31,7 г/моль (половина атомного веса меди), а количество осажденного алюминия равнялось только 9 г/моль (одна треть атомного веса алюминия). Поскольку через все три контейнера проходит одинаковое количество электричества, приходим к выводу, что ион меди несет электрический заряд вдвое больший, чем ион серебра, а ион алюминия — в три раза больший. Что соответствует химической валентности этих трех металлов, как подтверждают их формулы, показанные в верхней части рисунка. Это второй закон Фарадея

этим явлением Фарадей открыл два базовых закона, которые теперь носят его имя. Первый закон Фарадея гласит, что *масса вещества, выделяемая на электроде электрическим током, пропорциональна количеству электричества (то есть силе тока, умноженной на время), прошедшему через раствор электролита*. Это означает, что заряженные молекулы (которые позже были названы ионами), несущие электричество через растворы электролитов, имеют точно определенный электрический заряд (рис. 5.10).

Согласно второму закону Фарадея, *моновалентные ионы различных веществ также несут равное количество электричества, тогда как двух-, трех- и т. д. валентные ионы несут, соответственно, большие заряды*. Это доказывает существование универсальной единицы электрического заряда, кото-

рая во времена Фарадея считалась присущей только различным атомам, но позже была обнаружены в форме свободных электронов, летающих в пространстве.

Но, даже открыв электролиз, Фарадей все еще должен был искать себе работу, поскольку через несколько месяцев заканчивался срок его ученичества в книжном магазине. Больше всего ему хотелось работать со знаменитым химиком сэром Хемфри Дэви, лекции которого Фарадей посещал в годы своего ученичества. Он переписал конспекты лекций Дэви каллиграфическим почерком, снабдил их мастерски выполненными рисунками и отправил этот элегантно переплетенный томик Дэви с запиской, в которой просил дать ему работу в лаборатории. Когда Дэви попросил совета у одного из руководителей Королевского института Великобритании, где он служил профессором, о том, стоит ли брать на работу молодого переплетчика, тот ответил: «Пусть моет бутылки! Если он чего-то стоит, то согласится на эту работу, если откажется, значит, ни на что не годен».

Фарадей согласился и оставался в Королевском институте следующие 45 лет своей жизни, сначала как ассистент Дэви, потом как его коллега, а после смерти Дэви как его преемник.

Помимо многочисленных публикаций в научных журналах, самым примечательным документом, относящимся к его исследованиям, был его *дневник*, который он вел постоянно с 1820 по 1862 год. В 1932 году он был опубликован Королевским институтом в виде семи толстых томов, содержащих в общей сложности 3236 страниц и несколько тысяч рисунков на полях. Мы процитируем из этого дневника слова Фарадея о его самом важном открытии, а именно об *электромагнитной индукции*:

«29 авг. 1831 г.

1. Опыт по получению электричества из магнетизма и т. д.

2. Имеется железное кольцо (из мягкого железа), толщины железа (диаметр) $\frac{7}{8}$ дюйма, внешний диаметр кольца 6 дюймов. [Рис. 5.11.] Обмотаем одну половину витками медной проволоки, разделив витки шпагатом и ситцем, — было взято три 3 меры проволоки, каждая длиной 24 фута, которые можно использовать, как соединив в одну длину, так и

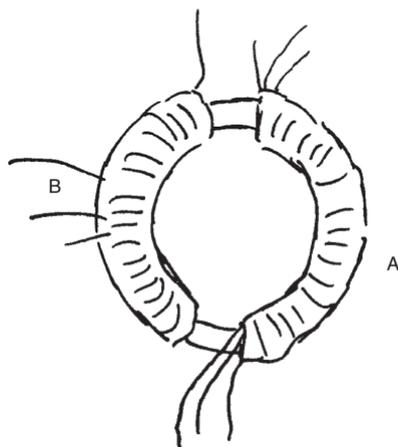


Рис. 5.11. Рисунок из дневника Фарадея, иллюстрирующий открытие электромагнитной индукции. Появление и исчезновение электрического тока в катушке *A* индуцирует кратковременный электрический ток в катушке *B*

отдельно. Каждый кусок был изолирован от другого. Обозначим эту сторону кольца *A*. На другой стороне, но с интервалом была намотана проволока из двух кусков, составлявших вместе около 60 футов в длину, направление было то же, что и в предыдущем случае. Обозначим эту сторону *B*.

3. Заряженная батарея из 10 пар пластин по 4 квадратных дюйма. Объединим витки на стороне *B* в одну катушку и соединим ее концы медной проволокой, проходящей на некотором расстоянии прямо над магнитной стрелкой (в 3 футах от кольца) Затем присоединим один из кусков обмотки на стороне *A* с батареей. Сразу же возникает заметное движение стрелки. Она колеблется и, в конце концов, останавливается в исходном положении. При разрыве связи стороны *A* с батареей, стрелка снова приходит в движение».

Таким образом, ток в одной катушке может порождать ток в другой, расположенной близко к ней, так же как электрический заряд одного тела порождает поляризацию другого соседнего с ним тела. Но если в случае электрической поляризации эффект статичен и длится, пока тела остаются близко друг к другу, индукция электрического

тока — это динамический процесс, и ток во второй катушке существует только в те периоды, когда ток в первой катушке либо растёт от нуля до своего нормального значения, либо убывает от этого значения до нуля.

Меньше чем через три месяца после этого эпохального открытия Фарадей сделал другой важный шаг в исследовании взаимоотношений между электричеством и магнетизмом. Ниже описано, как это было, согласно его дневнику.

«17 окт. 1831 г.

56. Сделан полый цилиндр из бумаги, обмотанный 8 спиралями медной проволоки, намотанной в одном направлении, имеющими следующие параметры:

	футов	дюймов
1 или самая внешняя	32	10
2	31	6
3	30	
4	28	
5	27	
6	25	6
7	23	6
8 или самая внутренняя	22	
	220	футов, не считая выступающих концов

Каждая изолирована шпагатом и ситцем. Внутренний диаметр бумажного цилиндра — $13/16$ дюйма, внешний диаметр целого — $1\frac{1}{2}$ дюйма, а длина медных спиралей (как и цилиндра) — $6\frac{1}{2}$ дюйма.

57. Опыты с 0. Восемь концов спиралей на одном конце цилиндра были зачищены и стянуты в одну связку. [Рис. 5.12.] Затем эта связка концов была подсоединена к гальванометру с помощью длинных медных проволок. Цилиндрический магнитный стержень диаметром $3/4$ дюйма и длиной $8\frac{1}{2}$ дюйма был просунут одним концом внутрь бумажного цилиндра, а затем его быстро протолкнули внутрь на всю длину, и стрелка гальванометра сдвинулась. После этого магнит вынули, и стрелка снова сдвинулась, но теперь в обратном направлении. Этот эффект возникал только от приближения магнита, а не когда он оставался на месте.

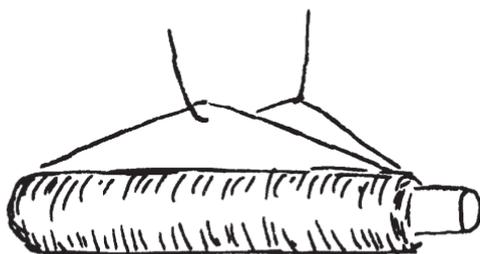


Рис. 5.12. Рисунок из дневника Фарадея, иллюстрирующий опыт, в котором магнит порождал электрический ток в катушке, когда его помещали внутрь или вытаскивали из этой катушки

58. Стрелка не оставалась в отклоненном положении и каждый раз возвращалась на место. Как и в предыдущих экспериментах, порядок действий был изменен на противоположный, и движения стали происходить в направлении, соответствующем предыдущим экспериментам, то есть стрелка пыталась встать параллельно магниту, находящемуся на той же стороне от провода, и одноименные полюса были расположены в том же направлении.

59. Когда 8 спиралей были объединены в одну длинную спираль, результат на гальванометре был не таким сильным, как раньше, вероятно, даже меньше чем в два раза. Так что лучше, когда они разделены и собраны вместе на конце.

60. Когда использовалась только одна из 8 спиралей, мощность эффект меньше, едва уловимый».

Здесь появление электрического тока в катушке тоже было *динамическим* явлением, и ток существовал, только когда магнит помещали внутрь или вынимали из катушки. Во времена Фарадея мысль о том, что магнетизм должен порождать электрический ток, как и то, что электрический ток порождает магнетизм, висела в воздухе, и многие физики пытались увидеть этот эффект. Но, будучи сбиты с толку аналогией с электростатической индукцией, они проводили опыты только со *статическими* конфигурациями магнитов и цепей, как, например, намагниченный стержень, обмотанный проволокой, который упрямо отказывался порождать разряды, когда оба его конца соединяли вместе. Именно благодаря гению Фарадея, а может быть, огромному коли-

честву опытов, которые он проводил изо дня в день, стало ясно, что индукция электрического тока — это *динамический* процесс, требующий либо изменения силы второго тока, либо изменения положения магнита. Единственным другим физиком, которого посетила та же идея, был американец по имени Джозеф Генри, но он так долго колебался с тем, чтобы заявить об этом, что приоритет открытия остался за человеком с другого берега Атлантического океана.

Пытливый ум Фарадея не остановился на распутывании скрытой связи между электричеством и магнетизмом. Ему хотелось узнать, могут ли магниты воздействовать на оптические явления. Это привело к открытию вращения плоскости поляризации света, проходящего сквозь прозрачные материалы, помещенные в магнитное поле. И снова процитируем, что пишет об этом открытии сам Фарадей:

«13 сент. 1845 г.

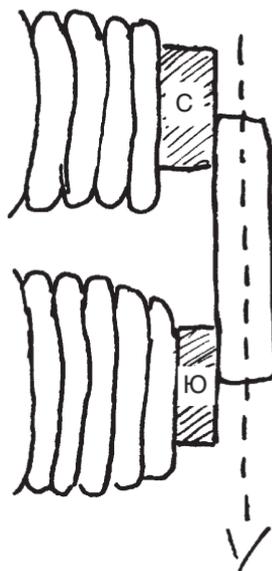
7498. Сегодня работал с магнитными силовыми линиями, проводя их через разные тела (прозрачные в разных направлениях), и в то же время проводил сквозь них поляризованный луч света, а затем исследовал этот луч с помощью призмы Николя и других средств. В качестве магнитов брал электромагниты, одним из которых был наш большой цилиндрический электромагнит, а другим — железный сердечник, помещенный внутрь спирали на рамке. Этот был не такой сильный, как первый. Ток от 5 ячеек батареи Грове пускали одновременно через обе спирали, а магниты возникали и исчезали благодаря пуску или остановке электрического тока».

После описания нескольких опытов, давших отрицательные результаты, в которых луч света проходил сквозь воздух и несколько других субстанций, Фарадей в тот же день пишет:

«7504. Тяжелое стекло

Опыт проводился с куском тяжелого стекла размером 2 дюйма на 1,8 дюйма и толщиной 0,5 дюйма, отполированного с двух коротких сторон. Оно не давало эффекта ни когда *одинаковые* или *противоположные магнитные полюса* находились с противоположных сторон (по отношению к ходу поляризованного луча), ни когда одинаковые полюса были

Рис. 5.13. Рисунок из дневника Фарадея, иллюстрирующий открытие действия магнитного поля на свет. Когда поляризованный свет распространяется вдоль магнитных силовых линий, плоскость поляризации поворачивается на угол пропорциональный силе магнитного поля



на одной стороне, либо с постоянным, либо с прерывающимся током. Но когда противоположные магнитные полюса были с одной стороны [рис. 5.13], эффект в отношении поляризованного луча появился, и таким образом, было доказано, что магнитная сила и свет влияют друг на друга. Этот факт, скорее всего, окажется чрезвычайно плодотворным и важным в исследованиях обоих этих природных сил».

Так, определено, и случилось! Эффект Фарадея, или вращение плоскости поляризации света, распространяющегося вдоль магнитных силовых линий, демонстрирует тесную связь между световыми волнами, представляющими собой очень короткие электромагнитные волны, и электрическими токами внутри отдельных атомов. Эти крохотные электрические контуры, существование которых впервые предположил Ампер, сегодня интерпретируются как следствие вращения электронов атома вокруг его ядра. Рассмотрим два одинаковых атома, помещенных в магнитное поле таким образом, что один электрон вращается по часовой стрелке, а второй в обратном направлении (рис. 5.14). В одном случае магнитное поле будет оказывать на движущийся электрон силу, направленную в сторону ядра, тогда как в другом случае сила будет направлена в противоположную сторону. Таким образом, в первом случае диаметр орбиты электрона будет уменьшаться, а частота вращения увеличиваться, тогда как во втором случае все наоборот. Эта разница в поведении между внутриатомными токами будет действовать на распространение электромагнитных

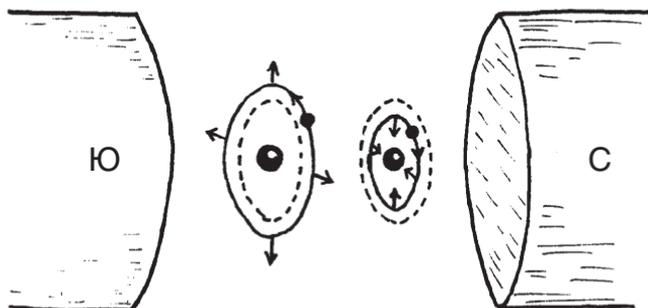


Рис. 5.14. Объяснение эффекта Фарадея. Сила, действующая на электрон атома, движущийся в магнитном поле, зависит от направления его движения. В случае его вращения против часовой стрелки (слева) эта сила увеличивает радиус орбиты и уменьшает частоту. В случае его вращения по часовой стрелке (справа) сила уменьшает радиус орбиты и увеличивает частоту. Взаимодействуя со светом, эти два вида движения электронов вращают плоскость поляризации

(световых) волн сквозь вещество, и можно показать, что результатом станет вращение плоскости поляризации, которую наблюдал Фарадей.

Постоянно думая о том, что все явления физического мира тем или иным образом взаимосвязаны, Фарадей пытался установить связь между электромагнитными силами и ньютоновскими силами тяготения. В 1849 году он написал в своем дневнике: «Гравитация. Конечно, эта сила должна быть способна взаимодействовать с электричеством, магнетизмом и другими силами, так чтобы это взаимодействие проявлялось в совместном действии с этими силами или иным аналогичным образом. Надо подумать, как приступить к решению этого вопроса, опираясь на факты и опыты».

Но многочисленные опыты, которые провел Фарадей, чтобы открыть такое взаимодействие, оказались безрезультатными, и он завершает эту часть дневника словами: «На данный момент я заканчиваю свои опыты. Результаты отрицательные. Они не поколебали моей глубокой уверенности в существовании связи между гравитацией и электричеством, хотя и не подтвердили, что такая связь существует».

Спустя век другой гений многие десятилетия ломал голову в попытке разработать так называемую единую теорию поля, которая бы объединила явления электромагнетизма и гравитации. Но, как и Майкл Фарадей, Альберт Эйнштейн умер, так и не завершив решение этой задачи.

Электромагнитное поле

Впечатляющие экспериментальные открытия Фарадея соответствовали его теоретическим идеям. Учитывая недостаток образования и практически полное незнание математики, Фарадей не мог быть физиком-теоретиком в обычном понимании этого слова. Но дело в том, что для получения теоретической картины загадочного физического явления знание сложной математики часто совсем не нужно, а иногда даже вредно. Экспериментатор может просто потеряться в джунглях запутанных формул и, как гласит русская поговорка, «за деревьями не увидеть леса». До Фарадея электрические, магнитные и гравитационные силы обычно считались действующими в пустом пространстве, которое разделяло взаимодействующие объекты. Однако для неискушенного ума Фарадея такое «действие на расстоянии» казалось лишенным физического смысла, и, видя, как груз перемещается с одного места в другое, он хотел видеть также и веревку, которая его тащит, или палку, которая его толкает. Таким образом, чтобы представить себе силы, действующие между электрическими зарядами или магнитами, он должен был представить, что пространство между ними заполнено чем-то, что может тащить или толкать. Он говорил о чем-то похожем на резиновые трубки, которые расположены между противоположными электрическими зарядами, или магнитными полюсами (рис. 5.15, а), и соединяют их вместе. В случае зарядов или полюсов одного знака резиновые трубки идут в разные стороны (рис. 5.15, б) и отталкивают их друг от друга. Направление этих трубок Фарадея в случае магнитов можно обнаружить, разложив тонкие листочки железа на стеклянной поверхности, на которой размещен магнит. Листочки намагнитятся и сориентируются в направлении магнитных сил, действующих вдоль трубок, по-

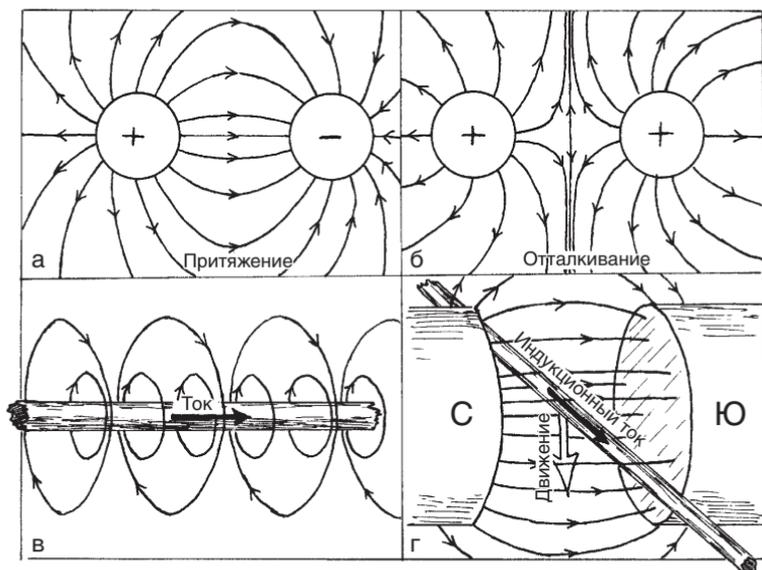
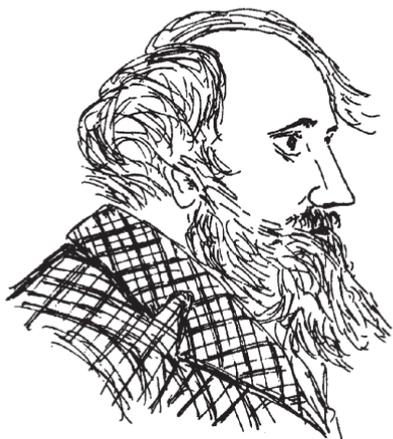


Рис. 5.15. Линии Фарадея, соответствующие разным типам электромагнитных взаимодействий: электрические силовые линии между двумя противоположными электрическими зарядами (а); электрические силовые линии для одноименных электрических зарядов (б); магнитные силовые линии вокруг провода, по которому течет ток (в); электрический ток, появившийся в проводе, движущемся (белая стрелка) через магнитные силовые линии (г). Маленькие черные стрелки указывают обычное направление силовых линий: от положительного заряда к отрицательному и от северного полюса к южному

рождая картину, показанную на вкладке III. В случае электрического поля похожие результаты могут быть получены с помощью электрической поляризации, но этот эксперимент более сложен для проведения. Согласно Фарадею электрические и магнитные трубки отвечают также и за различные электромагнитные явления. Когда ток течет по электрической цепи, его окружают трубки в форме колец (рис. 5.15, в), которые создают напряжение в магнитной стрелке, ориентируя ее в нужном направлении. Когда проводник движется к магниту (или наоборот), он пересекает магнитные трубки (рис. 5.15, г) и в результате в нем появляется ток.



$$\operatorname{div} \vec{E} = S : \operatorname{div} \vec{H} = 0$$

$$\operatorname{curl} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\delta \vec{H}}{\delta t}$$

$$\operatorname{curl} \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\delta \vec{E}}{\delta t} + S \frac{\vec{u}}{c}$$

Рис. 5.16. Джеймс Клерк Максвелл и его уравнения для электромагнитного поля

Эти идеи Фарадея были в каком-то смысле несколько наивными и носили в значительной степени качественный характер, но они провозгласили новую эру в развитии физики. Загадочные силы, действующие между телами на больших расстояниях, были заменены «чем-то», постоянно существующим в пространстве вокруг них, «чем-то», чему можно приписать определенное значение в любой отдельно взятой точке. Это привнесло в физику идею «силового поля», или просто «поля», будь то электрическое, магнитное или гравитационное взаимодействие. Теперь силы, действующие между материальными объектами в пустом пространстве, могли рассматриваться как результат взаимодействия между окружающими их полями.

Задача придания идеям Фарадея количественных математических формулировок легла на плечи знаменитого шотландца Джеймса Клерка Максвелла (рис. 5.16), который родился в Эдинбурге всего через два месяца после того, как Фарадей объявил об открытии электромагнитной индукции. В отличие от Фарадея Максвелл был очень хорошим математиком. В возрасте 10 лет Максвелл поступил в школу при Эдинбургской академии и был вынужден посвятить много времени изучению неправильных греческих

глаголов и других направлений гуманитарных наук. Но он предпочел бы заниматься математикой, и первым успехом, по его собственным словам, стало то, что он «сделал тетраэдр, додекаэдр и еще два ...эдра, правильное название которых я не знал».

В возрасте 14 лет он получил медаль академии за статью, где показал, как сделать идеальный овал с помощью булавок и нитки. Через несколько лет после этого Максвелл представил Королевскому обществу две статьи: одна «О теории кривых качения», другая «О равновесии упругих твердых тел». Обе статьи были прочитаны перед обществом кем-то другим, поскольку «не годится, чтобы мальчишка в короткой курточке поднимался здесь на трибуну». В 1850 году в возрасте 19 лет Максвелл стал студентом Кембриджского университета, через четыре года получил диплом и в 1856 году занял место на кафедре естественной философии Маришал-колледжа в Абердине, где работал до тех пор, пока в 1874 году не был снова приглашен в Кембридж в качестве первого директора вновь созданной лаборатории Кавендиша.

Несмотря на то что первоначально интересы Максвелла лежали полностью в сфере чистой математики, он вскоре стал живо интересоваться применением математических методов к различным физическим задачам. Он внес очень существенный вклад в кинетическую теорию тепла (см. главу 4), но, несомненно, самой важной его работой стало математическое описание идей Фарадея, касающихся природы и законов электромагнитного поля. Обобщая эмпирические факты о том, что изменение магнитных полей порождает электродвижущие силы и электрический ток в проводниках, тогда как изменение электрических полей и движущийся электрический ток порождают магнитные поля, он написал знаменитые уравнения, носящие теперь его имя, в которых связал скорость изменения магнитного поля с пространственным распределением электрического поля и наоборот. Используя уравнения Максвелла и зная распределения намагниченных тел, заряженных проводников и электрических токов, можно рассчитать все характеристики окружающего их электромагнитного поля и его изменение во времени. Максвелл показал, что, хотя элек-

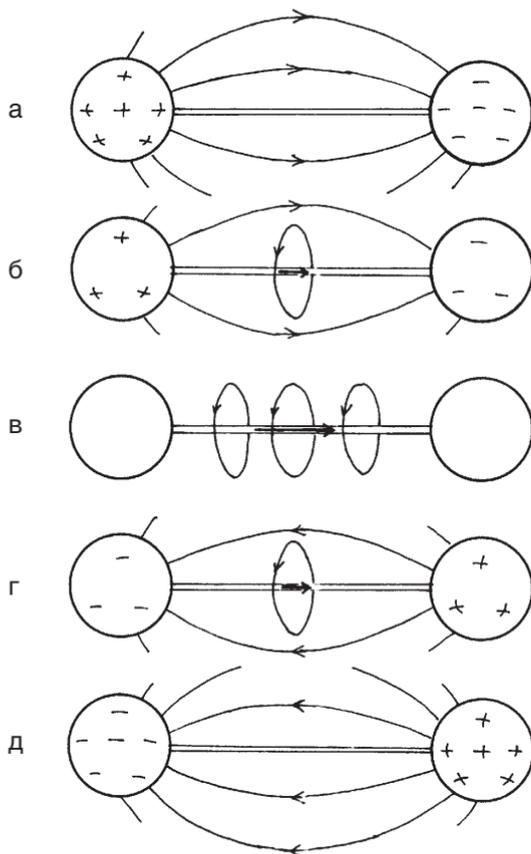


Рис. 5.17. Электромагнитные колебания между двумя проводниками, в процессе которых энергия электрического поля (а) периодически трансформируется в энергию магнитного поля (в) и обратно (д)

трические и магнитные поля обычно «привязаны» к электрически заряженным и намагниченным телам, они могут также существовать и распространяться в пространстве в форме свободных электромагнитных волн. Чтобы пояснить этот пункт, рассмотрим два сферических проводника, один из которых заряжен положительно, а другой отрицательно (рис. 5.17, а). В пространстве, окружающем эти две сферы, существует статическое электрическое поле, хранящее

электрическую энергию зарядов примерно так же, как туго сжатая пружина хранит запас механической энергии. Если соединить провода, прикрепленные к обеим сферам, от одной сферы к другой потечет электрический ток, а их заряды и окружающее их электрическое поле начнут быстро уменьшаться (рис. 5.17, б), пока в конце концов не исчезнут совсем (рис. 5.17, в). Однако электрический ток, текущий по проводу, порождает вокруг него магнитное поле, и в тот момент, когда электрическое поле становится равным нулю, вся энергия системы оказывается заключенным в этом магнитном поле. Но на этом процесс не останавливается, и электрический ток продолжает течь, хотя и с меньшей интенсивностью, заряжая обе сферы электричеством противоположного знака (рис. 5.17, г).

Теперь процесс начинается заново, но в противоположном направлении, и электрические колебания продолжают до тех пор, пока постепенная потеря энергии за счет нагрева провода, по которому течет ток, не остановит их. Все это очень похоже на ситуацию с маятником, где кинетическая энергия движения в середине каждого качания переходит в потенциальную энергию в его крайних точках.

Используя свои уравнения, Максвеллу удалось доказать, что электромагнитные колебания поля, описанные выше, распространяются в пространстве, окружающем источник колебаний, в форме волн, уносящих энергию. Поскольку электрические силовые линии лежат в плоскости, проходящей через провод, а магнитные линии перпендикулярны ему, электрический и магнитный вектора в распространяющейся волне перпендикулярны друг другу, а также направлению распространения (рис. 5.18). Существование таких волн было экспериментально подтверждено в 1888 году немецким физиком Генрихом Герцем вскоре после публикации статьи Максвелла, предсказавшей их. Это привело к развитию технологий радиосвязи, которая сегодня является одним из основных направлений индустриальной цивилизации.

Теперь хотелось бы подробно обсудить один из важных пунктов теории Максвелла, а именно расчет скорости распространения электромагнитных волн. Рассматривая взаи-

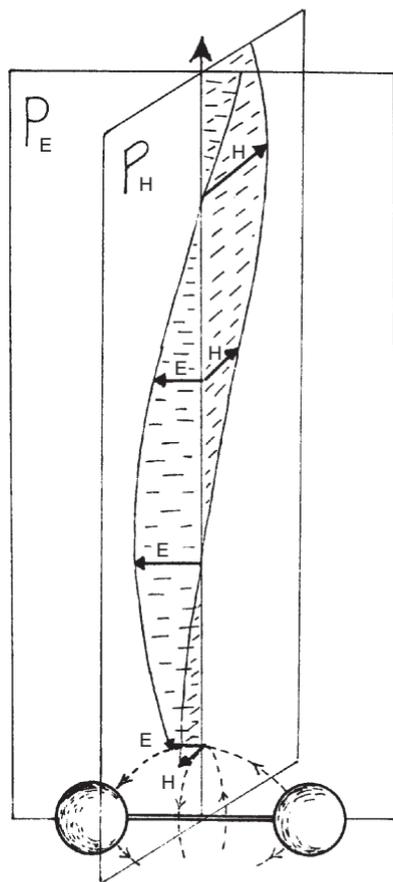


Рис. 5.18. Возникновение распространяющейся электромагнитной волны как результат колебаний заряда между двумя проводниками

действие электрического и магнитного полей, натываясь на вопрос, касающийся единиц, используемых для измерения различных электромагнитных величин. Выше мы видели, что единица электрического заряда определяется как заряд, отталкивающий такой же заряд, расположенный от него на расстоянии 1 см, с силой в 1 дину. Соответственно, единица электрического поля должна определяться как поле, которое действует на помещенную в него единицу

электрического заряда с силой в 1 дину. Аналогичное определение дано единичному магнитному полюсу и единице магнитного поля. Но что будет, если рассмотреть явление, включающее в себя и электричество, и магнетизм, например магнитное поле, порожденное электрическим током?

Предположим, мы изучаем действие электрического тока на магнитный полюс, находящийся в 1 см от провода. Мы можем определить единицу электрического тока как ток, несущий определенную выше единицу электрического заряда в секунду. Но если мы так сделаем, сила, с которой магнитное поле, порожденное этим током, действует на единичный полюс, помещенный на расстоянии 1 см, не обязательно будет равняться 1 дине. Как вариант, мы можем определить единицу тока как ток, порожденный магнитным полем, которое действует с силой 1 дина на единичный магнитный полюс, расположенный на расстоянии 1 см. Но если мы сделаем так, то количество электричества, протекающего по проводу, несущему единицу электрического тока, не будет равно определенной выше электростатической единице заряда. Вместо того чтобы брать одно из возможных определений и отвергать другое, физики предпочли использовать оба, введя постоянный множитель для перевода одной системы в другую. Ситуация напоминает ту, что существует при измерении тепла, где можно использовать либо 1 калорию, либо 1 эрг (с отношением между ними $4,2 \times 10^7$). Единица электрического заряда, определенная с использованием закона Кулона об электрическом притяжении и отталкивании (первое из двух определений, приведенных выше), называется *электростатической единицей* (esu), а единица заряда, определенная на основании закона Эрстеда — действия электрического тока на единичный магнитный полюс, называется *электромагнитной единицей* (emu). Одна электромагнитная единица равна 3×10^{10} электростатических единиц, так что ток, несущий 1 электростатическую единицу в секунду, оказывает на единичный полюс, находящийся на расстоянии 1 см, силу всего в $1/(3 \times 10^{10})$ дин, тогда как два тела, заряженные одной электромагнитной единицей каждое и расположенные на расстоянии 1 см, будут отталкивать друг друга с силой 3×10^{10} дин.

Поскольку при написании своих уравнений Максвелл был вынужден использовать электростатические единицы для электрических полей и электромагнитные единицы для магнитных полей, коэффициент 3×10^{10} проник в формулы, содержащие с одной стороны уравнения электрическое поле, с другой — магнитное поле. А применение этих уравнений для описания распространения электромагнитных волн привело к выводу, что скорость их распространения численно равна отношению двух единиц, то есть 3×10^{10} см/с. И о чудо! Эта цифра в точности совпала со скоростью света в вакууме, которая была измерена различными способами задолго до того, как родился Максвелл! Ага! — вероятно, подумал Максвелл, это должно означать, что световые волны — это на самом деле электромагнитные волны очень малой длины. И эта мысль привела к развитию еще одного важного направления в физике — *электромагнитной теории света*. Теперь мы представляем взаимодействие света и материи, включая явления излучения, распространения и поглощения света, как результат сил, действующих между распространением коротких электромагнитных волн и крошечных электрически заряженных частиц, электронов, деловито снующих вокруг атомного ядра. А используя уравнения Максвелла, можно в мельчайших подробностях объяснить все явления и законы оптики.

Численное совпадение между, казалось бы, не связанными друг с другом физическими величинами, такими как отношение электростатической и электромагнитной единиц, с одной стороны, и скорости света — с другой, часто вели в физике к новым фундаментальным открытиям и масштабным обобщениям. Позже в этой книге мы узнаем, что другое подобное совпадение между двумя физическими константами, одна из которых относилась к излучению световых и тепловых волн горячими телами, другая — к эмиссии электронов с поверхностей, освещенных ультрафиолетовыми лучами, сыграло выдающуюся роль в развитии квантовой теории.

Глава 6

РЕВОЛЮЦИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Как было указано в предыдущей главе, мысль о существовании универсальной среды, заполняющей все пространство между материей и внутри ее, окончательно утвердилась среди физиков к концу XIX века. Эта среда под названием «всемирный эфир Гюйгенса» служила субстратом для распространения световых волн; под названием «трубки Фарадея» олицетворяла собой силы, действующие между электрически заряженными и намагниченными телами. Работа Максвелла привела к синтезу этих двух гипотетических сред, показав, что свет — это электромагнитная волна, и предоставила элегантную математическую теорию, которая тесно связала все явления, имеющие отношение к свету, электричеству и магнетизму. Но, несмотря на этот успех, физики обнаружили, что невозможно описать свойства этой загадочной универсальной среды в терминах, используемых для описания таких знакомых материальных сред, как газы, твердые вещества и жидкости; и все попытки, предпринимавшиеся в этом направлении, вели к серьезным противоречиям.

Кризис классической физики

Явление поляризации света без всяких сомнений доказало, что здесь мы имеем дело с поперечными колебаниями, при которых вещество движется туда и обратно перпендикулярно направлению распространения волны. Однако поперечные колебания могут существовать только

в твердых веществах, которые, в отличие от жидкостей и газов, оказывают сопротивление попытке изменить их форму, следовательно, светоносный эфир должен считаться твердым веществом. Если так и если эфир заполняет все пространство вокруг нас, то как мы можем идти или бежать по земле и как могут планеты вращаться вокруг солнца в течение миллиардов лет, не встречая никакого сопротивления?

Знаменитый британский физик лорд Кельвин пытался разрешить это очевидное противоречие, приписывая эфиру свойства, сходные с теми, которыми обладает сапожный клей или сургучная печать. Эти вещества обладают свойством, известным как *пластичность*, и в то время как под действием быстродействующей большой силы они трескаются, как стекло, под действием небольшой силы (например, собственного веса), продолжающимся длительное время, они могут течь, как жидкости. Он утверждал, что в случае световых волн, где сила меняет свое направление много миллиардов раз в секунду, эфир может вести себя, как пластичное твердое вещество, в то время как в случае гораздо более медленных движений людей, птиц, планет и звезд он может не оказывать практически никакого сопротивления. Но если бы трубки Фарадея представляли собой напряжение и давление в эфире, то постоянные магниты и статические электрические заряды не могли бы существовать в течение какого-то достаточного для наблюдений времени, поскольку давление быстро приводило бы к пластическим изменениям этого загадочного вещества. Очень просто критиковать людей за неправильные выводы, когда знаешь правильный ответ, но действительно удивляет, что великие физики прошлого века не понимали, что, если бы эфир существовал, он имел бы совершенно иные свойства, чем обычные знакомые нам материальные тела. В самом деле, было хорошо известно, что сжимаемость газов, текучесть жидкостей и пластичность твердых тел существуют благодаря их молекулярной структуре и являются результатом движения молекул и действия сил между ними. Кажется, никто, кроме разве что русского химика Дмитрия Менделеева, который в сво-

ей периодической таблице элементов приписал эфиру атомный номер ноль, никогда не думал, что у эфира есть своя собственная молекулярная структура. Впрочем, такая гипотеза только привела бы к дальнейшим трудностям. Если силы между магнитами и заряженными телами и распространение света в пространстве должны были объясняться существованием субстрата какого-то рода, он не должен был ничем напоминать обычные знакомые нам вещества. Но человеческий разум слишком часто бывает ограничен традиционным способом мышления, и понадобился гений Эйнштейна, чтобы выбросить устаревший противоречивый эфир на свалку и заменить его расширенным понятием электромагнитного поля, которое он считал такой же физической реальностью, как и любое материальное тело.

Скорость света

Первая попытка измерить скорость света была предпринята Галилео, который однажды вечером вместе со своим ассистентом отправился за город, прихватив с собой две лампы, снабженные шторками. Отойдя друг от друга как можно дальше, но так чтобы не перестать видеть друг друга, они провели эксперимент, в котором ассистент должен был мигнуть своей лампой, как только увидит, что Галилео мигнул своей. Задержка прихода ответного сигнала показала бы, что свет распространяется с конечной скоростью и ее можно измерить. Однако результат эксперимента оказался отрицательным, поскольку свет, как мы теперь знаем, распространяется с такой огромной скоростью, что ожидаемая задержка была бы не более одной стотысячной доли секунды. Эксперимент Галилео в улучшенном варианте повторил французский физик Арман Ипполит Физо, использовавший устройство, показанное на рис. 6.1, *a*. Оно состояло из пары зубчатых колес, помещенных на противоположных концах длинной оси. Колеса были размещены таким образом, что зубья одного располагались напротив промежутков между зубьями противоположного и луч све-

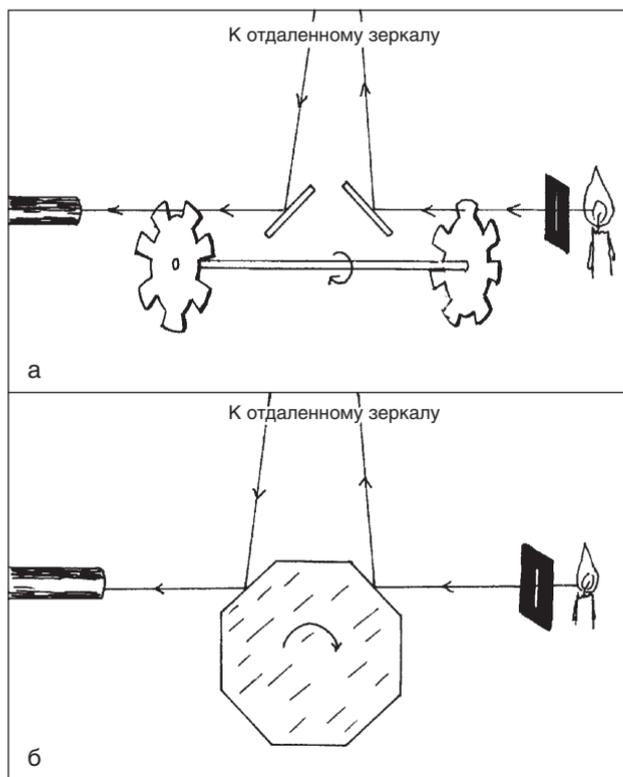


Рис. 6.1. Методы измерения скорости света Физо (а) и Фуко (б)

та от источника, находящегося справа, не был виден слева, как бы ни поворачивалась ось. Однако когда колеса начинали вращаться быстро, так быстро, что проходили половину расстояния между соседними зубцами за то время, за которое свет распространялся от одного колеса до другого, он должен был пройти это расстояние без помех. Расстояние, которое должен был пройти свет, было намеренно увеличено за счет трех зеркал, одно из которых находилось далеко в стороне, как показано на рисунке. Вращая колеса со скоростью несколько тысяч оборотов в минуту, Физо удалось добиться беспрепятственного прохождения света через систему, и, собрав полученные цифры, он пришел к

выводу, что скорость света равна 3×10^{10} см/с. Эта цифра совпала с той, которую получил всего через три десятилетия после смерти Галилео датский астроном Олаус Рёмер, благодаря своим наблюдениям за видимой задержкой затмений лун Юпитера, когда эта планета находилась на разных расстояниях от Земли.

Метод Физо был пригоден только для измерения скорости света в воздухе (практически то же самое, что в вакууме), поскольку зеркало, использовавшееся для удлинения пути света, должно было находиться на большом расстоянии, чтобы эффект можно было наблюдать. Его друг и коллега Жан Фуко (оба родились в 1819 году и были Кастором и Полидевком французской науки), сумел сократить это расстояние, заменив зубчатые колеса вращающимися зеркалами. Его устройство, которое показано на рис. 6.1, б и говорит само за себя, позволяло сократить оптический путь всего до нескольких метров, поэтому он мог сделать так, чтобы свет проходил весь путь в воде или любом другом прозрачном веществе. Проводя этот эксперимент, он обнаружил, что скорость света в материальных телах *меньше*, чем его скорость в вакууме, таким образом оказав запоздалую, но все же весомую поддержку взглядам Гюйгенса против взглядов Ньютона. Как предсказывала волновая теория света, скорость света в воде, стекле и т. д. оказалась в точности равна скорости света в вакууме, деленной на коэффициент преломления рассматриваемого вещества.

Скорость света в движущейся среде

Имея в своем распоряжении методы точного измерения скорости света, физики XIX века занялись проведением различных опытов по распространению света в надежде пролить свет на свойства эфира, этой загадочной среды, в которой, как предполагалось, распространяются световые волны. Очень важный эксперимент, значение которого, однако, не было осознано до тех пор, пока не появилась первая публикация Эйнштейна, был проведен в 1851 году Физо. Идея заключалась в том, чтобы увидеть, как на ско-

рость света влияет движение среды, в которой он распространяется. В случае звуковых волн, перемещающихся по воздуху, на скорость их распространения напрямую влияет движение воздушных масс, и скорость звука, идущего по ветру или против него, возрастает или убывает на значение равное скорости ветра. В этом нет сомнения, но будет ли это верно для света, распространяющегося в движущейся среде? Чтобы ответить на этот вопрос, Физо решил измерить скорость света, распространяющегося по трубе с быстро текущей водой. Будет ли в этом случае скорость воды прибавляться или вычитаться из скорости света в вакууме? Конечно, ожидалось, что изменение скорости света в этом эксперименте будет очень маленьким, поскольку самая большая скорость воды, которую можно обеспечить технически, очень мала по сравнению со скоростью света. Таким образом, непосредственное измерение скорости света в этом случае, по методу и Физо, и Фуко, описанным в предыдущем параграфе, не показало бы никакой разницы. Но поскольку в этом случае единственное, что интересно узнать, — это именно *разница* между скоростью света в движущейся и в стоячей воде, можно использовать гораздо более точный метод, основанный на интерференции двух световых лучей. Принцип, использованный в этом эксперименте, показан на рис. 6.2.

Монохромный свет от ртутной лампы L (рис. 6.2) падает на стеклянную пластину P_1 с очень тонким слоем серебра, который имеет точно такую толщину, чтобы отражать половину этого света, в то время как другая половина проходит через него и отражается зеркалом M_1 . Таким образом, получается два параллельных луча света одинаковой интенсивности, колебания которых синхронны, как в случае опыта Юнга, описанного в главе 3. Эти два световых луча проходят через две трубы T_1 и T_2 , а потом снова сводятся вместе с помощью стеклянной пластины P_2 и зеркала M_2 . Если вода в обеих трубах стоит, оба луча попадают в глаз наблюдателя E в одинаковой фазе волны (то есть гребень с гребнем, впадина с впадиной) и их общая интенсивность будет равна первоначальной. Но если вода в трубах течет в противоположных направлениях и «тащит» световые волны

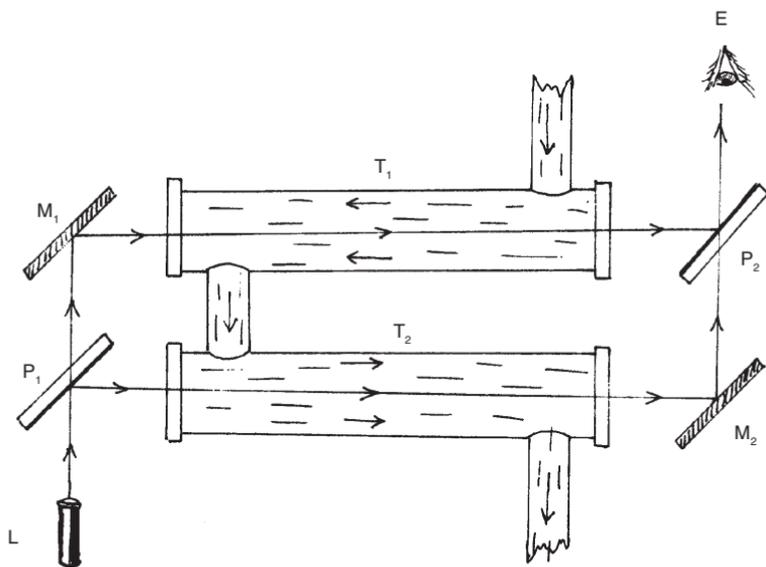


Рис. 6.2. Опыт Физо по наблюдению за изменением скорости света, распространяющегося в движущейся среде

с собой, волны нижнего луча попадут в E быстрее, чем соответствующие волны верхнего луча, и если разница равна ровно половине длины волны, будет иметь место деструктивная интерференция (гребень попадает на впадину, а впадина на гребень). Сделаем грубую прикидку, насколько быстро должна течь вода в T_1 , чтобы обеспечить такую разницу в фазах. Длина труб в опыте Физо была 1,5 м, или 150 см, а длина волны — около $0,5\mu$ (5×10^{-5} см), значит, в трубе будет шлейф из 3×10^6 волн. Чтобы изменить это число на половину длины волны (от 3 миллионов до $3\frac{1}{2}$ миллиона), скорость света в трубе с движущейся водой должна увеличиться или уменьшиться на дробь $0,5/(3 \times 10^6) = 1,7 \times 10^7$. Поскольку скорость света в воде составляет примерно 2×10^{10} см/с, скорость потока воды, необходимая, чтобы получить этот результат, должна быть около $(2 \times 10^{10})/(1,7 \times 10^7) = 1000$ см/с = 10 м/с, что является довольно большим, но достижимым значением для течения воды по трубам. Таким образом, наблюдая интерференци-

онную полосу в этом эксперименте, можно заметить ожидаемое изменение скорости света.

Проведя точные измерения при разных скоростях потока воды, Физо пришел к результату, который был средним между двумя ожидаемыми возможностями. Скорость света в потоке воды *отличалась* от скорости в стоячей воде, но разница была *меньше*, чем скорость потока воды. По наблюдаемому сдвигу интерференционной полосы он обнаружил, что скорость света, распространяющегося в направлении потока воды, возросла на 44% от скорости воды, тогда как скорость света, распространяющегося в противоположном направлении, уменьшилась на такое же значение. Когда были использованы другие жидкости, их влияние на скорость света, распространяющегося в них, имело другие численные значения, и, как оказалось, скорость света в движущейся жидкости может быть выражена следующей эмпирической формулой — формулой, которая не выведена математически на основании какой-то теории, а просто подобрана так, чтобы соответствовать экспериментальным данным.

$$V = \frac{c}{n} \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v,$$

где n — коэффициент преломления данной жидкости, а v — скорость потока. Ни Физо, ни кто-то другой из физиков того времени не мог понять, что она может означать, и загадка сохранялась, пока полвека спустя Эйнштейн не показал, что таинственная эмпирическая формула является прямым результатом теории относительности.

Скорость света на движущейся Земле

В 1887 году, когда Эйнштейну было 8 лет, американский физик А.А. Майкельсон и его ассистент Э.У. Морли провели другой примечательный эксперимент. Если Физо смог уловить влияние быстрого потока воды на распространяющийся в нем свет, то, возможно, удастся наблюдать влияние движения Земли в космосе на скорость света, измерен-

ного на ее поверхности. Действительно, Земля движется вокруг Солнца по своей орбите со скоростью около 30 км/с, и над ее поверхностью и, вероятно, внутри земного тела должен существовать ветер эфира, как в случае с автомобилем, сидящим за рулем открытого кабриолета в безветренный день. Опыт Майкельсона и Морли основывался на тех же принципах, что и опыт Физо, но его надо было модифицировать, поскольку в этом случае, очевидно, невозможно было иметь две одинаковых параллельных трубы, по которым ветер эфира дует в двух противоположных направлениях. Вместо этого они решили измерять время кругового пути света, в одном случае распространявшегося в направлении ожидаемого ветра эфира, а в другом случае распространяющегося перпендикулярно ему. Чтобы понять принцип организации этого опыта, рассмотрим моторную лодку, плывущую туда и обратно, в одном случае вдоль широкой реки, а в другом поперек нее. В первом случае во время одной половины пути лодка плывет по течению и ее скорость будет $V + v$, где V — скорость лодки по отношению к воде, а v — скорость течения реки. На обратном пути лодка будет плыть против течения, и ее скорость будет $V - v$. Если L — расстояние между двумя причалами, то время обратного пути будет равно:

$$t_{\rightleftharpoons} = \frac{L}{V+v} + \frac{L}{V-v} = \frac{2LV}{V^2 - v^2} = \frac{2L/V}{1 - \frac{v^2}{V^2}}.$$

Поскольку $2L/V$ — это время обратного пути в неподвижной воде, очевидно, что наличие потока всегда будет увеличивать время. В частности, если v равно или больше V , то лодка никогда не вернется назад и t_{\rightleftharpoons} становится бесконечным.

Теперь рассмотрим случай, когда лодка плывет поперек течения реки (рис. 6.3).

Если она отплывает из точки A и должна причалить прямо напротив нее в точке B , то ей следует держать курс чуть выше по течению, чтобы компенсировать расстояние, на которое ее снесет поток. Так, пока она проплывет расстояние AC относительно воды, течение снесет ее на расстоя-

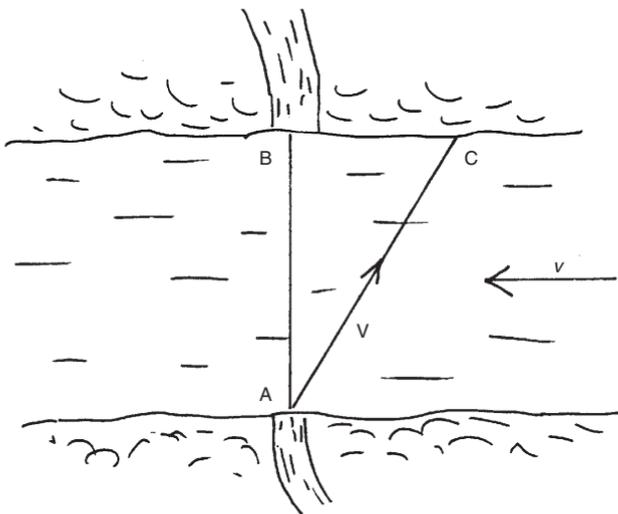


Рис. 6.3. Задача о лодке, переплывающей реку

ние CB . Очевидно, что отношение BC/AC равно отношению скоростей течения и лодки. Применяя теорему Пифагора к прямоугольнику ABC , получаем:

$$\overline{AB}^2 + \left(\overline{AC} \times \frac{V}{v} \right)^2 = \overline{AC}^2$$

или

$$\overline{AB}^2 = \overline{AC}^2 \times \left(1 - \frac{V^2}{v^2} \right)$$

или

$$\overline{AC} = \frac{\overline{AB}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}}$$

Если $AB = L$, то время туда и обратно будет:

$$t_{\rightarrow} = \frac{2\overline{AC}}{V} = \frac{2L/V}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}}$$

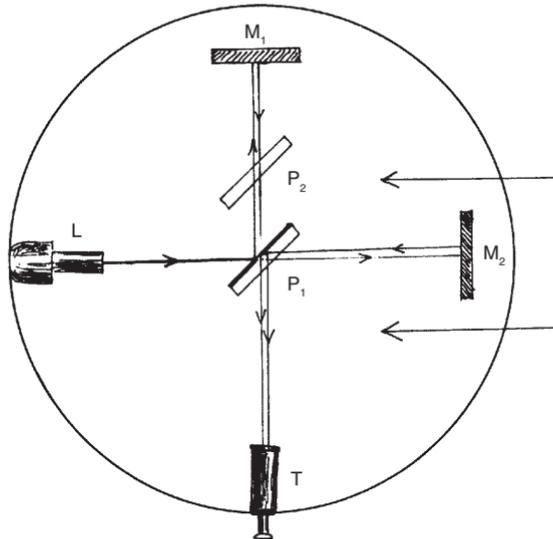


Рис. 6.4. Устройство Майкельсона—Морли с указанием путей световых лучей. Для удобства восприятия лучи, падающие и отражающиеся от зеркал M_1 и M_2 , показаны с небольшим сдвигом. Пластина P_2 введена, чтобы компенсировать дополнительный путь до пластины P_1 того луча, который направляется к M_2

Как и в предыдущем случае, время больше, чем было бы в стоячей воде, но поправочный коэффициент $\sqrt{1 - \frac{v^2}{V^2}}$ меньше, чем полученный ранее коэффициент $1 - v^2/V^2$.

Теперь заменим течение реки ветром эфира, а лодку — световой волной, и получится опыт Майкельсона—Морли. Устройство для его проведения схематично показано на рис. 6.4.

Оно было смонтировано на твердой мраморной плите, плавающей в ртути так, что ее можно было поворачивать вокруг своей оси без труда и сотрясения. Луч света от лампы L падал на стеклянную пластину, помещенную в центре плиты. Стеклянная пластина была покрыта слоем серебра, который отражал половину падающего света и пропускал другую половину. Затем два луча отражались от двух зеркал M_1 и M_2 , размещенных на равных расстояниях от центра.

Возвращаясь к посеребренной пластине, луч, отраженный от M_1 , частично проходил сквозь нее (что происходило с оставшейся частью, никого не волновало), тогда как луч, отраженный от M_2 , частично отражался от нее (что происходило с оставшейся частью, никого не волновало), и оба этих луча попадали в телескоп T . Если бы ветра эфира не было, то оба луча сошлись в одной фазе и обеспечили максимальное освещение поля телескопа. Если ветер эфира дул, скажем, справа налево, луч, проходивший сквозь ветер, пришел бы с меньшим запаздыванием, чем если бы он шел против ветра и наблюдалась бы по меньшей мере частичная деструктивная интерференция. Приведем грубую численную оценку ситуации. Отношение периодов t_1 и t_2 прохождения света по двум взаимно перпендикулярным направлениям, согласно приведенным выше формулам, равно:

$$\frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где V заменено скоростью света c . Отношение $(v/c)^2$ в этом случае равно $\left(\frac{3 \times 10^6}{3 \times 10^{10}}\right)^2 = 10^{-8}$ или 0,00000001. Можно показать*, что для такого маленького значения v^2/c^2 корень $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ можно достаточно точно представить выражением $1 - \frac{1}{2} v^2/c^2 = 1 - 0,000000005 = 0,999999995$.

Таким образом, ожидаемая разница прихода двух волн будет всего лишь 5 десятиллионных процента. Но она достаточно велика, чтобы ее можно было уловить с помощью чувствительных оптических инструментов. В действительности, если диаметр мраморной плиты был 3 метра (а это примерно так и было), общее время в пути (от плиты

* Фактически, это содержание первой математической статьи сэра Исаака Ньютона.

до зеркала и обратно) было $300/(3 \times 10^{10}) = 10^{-8}$ с. Тогда разница между временем, за которое две волны дошли до телескопа, была:

$$5 \times 10^{-9} \times 10^{-8} = 5 \times 10^{-17} \text{ с.}$$

Для волны длиной 6×10^{-5} см период колебаний был

$$(6 \times 10^{-5}) / (3 \times 10^{10}) = 2 \times 10^{-15} \text{ с.}$$

Таким образом, разница во времени прибытия была $(5 \times 10^{-17}) / (2 \times 10^{-15}) = 2,5 \times 10^{-2}$, или 2,5% от периода колебаний, и она должна была обеспечить достаточно заметную деструктивную интерференцию. В реальном эксперименте этот эффект должен был наблюдаться не в виде уменьшения интенсивности, а в сдвиге серий полос интерференции на 2,5% от расстояния между ними. Повернув устройство на 90 градусов (вот для чего оно должно было плавать в ртути) и, таким образом, изменив роль зеркал M_1 и M_2 , можно было ожидать такого же сдвига в противоположном направлении, так что общий сдвиг составил бы 5% от расстояния между ними, и если так, то это показало бы, что скорость Земли в пространстве равна 30 км/с.

Итак, эксперимент состоялся, но никакого сдвига не наблюдалось. Как же так? Неужели движущаяся Земля увлекает за собой эфир на все 100%? Повторение эксперимента Майкельсона на баллоне, парившем высоко над Землей, опровергло такую возможность. Физики ломали головы и не знали, с какой стороны подступиться. Достаточно революционная идея была высказана британским (но очень по-ирландски) физиком Дж.Ф. Фицджеральдом, который предположил, что все материальные тела, движущиеся в эфире со скоростью v , сокращаются в направлении

движения на величину, равную $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Такое сокращение,

которое, как предполагалось, имело место для любых материальных тел, независимо от их физической структуры, уменьшило бы расстояние между центральной плитой и зеркалом, стоящим в опыте Майкельсона—Морли против ветра эфира, ровно на такую величину, которая сделала бы

времена прихода равными и устранило сдвиг полос интерференции. Предпринимались многочисленные попытки объяснить гипотетическое «сокращение Фицджеральда» взаимодействием электрических и магнитных сил между атомами, составляющими материальные тела, но все напрасно. Это смелое и остроумное предположение стало предметом следующего шуточного стихотворения:

Один юный джентльмен по имени Фиске,
Когда фехтовал, был отчаянно быстр.
В запале он сделал свой выпад так быстро,
Что Фицджеральд сплющил его шпагу в диск.

Но это была не вся правда, а только половина правды.

Интермеццо

Прежде чем мы перейдем к объяснению, данному Эйнштейном отрицательному результату опыта Майкельсона—Морли, неплохо было бы обсудить задачу, которая, не имея никакого отношения к теории относительности, имеет тем не менее некий релятивистский оттенок. Человек плывет на лодке вверх по течению реки (рис. 6.5), а на корме лодки стоит полупустая бутылка виски.

Когда он проплывает под мостом, волна, отраженная от опор моста, качает лодку, и бутылка незаметно для человека падает в воду. Еще 20 минут лодка продолжает плыть вверх по течению, в то время как бутылка плывет вниз. Через 20 минут человек замечает, что бутылки нет, поворачивает лодку (временем разворота пренебрегаем) и движется вниз по течению с той же скоростью относительно воды, что и раньше. Он подбирает бутылку в миле ниже моста. Вопрос: какова скорость течения реки? Попробуйте решить эту задачку, прежде чем начнете читать дальше, и вы увидите, какой трудной она окажется. На самом деле она поставила в тупик нескольких хороших математиков.

Но все станет совсем просто, если вместо того, чтобы рассматривать описанные события относительно линии берега, как было бы естественно сделать, описать их относи-

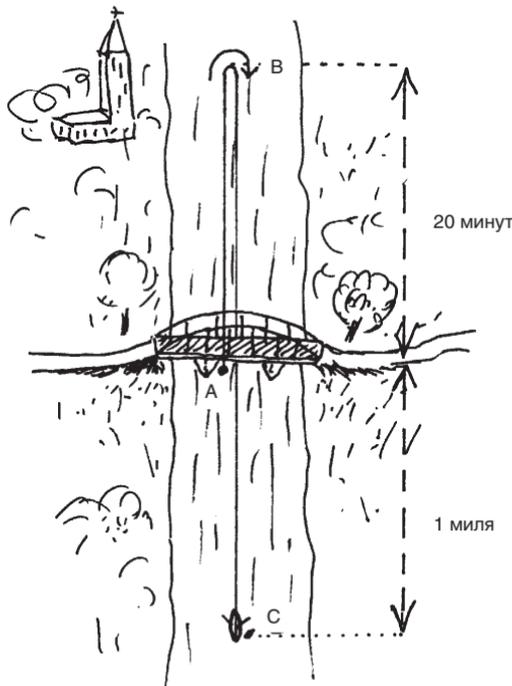


Рис. 6.5. Задача об упавшей бутылке

тельно воды в реке. Предположим, что мы сидим на плоту, плывущем вниз по течению, и смотрим вокруг. По отношению к нам вода будет стоять, а берега и мост — двигаться с определенной скоростью. Мимо проплывает лодка, и бутылка виски падает в воду. Лодка продолжает плыть, в то время как бутылка неподвижно лежит на том месте, где упала. (Помните: вода по отношению к нам *не* движется.) Двадцать минут спустя мы видим, что лодка разворачивается и плывет обратно за бутылкой. Естественно, ей понадобится 20 минут, чтобы вернуться назад. Таким образом, бутылка пробыла в воде 40 минут, и за это время берега и мост сдвинулись на 1 милю. Получается, что скорость моста относительно воды или, что то же самое, скорость воды по отношению к мосту и берегам равна 1 миле за 40 минут, или $1\frac{1}{2}$ мили в час. Просто, не правда ли?

Биографический фрагмент

Просто для справки следует указать, что Альберт Эйнштейн (рис. 6.6) родился 14 марта 1879 года в маленьком, но знаменитом (благодаря мастерзингерам) немецком городке Ульм недалеко от Мюнхена, где его отец владел электротехнической мастерской. Проведя детство в Мюнхене, затем он переехал в Швейцарию, чтобы учиться в Высшей технической школе Цюриха, и зарабатывал на жизнь репетиторством, помогая менее одаренным студентам по физике и математике. В 1901 году он женился и получил спокойное, но не слишком хорошо оплачиваемое место патентного эксперта в швейцарском патентном бюро в Берне. В 1905 году в возрасте 26 лет он опубликовал в немецком журнале *Annalen der Physik* три статьи, которые потрясли научный мир. Эти три статьи относились к трем крупным областям физики: теплу, электричеству и свету. В одной, которая уже упоминалась в главе 4, была подробно описана теория броуновского движения, имевшая фундаментальное значение для развития механической интерпретации феномена тепла. В другой объяснялись законы фотоэлектрического эффекта на основании только зарождавшейся квантовой гипотезы и было введено понятие элементарных единиц лучистой энергии, или фотонов. Они будут описаны в следующей главе. Самой важной из этих трех статей с точки зрения развития физики стала статья под названием «К электродинамике движущихся тел», посвященная парадоксам измерения скорости света. Это была первая статья по теории относительности.

Относительность движения

Накопившиеся трудности и противоречия в отношении природы гипотетического субстрата, ответственного за электромагнитные взаимодействия и распространение световых волн, сплелись в неразрешимый клубок эфира, очень похожий на легендарный узел, которым древнегреческий царь-крестьянин Гордий привязал ярмо телеги к дышлу.

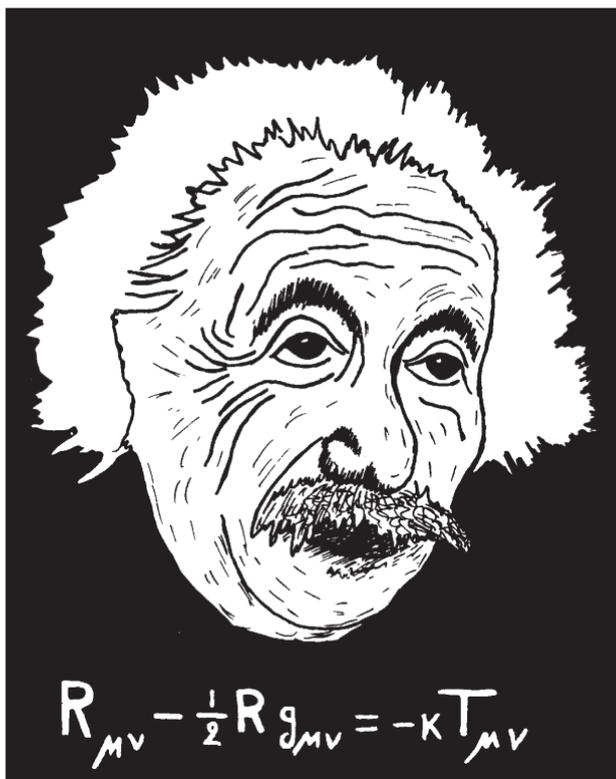


Рис. 6.6. Альберт Эйнштейн

Предсказание оракула о том, что тот, кто сможет развязать гордиев узел, будет править всей Азией, сбылось, когда Александр Македонский разрубил этот узел ударом своего меча. Таким же образом Альберт Эйнштейн стал властителем современной физики, разрубив эфирный узел острием своей логики и выбросив запутанные обрезки мирового эфира из окна храма физической науки.

Но если не существует никакого мирового эфира, заполняющего все пространство Вселенной, то не может существовать и никакого абсолютного движения, поскольку невозможно двигаться безотносительно чего-то еще. Таким образом, сказал Эйнштейн, можно говорить только об от-

носителем движения, то есть движению одного материального тела относительно другого или одной системы отсчета относительно другой системы отсчета, и два наблюдателя, находящиеся в этих системах, имеют равное право сказать: «Я неподвижен, а тот парень движется». Если не существует мирового эфира, обеспечивающего абсолютную систему отсчета для движения в пространстве Вселенной, то на самом деле любое заявление о таком движении должно быть помечено как бессмысленное. Поэтому неудивительно, что Майкельсон и Морли, измеряя скорость света, идущего в лаборатории в разных направлениях, не смогли заметить, движется ли их лаборатория или сама Земля в пространстве.

Вспомним приведенные выше в этой книге слова Галилео: «Закройтесь с каким-нибудь другом в самом просторном помещении под палубой большого корабля и поместите туда комаров, мух и других мелких крылатых существ. Кроме того, раздобудьте большую ванну с водой, куда запустите нескольких рыб; подвесьте бутылку, откуда вода по капле будет перетекать в другую бутылку с узким горлом, помещенную снизу. Затем, когда корабль стоит неподвижно, понаблюдайте, как и с какой скоростью летают мелкие крылатые создания в разные стороны комнаты; как плавают рыбы во все стороны; и как капли капают в нижнюю бутылку. Бросая что-либо своему другу, вам не нужно прилагать один раз больше силы, чем другой, при условии что расстояние не меняется; а делая большой прыжок, вы каждый раз будете прыгать на одинаковое расстояние. Понаблюдав за всеми этими частностями, чтобы ни у кого не осталось сомнений, что, пока судно стоит, все происходит именно таким образом, приведите судно в движение с любой, какой хотите, скоростью, но так, чтобы движение было равномерным и судно не колебалось из стороны в сторону. Вы не сможете заметить никаких изменений в движениях, обозначенных выше, или каким-то образом определить по ним, плывет корабль или стоит на месте».

Перефразировав следующим образом слова Галилео, мы можем применить их к опыту Майкельсона—Морли: «Закройтесь со своим ассистентом в большой лаборатории, где

у вас будут источники света, зеркала и все необходимое оптическое оборудование. А также всевозможные устройства для измерения электрических и магнитных сил, токов и прочего. Потом убедите себя с помощью логических аргументов, что, если Земля неподвижна, распространение световых лучей, взаимодействие зарядов, магнитов и электрических токов не будет зависеть от их расположения и направления относительно стен вашей лаборатории. Затем предположите — как и есть на самом деле, — что Земля движется вокруг Солнца и вместе с Солнцем вокруг центра звездной системы Млечный Путь. Вы не сможете заметить ни малейших изменений во всех названных выше явлениях и не сможете определить по ним, движется Земля или нет».

Таким образом, то, что справедливо для комаров, рыб, капель воды и брошенных предметов на гипотетическом корабле Галилео, плывущем по синим водам Средиземного моря, оказывается верным и для световых волн и других электромагнитных явлений на Земле, движущейся в пространстве Вселенной. Конечно, Галилео мог бы с легкостью определить, движется его корабль по отношению к земле или нет, просто выйдя из каюты на палубу и посмотрев на воду или на линию берега. Так же и мы можем определить движение Земли вокруг Солнца и Солнца по отношению к звездам, глядя на звезды и отмечая изменение их расположения (паралактическое смещение) и длины волн, исходящего от них света (эффект Доплера). Но, не выглядывая на улицу, невозможно заметить движение в пространстве, наблюдая электромагнитные явления так же, как невозможно сделать это, наблюдая механические явления.

Единство пространства и времени

Эйнштейн понял, что эта расширенная форма Галилеева принципа относительности движения требует радикального изменения базовых представлений о пространстве и времени. С незапамятных времен пространство и время

считались двумя совершенно независимыми сущностями, и Ньютон в своей *Principia* писал:

«Абсолютное пространство по своей природе не зависит ни от чего внешнего и всегда остается неизменным и неподвижным.

Абсолютное, верное, математическое время само по себе и по своей природе течет равномерно и независимо ни от чего внешнего».

Если ньютоновское определение пространства подразумевало существование абсолютной системы отсчета для движения в ней, его определение времени подразумевает существование абсолютной системы времени, которую могло обеспечить большое число синхронизированных хронометров или обычных часов, находящихся в разных местах всемирного пространства и показывающих стандартное универсальное время. В то время как полученная экспериментально величина скорости света подтверждала идею абсолютного пространства, она же вставляла палки в колеса универсальной системе времени. Чтобы понять катастрофу с универсальным временем, зададимся вопросом, каков наилучший способ синхронизовать двое часов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Конечно, служащий компании всемирного времени может приехать из одного места в другое, имея при себе хронометр стандартного времени, чтобы установить по нему местные часы. Именно так поступали в старые времена навигаторы, возившие хронометры на своих кораблях. Но кто может гарантировать, что хронометр не повредится при переезде? Современные системы времени, конечно, основаны на использовании радиосигналов, которые передают информацию о времени со скоростью света. Для любых практических целей измерения времени на Земле небольшим отклонением, вызванным конечным значением скорости света, можно с легкостью пренебречь, но оно определенно будет важно в случае установки времени на разных планетах, где задержка может быть многочасовой. Однако эту трудность легко обойти, заставив сигнал ходить туда-сюда благодаря его отражению (без задержки) от станции, принимающей сигнал. Тогда, если временной сигнал был отправлен в мо-

мент времени t_1 и вернулся в момент времени t_2 , правильным значением времени на принимающей станции будет $(t_1 + t_2)/2$. Поскольку, согласно опыту Майкельсона—Морли, скорость света в вакууме всегда одна и та же и не зависит от условий движения, описанный выше метод должен рассматриваться как абсолютно точный и бесспорный. Его альтернативой было бы отправить два световых сигнала в противоположных направлениях из точки, расположенной точно посередине между двумя станциями, и считать двое часов синхронизированными, если в момент прихода сигналов они показывают одинаковое время.

Следующий шаг состоит в том, чтобы связать часы в двух системах, движущихся единообразно по отношению друг к другу, как, например, в двух поездах, проходящих мимо друг друга в противоположных направлениях. Мы выбрали в качестве примера поезда, потому что железнодорожные служащие очень гордятся своими большими, часто позолоченными часами, показывающими точное время. Чтобы осуществить описанный выше метод синхронизации, тормозной кондуктор, находящийся в середине поезда, должен взмахнуть своим фонарем из стороны в сторону, а инженер и кондуктор, высунувшись из локомотива и служебного вагона соответственно, должны установить на своих часах точное время, когда увидят световой сигнал.

Описанная выше процедура напоминает старую попытку Галилео измерить скорость света с помощью мигания лампой, но, конечно, мы не имеем в виду, что такой эксперимент действительно стоит проводить, используя бригады двух железнодорожных поездов. Это, скорее, то, что Эйнштейн называл «мысленным экспериментом», когда человек только представляет себе ситуацию и пытается сделать вывод о том, что произойдет, на основании известных результатов опытов (таких, как опыт Майкельсона—Морли).

Используя метод двух поездов A и B , можно синхронизовать часы в каждом из поездов, и тогда встает задача сравнить хронометраж в одном с хронометражем в другом. Это может быть сделано в тот момент, когда два поезда находятся в таком положении, что локомотив A как раз проезжает мимо служебного вагона B , а служебный вагон A

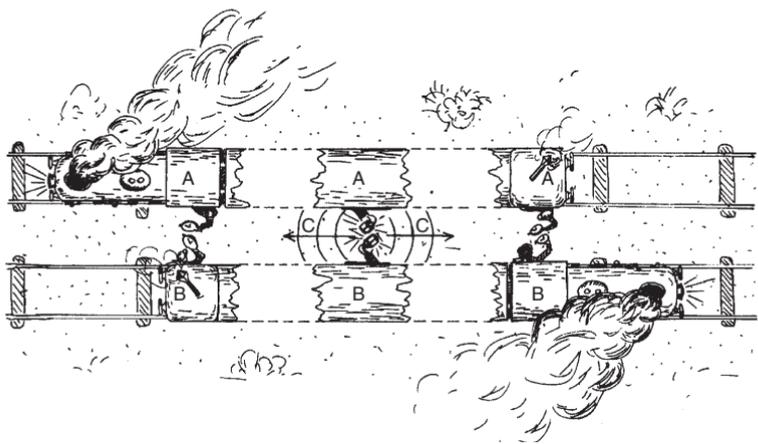


Рис. 6.7. Синхронизация часов в двух поездах, движущихся относительно друг друга

проезжает мимо локомотива *B* (рис. 6.7). Действительно, в этот момент инженер из *A* и кондуктор из *B* могут сравнить время на своих часах непосредственно, высунувшись из окон и поместив свои часы рядом. То же самое произойдет с кондуктором из *A* и инженером из *B*.

Мы можем связать это непосредственное сравнение времени с описанным выше сравнением световых волн, предположив, что два тормозных кондуктора в *A* и *B* взмахнут своими фонарями, когда по ходу поездов они окажутся точно друг против друга. В этом случае, естественно, возникнет только одна световая волна, поскольку оба фонаря практически совпадут.

Теперь давайте рассмотрим результат этой процедуры. Поскольку свет распространяется с конечной скоростью, пройдет некоторое время, прежде чем он достигнет двух концов поезда, а когда это наконец случится, локомотив *A* будет находиться слева от служебного вагона *B*, а служебный вагон *A* будет находиться слева от локомотива *B*. Таким образом, пройдя мимо служебного вагона *B*, световая волна потратит какое-то время, чтобы дойти до локомотива *A*. Следовательно, если, благодаря договоренности об использовании метода установки часов с помощью свето-

вых сигналов, часы инженера *A* и кондуктора *B* установлены так, чтобы показывать одинаковое время, когда инженер и кондуктор видят свет, часы инженера *A* должны отставать от часов кондуктора *B* в момент прохождения. По той же причине часы кондуктора *A* должны *опережать* часы инженера *B* в момент их встречи. Теперь, поскольку люди в поезде *B* уверены, что их часы, благодаря использованию метода световых сигналов, установлены правильно, будут настаивать, что часы в поезде *A* установлены неверно и часы в локомотиве *A* *отстают* от часов в служебном вагоне того же поезда. Точно так же люди в поезде *A*, считая, что их часы установлены правильно, будут сомневаться насчет установки часов в поезде *B*. Инженер *A* будет говорить, что часы кондуктора *B* *спешат*, тогда как кондуктор *A* будет настаивать, что часы инженера *B* *отстают*. Оба согласятся с тем, что часы в поезде *B* определенно установлены неправильно и что часы в локомотиве *B* *отстают* от часов в служебном вагоне *B*. Этот спор никогда не будет разрешен, поскольку поезда *A* и *B* не имеют приоритета друг перед другом, и мы должны сделать вывод, что *часы, синхронизированные в одной системе, будут казаться несинхронизированными, если смотреть из другой системы, движущейся относительно нее, и наоборот*. Иными словами, *два события, которые происходят одновременно в одной системе, но на некотором расстоянии (в разных концах поезда), будут казаться неодновременными, если смотреть на них из другой системы, движущейся по отношению к первой*. Таким образом, пространство, по крайней мере частично, меняется со временем, и чисто пространственное разделение двух событий в одной системе ведет к определенной разнице во времени между ними, если смотреть на них из другой движущейся системы.

Для того чтобы проиллюстрировать это утверждение, рассмотрим человека, обедающего в вагоне-ресторане движущегося поезда. Сначала он ест суп, потом стейк, а затем десерт. Все эти события происходят в одном месте (за одним столиком) по отношению к поезду, но в разное время. Однако с точки зрения наблюдателя, стоящего на земле, он ест суп и десерт на расстоянии в несколько миль. Этот тривиальный

факт можно сформулировать следующим образом: *события, происходящие в одном и том же месте, но в разное время в одной системе, оказываются происходящими в разных местах, если наблюдать за ними из другой системы, движущейся по отношению к первой.* Теперь в этом предложении поменяем местами слова «место» и «время», и оно приобретет следующий вид: *события, происходящие в одно и то же время (то есть одновременно), но в разных местах одной системы, будут казаться происходящими в разное время, если смотреть на них из другой системы, движущейся по отношению к первой.* И это именно тот результат, к которому мы пришли выше.

Если нулевой интервал времени становится больше нуля, когда его наблюдают из движущейся системы, то *конечная разница во времени между двумя событиями должна увеличиваться, если смотреть на нее из той же системы.* Это знаменитое *замедление времени* (и одновременно с ним всех других физических, химических и биологических процессов), когда их наблюдают из движущейся системы. Как и все релятивистские явления, замедление времени симметрично относительно двух систем, движущихся по отношению друг к другу, и в то время, как бригада с поезда *B* будет казаться, что часы в поезде *A* идут медленнее, бригада с поезда *A* будет настаивать, что часы в поезде *B* замедлили ход. Можно показать, что ожидаемое релятивистское замедление описывается формулой

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

которая похожа на формулу сокращения Фицджеральда, за исключением того, что корень стоит в знаменателе.

Замедление всех физических процессов в быстро движущейся системе наблюдалось непосредственно в случае распада «мезонов» — нестабильных элементарных частиц, составляющих основную часть космических лучей, падающих на поверхность Земли с очень большой скоростью, что будет более подробно обсуждаться в последней главе этой книги. Есть идея поместить на спутник, вращающийся во-

круг Земли, атомные часы — очень точный прибор измерения времени, в котором движение рук синхронизируется с колебаниями молекул газа, помещенного внутри его. Сравнивая с помощью радиосигнала скорость хода часов на спутнике и таких же часов, расположенных на Земле, возможно, удастся доказать наличие эффекта замедления времени в широком масштабе.

Релятивистская механика

Сокращение расстояний и замедление временных интервалов, если на них смотреть из движущейся системы, вынуждают существенно изменять формулы, связывающие измерения пространства и времени в одной системе координат с измерением тех же самых величин, выполняемым из другой системы, движущейся относительно первой. Рассмотрим две системы координат (x, y) и (x', y') , движущиеся по отношению друг к другу со скоростью v , и будем считать в обеих системах время с того момента, когда их исходные точки O и O' совпадали друг с другом. Рассмотрим объект P , расположенный неподвижно во второй системе на расстоянии x' от ее исходной точки O' . Какой будет его координата x в первой системе и каково ее расстояние от исходной точки этой системы O ? Ответ очень прост, если использовать классическую Ньютонovu точку зрения. За временной интервал t исходные точки двух систем координат отойдут друг от друга на расстояние vt , так что

$$x' = x + vt.$$

Можно также добавить формулу

$$t = t',$$

которая просто подтверждает ньютоновское определение абсолютного времени.

До Эйнштейна эти две формулы, которые сегодня упоминаются под названием «Галилеевых преобразований координат», считались очевидным следствием здравого смысла, а вторую даже никогда не писали. Но возможность частичного

преобразования пространственных расстояний в разницу времени требует замены этих, казалось бы, тривиальных формул на более сложные, и можно показать, что для того, чтобы соответствовать условию постоянства скорости света и другим релятивистским явлениям, обсуждавшимся выше, старые Галилеевы преобразования необходимо заменить на новые:

$$x' = \frac{x + vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$t' = \frac{t + \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Эти выражения, известные как преобразования Лоренца, были получены голландским физиком Г.А. Лоренцем вскоре после публикации результатов опытов Майкельсона—Морли, но считались автором и другими физиками того времени, скорее, забавным чисто математическим фокусом. И только Эйнштейн первым осознал, что преобразования Лоренца действительно соответствуют физической реальности и требуют радикального изменения старых, соответствовавших здравому смыслу понятий в отношении пространства, времени и движения.

Заметим, что если преобразования Галилея были несимметричны в отношении пространственных и временных координат, то преобразования Лоренца симметричны. При вычислении нового времени t' нужно прибавить к t дополнительное слагаемое, зависящее от относительной скорости v , которое напоминает слагаемое, прибавляемое к старой пространственной координате x для получения новой пространственной координаты x' . Во всех случаях, с которыми мы встречаемся в современной жизни, где все скорости гораздо меньше скорости света ($v \ll c$), второе слагаемое в числителе преобразования времени становится практически равным нулю, а величина в знаменателе обеих формул становится практически равной единице. Это снова приводит нас к старым преобразованиям Галилея.

Но если скорости, участвующие в формулах, становятся близкими к скорости света, дополнительный член в преобразовании приводит к нарушению понятия абсолютной одновременности, тогда как величина под корнем приводит к сокращению расстояния и замедлению времени.

В этом месте необходимо обсудить непонимание в отношении релятивистского сокращения длины. Это непонимание существовало среди физиков в течение 54 лет, с момента публикации в 1905 году статьи Эйнштейна и до того, когда оно было разъяснено в короткой критической статье, опубликованной в 1959 году молодым американским физиком Дж. Террелом. Всегда считалось, что сокращение

длины на величину $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ можно наблюдать в реальности,

глядя на движущийся объект, если удастся достичь скорости близкой к скорости света. Таким образом, человек, летящий на самолете «Пан-Америкэн», видел бы, что самолет TWA, пролетающий в противоположном направлении близко к нему (вопреки всем правилам Федерального авиационного агентства!), сжался от кабины пилотов к хвосту, а пассажир самолета TWA наблюдал бы ту же картину, происходящую с самолетом «Пан-Америкэн». Террел показал, что такой подход ошибочен и что с самого начала *визуального наблюдения* за быстро движущимся объектом он не будет казаться короче, чем был в состоянии покоя. Этот происходит благодаря тому, что скорость света конечна, и мы будем видеть свет, отраженный от носа и хвоста пролетающего самолета с разной временной задержкой, и эта задержка уничтожит эффект релятивистского сокращения длины. Если бы свет распространялся с бесконечной скоростью, этой ошибки в наблюдении не существовало бы, но тогда при $c = \infty$ релятивистское сокращение длины все равно равнялось бы нулю при любом значении относительной скорости двух систем.

Согласно доводу Террела, несмотря на то что обычный наблюдатель не может увидеть релятивистское сокращение длины, его можно сфотографировать, если размер линз будет больше размеров движущегося объекта. Можно себе представить специальный самолет для фотографирования,

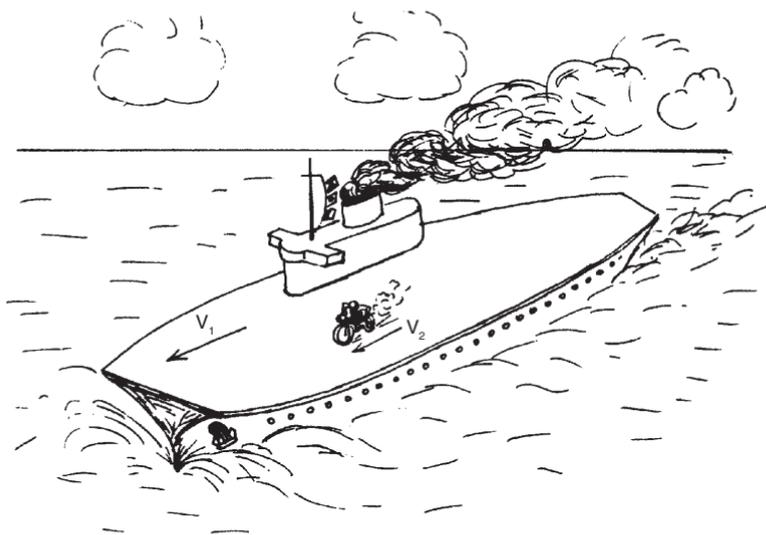


Рис. 6.8. Релятивистское сложение двух скоростей

снабженный камерой, которая больше его размеров от носа до хвоста. В этой камере должны стоять длинные цилиндрические линзы и «одновременный затвор», то есть затвор, носовой конец которого закрывается одновременно с хвостовым концом (в системе синхронизации времени, действующей в самолете). Если такой самолет пролетает мимо неопознанного быстро движущегося объекта в противоположном направлении и фотографирует этот объект, то на снимке будет виден эффект релятивистского сокращения длины. Не говоря о том, что, если бы неопознанный объект был способен сфотографировать самолет, то он мог бы радировать пилоту: «Ты тоже стал короче!»

Эта книга не место, чтобы углубляться в математические следствия преобразований Лоренца, и мы приводим только самые важные результаты, к которым они ведут. Один из таких результатов относится к сложению двух скоростей. Допустим, что авианосец идет по океану со скоростью 35 узлов, то есть около 40 миль/ч, а по его палубе от кормы к носу движется мотоциклист со скоростью 60 миль/ч (рис. 6.8). Какова скорость мотоциклиста по отношению к воде?

В классической механике ответ прост: $40 + 60 = 100$ миль/ч. Однако в релятивистской механике это простое правило сложения скоростей не может быть верным. Действительно, если скорости палубы и мотоцикла составляют, скажем, 75% от скорости света (что возможно, хотя бы в принципе), то скорость мотоцикла относительно воды будет на 50% больше скорости света. Релятивистская формула сложения двух скоростей v_1 и v_2 будет следующей:

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}},$$

где V — результирующая скорость. Легко увидеть, что если обе скорости v_1 и v_2 меньше c , то V тоже меньше c . Даже если взять $v_1 = c$, получится:

$$V = \frac{c + v_2}{1 + \frac{cv_2}{c^2}} = \frac{c + v_2}{1 + \frac{v_2}{c}} = \frac{c(c + v_2)}{c + v_2} = c$$

и, значит, скорость, прибавляемая к скорости света, несколько не увеличивает последнюю. Если взять $v_1 = c$ и $v_2 = c$, то снова получается:

$$V = \frac{c + c}{1 + \frac{c \times c}{c^2}} = \frac{2c}{1 + 1} = c.$$

Релятивистская формула сложения скоростей объясняет описанный выше опыт Физо, который был проведен веком раньше. Заменяя v_1 на значение скорости света в воде c/n , и подставив вместо v_2 просто v — скорость воды в трубе, получаем:

$$V = \frac{c/n + v}{1 + \frac{cv}{nc^2}} = \frac{c/n + v}{1 + \frac{v}{nc}}$$

Умножая числитель и знаменатель на $(1 - v/nc)$, получаем далее:

$$V = \frac{(c/n+v)(c/n-v)}{1-v^2/n^2c^2} = \frac{c/n+v-v/n^2+v^2/nc^2}{1-v^2/n^2c^2}$$

Теперь, поскольку v много меньше, чем c (v/c), это очень маленькое число, а $(v/c)^2$ еще меньше. Таким образом, пренебрегая величиной (v^2/c^2) в формуле выше, получаем:

$$V = \frac{c}{n} + v - \frac{v}{n^2} = \frac{c}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right),$$

что в точности совпадает с эмпирической формулой Физо. Таким образом, не существует такой вещи, как перенос эфира движущейся жидкостью, а результирующая скорость является просто релятивистской суммой скорости света в жидкости и скорости потока жидкости в трубе.

Другим важным следствием релятивистской механики является то, что масса движущегося тела не является константой, как в системе Ньютона, но увеличивается с увеличением скорости. Фактор, влияющий на массу движущегося тела, тот же самый, что влияет на сокращение длины и замедление времени, и масса тела, движущегося со скоростью v , определяется выражением:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m_0 — так называемая масса покоя, то есть инерция сопротивления силе, которая пытается сдвинуть тело, находящееся в состоянии покоя. Когда скорость тела возрастает, приближаясь к скорости света, увеличивать ее становится все сложнее, и при $v = c$ сопротивление дальнейшему ускорению становится бесконечно большим. В этом проявляется еще один аспект базового утверждения теории относительности, а именно, что никакое материальное тело не может двигаться быстрее скорости света. Действительно, благодаря возрастанию инерционного сопротивления, энергия, которая необходима, чтобы ускорить движение материального тела и заставить его двигаться со скоростью света, становится бесконечной.

Эквивалентность массы и энергии

Отказавшись от понятия мирового эфира и вернувшись к прежнему состоянию пустоты межзвездного пространства, Эйнштейну понадобилось что-то сделать, чтобы сохранить физическую реальность световых волн и электромагнитных полей в целом. Если эфира не существует, то *что* окружает электрические заряды и магниты и *что* распространяется в вакууме, неся нам свет Солнца и звезд? Это можно было сделать, только считая электромагнитное поле какой-то материальной средой, пусть даже совершенно отличной от обычных материальных сред, с которыми мы знакомы. В физике прилагательное «материальный» эквивалентно слову «весомый», то есть обладающий неким весом, или массой. Таким образом, электрические заряды и магниты должны быть окружены какой-то весомой субстанцией, пусть даже очень легкой, которая имеет достаточную плотность по сравнению с ними и с расстоянием становится все тоньше, доходя до нуля там, где электрические и магнитные силы исчезают. Таким же образом световые лучи должны изображаться в виде вибрирующих потоков этого вещества, исходящих из светящихся тел (как потоки воды из садовых шлангов) и мчащихся в абсолютно пустом пространстве. Разница между новым и старым взглядом показана на рис. 6.9. Если раньше мировой эфир считался равномерно распределенным в пространстве, а электрические и магнитные поля рассматривались только как определенная деформация в нем, новое «эфирное» вещество предполагалось существующим только в тех местах, где присутствуют электрические или магнитные силы, и являлось не столько носителем этих сил, сколько материальным проявлением их самих. Физические свойства этого вещества подлежали описанию не в старых терминах, таких как «твердость», «гибкость» и т. д., применимых только к материальным телам, состоящих из атомов и молекул, а с помощью уравнений Максвелла, которые описывают все детали электромагнитных взаимодействий. Эта новая точка зрения требует некоторого времени и усилия, чтобы к ней привыкнуть, но она освобождает разум от старой «материаморфной» (по аналогии с антропоморфной) точки зрения на свет.

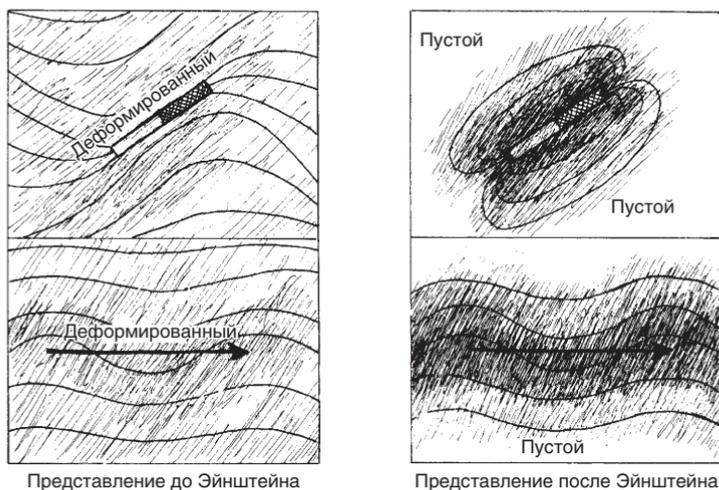


Рис. 6.9. Старая и новая концепция электромагнитного поля. До Эйнштейна считалось, что всепроникающий мировой эфир деформируется в области электромагнитного поля. Теперь мы считаем, что электромагнитное поле — это физическая (весомая) сущность, существующая сама по себе в пустом пространстве

Но каковы аргументы для того, чтобы приписывать весомую массу этому новому «эфирному» веществу, и какую массу следует ему приписать? Самый простой способ ответить на этот вопрос — это рассмотреть, что происходит, когда луч света падает на зеркало и отражается от него. В физике давно известно, что свет, отраженный от зеркала, оказывает на него определенное давление, которое, будучи недостаточно сильным, чтобы толкнуть зеркало, стоящее перед свечой, способно отталкивать молекулы газа от тел комет, подлетающих близко к Солнцу. Эти молекулы газа формируют искрящиеся хвосты, летящие по небу. Существование давления света было впервые доказано в лаборатории русского физика П.Н. Лебедева и численно оказалось равным удвоенному количеству отраженной энергии, деленному на скорость света.

Близкой механической аналогией давлению светового луча, отраженного от зеркала, является давление, оказываемое потоком воды из садового шланга, направленным на установленную перед ним доску (рис. 6.10).

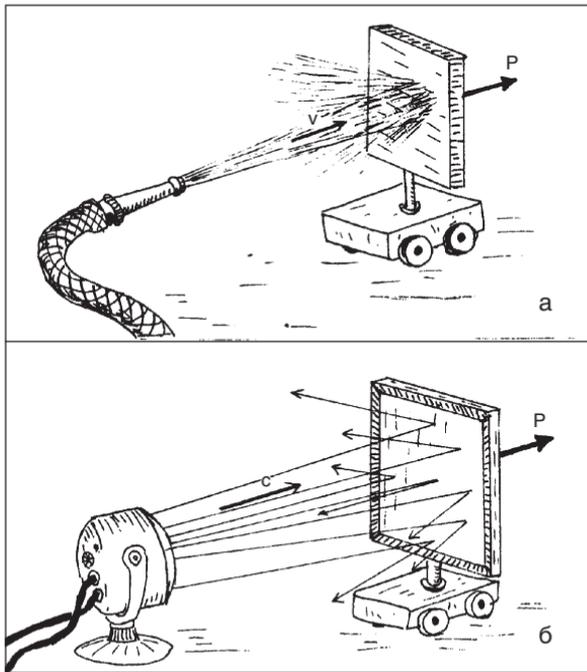


Рис. 6.10. Отражение потока воды от подвижной доски (а) и отражение света от подвижного зеркала (б)

Согласно законам классической механики, давление, оказываемое потоком материальных частиц на стену, от которой они отражаются, равно скорости изменения их импульса, или количества движения в терминологии Ньютона. Если m — масса воды, которую несет поток в единицу времени, и v — скорость потока, то изменение импульса равно $2mv$, поскольку он меняется от $+mv$ до $-mv$. (Действительно, $mv - (-mv) = mv + mv = 2mv$.)

Если применить такую же логику к световому лучу, отраженному от зеркала, то нам придется приписать ему механический импульс, равный работе массы света m , падающей на зеркало в единицу времени со скоростью c . Таким образом, для давления света получаем:

$$P_{\text{света}} = 2mc.$$

Сравнивая это выражение с эмпирическим отношением

$$P_{\text{света}} = 2E/c,$$

приведенным выше, приходим к выводу, что

$$m = E/c^2, \text{ или } E = mc^2.$$

Это знаменитый закон Эйнштейна «эквивалентности массы и энергии», который дарует «невесомой» в классической физике лучистой энергии равенство с обычной весомой материей. Поскольку c^2 очень большое число, равное 9×10^{20} , масса ощутимого количества лучистой энергии очень мала, если выражать ее в привычных единицах. Так, вспышка света от 10-ваттной лампы, излучающей 6×10^9 эрг света в минуту, будет равна $(6 \times 10^9)/(9 \times 10^{20}) = 7 \times 10^{-12}$ г. Вместе с тем Солнце, заливая светом окружающее пространство, теряет 4×10^{11} т в день.

Конечно, отношение между массой и энергией должно быть общим для всех видов энергии. Поля, окружающие электрически заряженные проводники и магниты, становятся весомой физической реальностью даже несмотря на то, что масса поля, окружающего медный шар диаметром 1 м и заряженного потенциалом 1 кВт, составляет 2×10^{-22} г, тогда как поле обычного лабораторного магнита потянет всего на 10^{-15} г.

Тепловая энергия тоже должна обладать весомой массой, и 1 литр воды при 100°C весит на 10^{-20} г больше, чем такое же количество холодной воды. В то же время общая энергия, высвобожденная при взрыве 20-килотонной атомной бомбы, весит около 1 г.

Необходимо сказать несколько слов по поводу наводившего статьи в газетах и популярных журналах утверждения, что сформулированное Эйнштейном отношение энергия—масса стало фундаментом для изобретения атомной бомбы. Это совершенно неверно. С таким же успехом можно сказать, что это отношение стало основой для открытия Нобелем нитроглицерина или изобретения Ваттом парового двигателя. Во всех случаях, когда имеет место физическая или химическая реакция с высвобождением определенного количества энергии, результирующая масса

меньше массы исходных ингредиентов на массу высвобожденной энергии. Так, газы, получающиеся при взрыве нитроглицерина, весят меньше, чем исходное взрывчатое вещество; пар, выходящий из парового двигателя, весит меньше, чем горячая вода в котле; а вес высвобожденных газов и пепла при сгорании дров весит меньше, чем исходные поленья. Но во всех этих случаях вес высвобожденной энергии настолько мал по сравнению с весом исходных материалов, что он не может быть измерен даже с помощью самых точных весов. Ни один физик не может заметить разницу в весе между стаканом горячей и холодной воды, и ни один химик никогда не определит разницу между весом воды и весом газообразного водорода и кислорода, при соединении которых она получается.

В случае ядерных реакций количество высвобождаемой энергии намного больше, и, хотя невозможно собрать все продукты расщепления, полученные при взрыве бомбы, и доказать, что их вес всего на 1 г меньше, чем исходное плутониевое ядро, при помощи тонких методов ядерных опытов можно определить точные значения массы отдельных атомов и разницу между общей массой атомов, участвующих в ядерной реакции, и массой тех, которые являются ее результатом. Но эта разница будет находиться в границах погрешности измерений. Таким образом, роль Эйнштейна в создании атомной бомбы была не в том, что он получил формулу $E = mc^2$, а в письме, которое он написал президенту Рузвельту, результатом которого, благодаря его авторитету, стал запуск Манхэттенского проекта.

Материальное тело, движущееся с определенной скоростью, несет в себе кинетическую энергию движения, и добавочная масса этой энергии обеспечивает релятивистское увеличение массы тела. Закон эквивалентности Эйнштейна применим и к превращению элементарных частиц. Чтобы создать пару из электрона и антиэлектрона (или протона и антипротона), нужно иметь количество энергии, эквивалентное их общей массе, и то же самое количество энергии высвобождается в виде высокочастотной радиации, когда две частицы взаимно аннигилируются.

Четырехмерный мир

Релятивистское сжатие пространства математически эквивалентно сокращению длины движущихся объектов Фицджеральда, но в то время как Фицджеральд считал это сокращение реальным физическим эффектом, вызванным движением материальных тел в эфире, теория относительности считает его кажущимся сжатием расстояний, если смотреть на них из движущейся системы. И сжатие пространства, и замедление времени симметричны относительно обеих систем, находящихся в состоянии движения относительно друг друга. Каждый раз, когда расстояния сжимаются, время удлиняется, что в некотором роде аналогично случаю вертикальной и горизонтальной проекции палки заданной длины L . Если поставить палку вертикально, ее вертикальная проекция будет равна 0, а горизонтальная — L . Если палку положить горизонтально, ее вертикальная проекция будет равна L , а горизонтальная — 0. Если палку поместить под углом θ , то обе проекции будут отличны от 0.

Но независимо от того, каков угол θ , согласно теореме Пифагора, имеем:

$$\Delta x^2 + \Delta y^2 = L^2.$$

Эта аналогия привела немецкого математика Г. Минковского (чья работа последовала вскоре после публикаций Эйнштейна) к выводу, что время может рассматриваться в качестве четвертой координаты вдобавок к трем пространственным координатам и что движение одной системы относительно другой можно трактовать как вращение этой четырехмерной системы координат.

В сегодняшней жизни мы обозначаем разные события, приписывая им информацию о месте и времени. Мы говорим, что встреча состоится на 15-м этаже на углу 6-й авеню и 32-й улицы в 8:00 пополудни. Принято использовать диаграммы, в которых место отмечается напротив времени. Но такие диаграммы, которые мало чем отличаются от диаграмм, показывающих изменение рыночных цен от месяца к месяцу, не более чем графическое представление зависимости между двумя взаимосвязанными количества-

ми, и они не могут считаться имеющими смысл как объект для применения стандартных геометрических правил и операций. Если считать время допустимым четвертым измерением, его нужно прежде всего измерить в тех же единицах, что и три пространственные координаты. Это можно сделать, умножив время, первоначально заданное в секундах, на некую стандартную скорость, что даст расстояние, выраженное в сантиметрах, как и три пространственные координаты. Было бы нерационально выбирать для этой цели какую-то произвольную единицу, как, например, предельно допустимую скорость на автомагистралях (которая зависит от местных правил) или даже скорость звука (зависящую от вещества и температуры). Ясно, что наилучшим выбором будет скорость света в вакууме, которая очевидным образом связана с базовыми законами природы и неизменна, как было доказано опытом Майкельсона—Морли. Таким образом, используя x , y и z для трех первых (пространственных) координат, для четвертой координаты (времени) мы будем использовать ct . Но это только самое начало того, что нужно сделать. В случае пространственных координат x , y и z все три можно свободно менять местами, и длина деревянного ящика становится его высотой, если перевернуть его на бок. Очевидно, что в случае времени и пространственных координат полностью такая замена невозможна. Иначе можно было бы использовать часы вместо измерительной линейки и наоборот! Таким образом, если рассматривать время как четвертую координату, то придется умножать его не только на c , но и еще на какой-то множитель, который, не нарушая гармонию этой четырехмерной системы координат, будет делать время физически *отличным* от пространственных координат. Математика дает нам именно такой множитель, известный как мнимая единица и обозначаемый символом i . Мнимая единица определяется как квадратный корень минус единицы:

$$i = \sqrt{-1}.$$

Поскольку, согласно элементарной алгебре, $(+1)^2 = +1$ и $(-1)^2 = +1$, у числа i нет места ни среди положительных, ни среди отрицательных чисел, и потому оно называется

мнимой единицей. Она не используется в обычных расчетах, и если «иметь \$1.00» означает, что на вашем банковском счету есть один доллар, а «иметь $\$(-1.00)$ » значит, что у вас долг в 1 доллар, то i не значит ничего в смысле банковских операций.

Но математики и физики-теоретики считают i очень удобной для своих вычислений в тех случаях, когда она выпадает в окончательных результатах, которые должны иметь физический смысл. И так происходит всегда, когда окончательные результаты содержат только квадраты i , поскольку $i^2 = -1$, а это обычное отрицательное число. Таким образом, мы будем использовать эту мнимую единицу как добавочный множитель и запишем четвертую координату как ict . Поскольку невозможно нарисовать четыре взаимно перпендикулярных оси, мы опустим координату z и вместо нее используем новую координату времени ict . В результате получается диаграмма, приведенная на рис. 6.11, где пространственные оси координат x и y находятся в горизонтальной плоскости (по отношению к наблюдателю), а мнимая ось времени расположена вертикально. Каждая точка на этой диаграмме представляет собой *событие*, то есть нечто произошедшее в определенном месте в определенное время. События, которые происходят одновременно (в той системе, для которой нарисована эта диаграмма), представлены точками на плоскостях перпендикулярных оси времени.

События, которые происходят в разное время, но в одном и том же месте (в той же системе), находятся на прямых линиях параллельных оси времени. Коническая поверхность со степенью раскрытия 90 градусов, называемая световым конусом, соответствует событиям, которые могут быть связаны со световым сигналом. Например, если точка (событие) A представляет собой вспышку, излучающую световую волну, то точка B соответствует освещению этим светом объекта, расположенного где-то в пространстве.

Как было сказано выше, наблюдения из движущейся системы за пространственными и временными интервалами можно интерпретировать геометрически, как вращение точки пересечения четырех координат, во время кото-

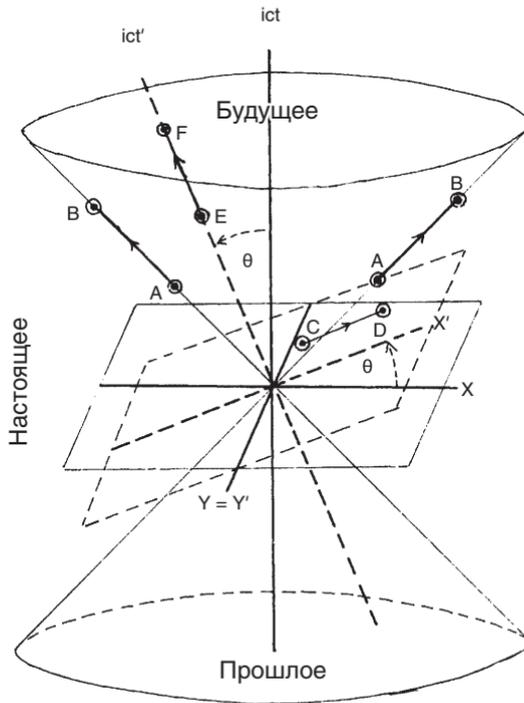


Рис. 6.11. Пространственно-временной континуум, содержащий две пространственные координаты (x и y) и временную координату (ict). Конические поверхности, представляющие распространение света ($x^2 + y^2 - c^2t^2 = 0$), делят этот континуум на настоящее, прошлое и будущее

рого временная ось поворачивается на определенный угол (штриховые линии и буквы на рис. 6.11). Однако, поскольку скорость движения не может быть больше скорости света c , угол θ , на который повернулась ось ict , не может быть больше 90 градусов. Таким образом, мы можем выделить два разных типа пар событий.

1) События, как E и F , для которых угол между линией EF , соединяющей их с осью времени, *меньше 90 градусов*. В этом случае мы можем найти систему координат, движущуюся относительно исходной системы с такой скоростью, что оба события будут находиться на новой оси времени ict ,

и их расстояние в пространстве станет равно нулю. Этот тип вращения пространственно-временных осей является обыденным, и мы все встречаемся с ним в повседневной жизни. Например, если мы хотим посмотреть футбольный матч в понедельник в одном городе, а во вторник — в другом городе, расположенном за пару сотен миль от него, мы просто уедем после окончания первой игры и будем там до начала второй игры. Несмотря на то что два стадиона различны по отношению к экватору и Гринвичскому меридиану, они оба будут практически в одном месте по отношению к системе координат, привязанной к автомобилю. Пространственно-временное разделение двух спортивных событий, описанных выше, называется *временным* разделением, потому что, двигаясь с соответствующей скоростью, можно свести к нулю их пространственное разделение и наблюдать их в разное время (с разницей в день) из одного и того же места (сиденья в машине).

2) События, как C и D , для которых угол между линией CD и осью времени *больше 90 градусов*. В этом случае мы сможем увидеть второе шоу, только если будем двигаться со скоростью более высокой, чем скорость света. Таким образом, например, поскольку свету нужно 5 часов 20 минут, чтобы пройти расстояние от Меркурия до Плутона, мы, вероятно, не сможем присутствовать на ланче в час дня на Меркурии и на коктейле в 5 часов того же дня на Плуtone. Вместе с тем мы всегда можем выбрать соответствующую скорость, чтобы свести к нулю разницу во времени между этими двумя событиями и сделать их одновременными в выбранной пространственно-временной системе координат. Пространственно-временное разделение таких пар событий называется *пространственным* разделением, поскольку, двигаясь соответствующим образом, мы можем свести к нулю разницу во времени между ними.

Теперь можно дать новое определение старым понятиям прошлого, настоящего и будущего. Если считать, что мы находимся в начальной точке системы координат, показанной на рисунке 6.11, и сказать: «Я здесь ($x = 0$, $y = 0$, $z = 0$), а теперь и ($t = 0$), все события, находящиеся в верх-

ней части конуса (t положительно), — это будущее, поскольку независимо от того, как мы движемся, пройдет некоторое время, пока мы их увидим. Мы можем повлиять на эти будущие события, что-то предприняв, но они не могут повлиять на нас. Аналогично, все события, находящиеся в нижней части конуса (t отрицательно), — это прошлое, поскольку независимо от того, как быстро мы движемся, мы не можем их увидеть. Например, невозможно лететь в пространстве так быстро, чтобы догнать световые волны от взрыва первой атомной бомбы или пожара Рима. Эти прошлые события могут влиять на нас, но мы не можем повлиять на них! Между верхней и нижней частью светового конуса лежит «ничья земля» того, что мы обычно называем «настоящее». Сюда входят события, которые либо одновременны с нашей точки зрения, либо могут быть сделаны одновременными, если смотреть на них из системы, движущейся со скоростью меньше скорости света. Тот факт, что «настоящее» занимает на рисунке 6.11 так много места, вызван, конечно, нашим решением использовать для расчета временных интервалов ct вместо t . Если мы нарисуем t вместо ct , то вертикальная шкала сожмется на множитель 3×10^{10} , и верхняя и нижняя части светового конуса растянутся, поскольку пространство между ними сожмется практически полностью. Это то, что мы наблюдаем в повседневной жизни, где скорости пренебрежимо малы по сравнению со скоростью света.

Теперь, возвращаясь в трехмерное пространство и вводя координату z , можно применить несколько математических хитростей, введя в выражение для четвертой координаты мнимую единицу. Предположим, мы послали световой сигнал из начала координат $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$ в момент времени $t = 0$. Ко времени t световой сигнал достигает положения с пространственными координатами x , y и z , и, согласно теореме Пифагора, его расстояние от первоначального положения будет:

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Поскольку свет всегда движется со скоростью c , это расстояние должно равняться ct , и мы можем написать:

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct$$

или

$$x^2 + y^2 + z^2 = (ct)^2$$

или

$$x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2 = 0.$$

Но поскольку $-1 = i^2$, это можно переписать как:

$$x^2 + y^2 + z^2 + (ict)^2 = 0.$$

Левая часть уравнения — это пифагорова сумма квадратов для четырехмерного пространства. В системе со штрихом, движущейся относительно исходной системы, мы получим:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 + (ict')^2 = 0,$$

так что при повороте четырехмерной системы координат сумма *четырёх* квадратов не меняется. Используя преобразования Лоренца, можно показать, что то же самое справедливо для пространственного и временного разделения любых двух точек, представляющих два события в пространстве (x, y, z, ict) . Таким образом, выражение

$$x^2 + y^2 + z^2 + (ict)^2$$

инвариантно (то есть взаимозаменяемо) тому, из какой системы наблюдают за двумя событиями. Их трехмерное пространственное и одномерное временное разделение будут меняться, но их четырехмерное разделение, заданное приведенным выше выражением, останется тем же самым. Таким образом, используя ict как четвертую координату, мы добиваемся единства пространства и времени и можем считать все физические события происходящими в четырехмерном пространственно-временном мире. Однако мы не должны забывать, что это может быть достигнуто только при использовании мнимой единицы — коварного помощника и, когда речь идет о реальных величинах, пространство и время — это не совсем одно и то же.

Релятивистская теория гравитации

Как было сказано выше, теория относительности Эйнштейна может считаться блестящей кульминацией аргументов Галилео, касающихся механических опытов, проводимых внутри каюты плавно идущего корабля. Обобщение этой теории на случай неравномерного движения, которое часто называют общей теорией относительности, но которое лучше описывается названием релятивистской теории гравитации, также уходит корнями в опыт Галилео, когда легкий и тяжелый предметы бросали с высоты падающей Пизанской башни. До появления статьи Эйнштейна о связи между ускоренным движением и силами гравитации, опубликованной в 1914 году, эмпирический факт, что легкие и тяжелые материальные тела падают с абсолютно одинаковым ускорением, оставался полнейшей загадкой.

В этой статье Эйнштейн описывает воображаемые эксперименты, которые можно провести в закрытой комнате, свободно парящей в межзвездном пространстве. Благодаря отсутствию гравитации все объекты внутри не имеют тенденции двигаться в каком-либо направлении. Однако если комната движется с ускорением, скажем, благодаря паре ракетных двигателей, прикрепленных под ней, ситуация внутри становится совершенно иной. Все объекты будут прижаты к полу, как если бы на них действовала сила гравитации, тянущая их вниз. Рассмотрим человека, стоящего на полу такой космической лаборатории, двигающейся с постоянным ускорением a , который держит в руках два шара: один легкий, другой тяжелый. Благодаря ускорению всей системы ноги человека будут крепко прижаты к полу, а два шара будут прижаты к его ладоням. Что произойдет, если он одновременно отпустит оба шара? Будучи отсоединенными от корпуса ракеты, оба шара продолжат двигаться со скоростью, которая была у них в момент, когда их отпустили, и они останутся рядом друг с другом. Но поскольку ракета движется с ускорением, она будет постоянно набирать скорость, и вскоре пол перегонит шары и одновременно ударится в них. После этого удара шары останутся прижатыми к полу и начнут ускоряться вместе

со всей системой. Однако наблюдатель внутри комнаты будет видеть, что два шара, которые он выпустил из рук, стали падать с одинаковым ускорением, и затем коснулись пола в одно и то же время. Это и есть эквивалентность между гравитацией и ускорением, являющаяся достоянием всеобщего знания в космическую эру, в которой мы живем.

Но не является ли это сходство с механическими явлениями, имеющее место внутри ракетного корабля в гравитационном поле Земли, чистым совпадением, или оно более глубоко связано с природой сил притяжения? Эйнштейн был уверен в справедливости последнего и задавался вопросом, как в этом случае поведет себя световой луч в движущейся с ускорением комнате. Представьте, что вспышка света происходит на стене комнаты и луч света идет через нее. Чтобы проследить за прохождением луча, можно поставить на его пути несколько равноудаленных друг от друга пластин из флуоресцентного стекла (рис. 6.12).

Если комната не движется с ускорением, точки, в которых луч пересекает стеклянные пластины, будут, естественно, находиться на одной прямой, и невозможно будет сказать, находится ли ракета в состоянии покоя или движется равномерно по отношению, скажем, к неподвижным звездам. Однако если комната движется с постоянным ускорением a , ситуация будет другой. Время, необходимое свету, чтобы дойти до первой, второй, третьей и т. д. стеклянных пластин, возрастает в арифметической прогрессии: 1, 2, 3, и т. д., тогда как смещение положения ракеты, движущейся с постоянным ускорением, возрастает в геометрической прогрессии: 1, 4, 9 и т. д. Таким образом, следы светового луча на стеклянных пластинах будут образовывать параболу, похожую на траекторию камня, брошенного горизонтально. Следовательно, если эквивалентность ускорения и гравитации распространяется на электромагнитные явления, световые лучи должны отклоняться гравитационным полем. Однако из-за большой скорости света его отклонение в гравитационном поле Земли слишком мало, чтобы быть заметным. Фактически, если горизонтальный луч пройдет, скажем, 30 м, прежде чем упадет на экран, он по-

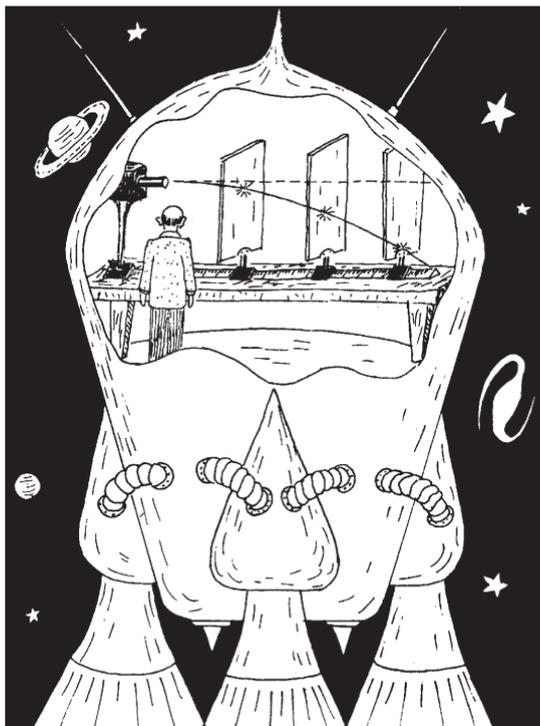


Рис. 6.12. Оптический эксперимент в движущемся с ускорением ракетном корабле, предполагающий, что лучи света должны отклоняться в гравитационном поле

кроет это расстояние за $(3 \times 10^3)/(3 \times 10^{10}) = 10^{-7}$ с. Поскольку ускорение силы тяжести на поверхности Земли составляет около 10^3 см/с², вертикальное отклонение светового луча на экране составит:

$$\frac{1}{2} \times 10^3 \times (10^{-7})^2 = 5 \times 10^{-12} \text{ см,}$$

что сравнимо с диаметром атомного ядра!

Однако Эйнштейн понял, что отклонение световых лучей может стать заметным, когда они проходят близко к поверхности Солнца. Ниже приведено приближенное значение ожидаемого отклонения. Ускорение силы тяжести вблизи поверхности Солнца определяется гравитационной

постоянной ($6,7 \times 10^{-8}$) и массой Солнца (2×10^{33}), деленной на квадрат радиуса Солнца (7×10^{10}), и будет равна:

$$\frac{6,7 \times 10^{-8} \times 2 \times 10^{33}}{(7 \times 10^{10})^2} = 3 \times 10^4 \text{ см/сек}^2.$$

Расстояние, проходимое в гравитационном поле Солнца, сравнимо с диаметром Солнца ($1,4 \times 10^{11}$), а время, необходимое, чтобы его покрыть, равно $(1,4 \times 10^{11}) / (3 \times 10^{10}) = 5$ с. За это время луч света «упадет» на:

$$\frac{1}{2} \times 3 \times 10^4 \times 25 = 3,7 \times 10^5 \text{ см,}$$

и угол отклонения будет равен:

$$\frac{3,7 \times 10^5}{7 \times 10^{10}} = 6 \times 10^{-6} \text{ радиан,}$$

или около 1 угловой секунды.

Более точные вычисления отклонения светового луча, скользящего вдоль поверхности солнечного диска, дают значение 1,75 угловой секунды. Из-за того что вблизи Солнца звезды можно видеть только во время полного солнечного затмения, британская астрономическая экспедиция отправилась в 1919 году в Африку, где ожидалось такое затмение. (Немецкие астрономы не смогли поехать из-за военной блокады.) Результаты полностью подтвердили предсказания Эйнштейна. Когда Эйнштейну сообщили об этих результатах, он просто улыбнулся и сказал, что был бы очень удивлен, если бы результаты были отрицательными. Это и другие подтверждения его теории, без всякого сомнения, доказали корреляцию между явлениями, происходящими в гравитационных полях и в системах с ускорением.

Гравитация и искривление пространства

Все знают, что означает кривая линия или кривая поверхность, но нужно иметь воображение, чтобы понять значение кривизны трехмерного пространства. Сложность в создании концепции искривленного пространства состоит в том, что, если на поверхность мы можем посмотреть

снаружи и увидеть, плоская она или искривленная, в случае пространства мы находимся внутри и не можем выйти наружу, чтобы посмотреть на него. Самый лучший способ обсудить свойства искривленного пространства — это использовать аналогию с воображаемыми двумерными существами, которые живут на поверхности и понятия не имеют, что существует направление, перпендикулярное их поверхности. Как они могут сказать, является ли поверхность, на которой они живут, сферой или чем-то еще, не выходя за ее пределы? Ответ состоит, конечно, в том, что им следует изучать геометрию своего пространства, рисуя различные фигуры, измеряя углы и т. д. На рис. 6.13 показан пример, как такие двумерные геометры изучают треугольник, нарисованный на плоскости, на сфере и на поверхности, называемой седлом.

На плоской поверхности (*a*) применяются правила плоской геометрии Евклида, и сумма трех углов в треугольнике всегда будет равняться 180 градусам. На сферической поверхности (*b*) сумма трех углов треугольника всегда будет больше 180 градусов, что легко увидеть, нарисовав на шаре треугольник, образованный двумя меридианами и соединяющим их отрезком экватора. Поскольку меридианы пересекают экватор под прямым углом, сумма двух углов в основании нашего сферического треугольника уже равна 180 градусам. К ней мы должны прибавить угол на полюсе, который тоже может быть достаточно большим. Для маленьких сферических треугольников сумма их углов будет ближе к 180 градусам, но разница исчезнет, только если треугольник бесконечно меньше сферы, на которой он нарисован. На седловой поверхности (*в*) ситуация другая, и сумма трех углов меньше 180 градусов. Принято считать, что сферическая поверхность имеет положительную кривизну, а седловая — отрицательную кривизну.

Эти выводы можно распространить на случай трехмерного пространства и сказать, что пространство является плоским или обладающим положительной или отрицательной кривизной в зависимости от того, равна ли сумма углов треугольников, соединяющих три точки в этом пространстве, 180 градусам, она больше или меньше. Рассмо-

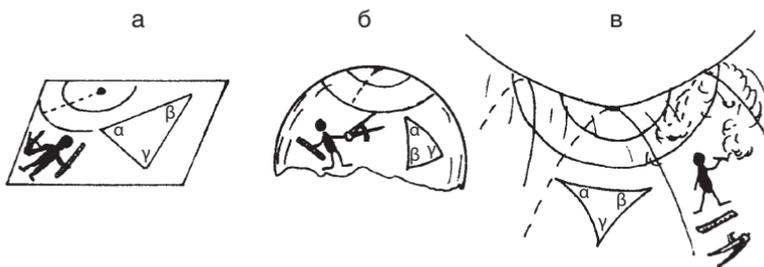


Рис. 6.13. Три разных типа изогнутых (двумерных) поверхностей. Плоская поверхность: кривизна равна нулю (а). Сферическая поверхность: кривизна положительна (б). Седловая поверхность: кривизна отрицательная (в). Разница между этими тремя случаями может быть открыта двумерными разумными существами, если они будут изучать геометрию окружностей и треугольников

трим масштабный эксперимент, в котором три астронома, имеющих при себе теодолиты, расположились на Земле, на Венере и на Марсе и измеряют углы в треугольнике ЗВМ. Поскольку, как мы выяснили в предыдущем параграфе, световые лучи отклоняются в гравитационном поле Солнца (смещаясь *в направлении* тела, вызывающего гравитацию), три луча, образующие этот треугольник, будут выглядеть, как показано на рисунке 6.14, и сумма трех углов, полученная астрономами, будет *больше* 180 градусов. Таким образом, наши астрономы придут к выводу, что пространство вокруг Солнца искривлено и имеет положительную кривизну.

Если повторить измерения на планетах Юпитер, Сатурн и Уран, которые находятся дальше от Солнца, отклонение световых лучей из-за солнечной гравитации будет меньше, а сумма углов треугольника будет ближе к 180 градусам, указывая, что кривизна пространства уменьшается с увеличением расстояния от Солнца. Кто-то может возразить против данного выше объяснения такого измерения, говоря, что на самом деле астрономы измеряли не обычный треугольник, поскольку его стороны не являются прямыми линиями. Но *что* такое прямая линия? Ее единственное разумное определение — это линия взгляда, но линия взгляда *является* линией распространения света в пустом про-

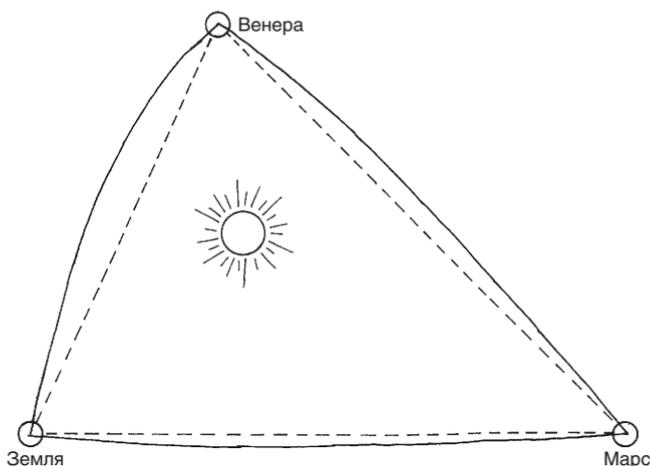


Рис. 6.14. Триангуляция пространства вокруг Солнца

странстве! Можно также определить прямую линию как кратчайшее расстояние между двумя точками, но в основе оптики как науки лежит постулат, что свет всегда выбирает кратчайший маршрут. Если серьезно вдуматься в эту ситуацию, окажется, что другого разумного определения прямой линии нет и что непрерывные линии на рис. 6.14 должны считаться прямыми линиями в искривленном пространстве, а прерывистые линии, показанные на этом рисунке, вообще не имеют никакого физического смысла. Чтобы избежать путаницы в терминологии, оставим термин «прямая линия» только для кратчайшего расстояния в геометрии на плоскости, тогда как в случае искривленной поверхности и искривленного пространства будем употреблять термин «геодезические линии». Таким образом, на поверхности сферы эквивалентом прямых линий будут дуги большого диаметра. Их мы и будем использовать для построения сферических треугольников. Здесь можно заметить, что в сферической геометрии старое утверждение из геометрии Евклида о том, что «параллельные прямые никогда не пересекаются», больше не работает, поскольку *любые* две большие окружности всегда пересекаются в двух точках. И два самолета, вылетающие из двух точек эквато-

ра в параллельных направлениях, перпендикулярных экватору, и не меняющие курса, столкнутся при подлете к полюсу.

Эквивалентность между гравитационным полем и искривленным пространством можно прояснить еще больше на следующем двумерном примере. Если катить бильярдный шар по плоскому горизонтальному столу, он будет двигаться по обычной прямой линии. Но если по какой-то причине на пути шара в столе имеется небольшая выемка и выпуклость, он отклонится от «прямого» пути и свернет в сторону центра выемки или от центра выпуклости. Если мы будем наблюдать за движением шара по такому столу (через дырку в потолке), то не заметим дефектов на его поверхности и поверим, что существует некая сила, притягивающая и отталкивающая шар от каких-то точек на поверхности стола. Аналогично, отклонение световых лучей и движение материальных тел в окрестности Солнца можно интерпретировать либо как действующую на них силу, либо как результат кривизны пространства в окрестности больших масс.

Давайте посмотрим на эту проблему под другим углом и будем считать, что видим физические явления с большой вращающейся платформы (рис. 6.15). Такой мысленный эксперимент похож на опыт Эйнштейна, описанный в предыдущем параграфе, с той разницей, однако, что вместо линейного ускорения (то есть изменения численного значения скорости без изменения ее направления) мы имеем дело с круговым ускорением (изменением направления скорости без изменения ее численного значения).

Мы можем добавить к нашей вращающейся платформе купол в форме полусферы, вращающийся вместе с ней и не дающий людям, находящимся внутри, видеть движущиеся деревья и дома вокруг. Каждому известно, что люди на вращающейся платформе будут ощущать центробежную силу, отталкивающую их от центра, и интерпретировать ее как особую силу гравитации, которая отталкивает, а не притягивает. Аналогия с гравитацией усиливается тем фактом, что если один из этих людей, твердо стоящих на платформе, положит на нее два шара: один легкий, другой тяжелый, то эти шары покатаются рядом, что очень похоже на

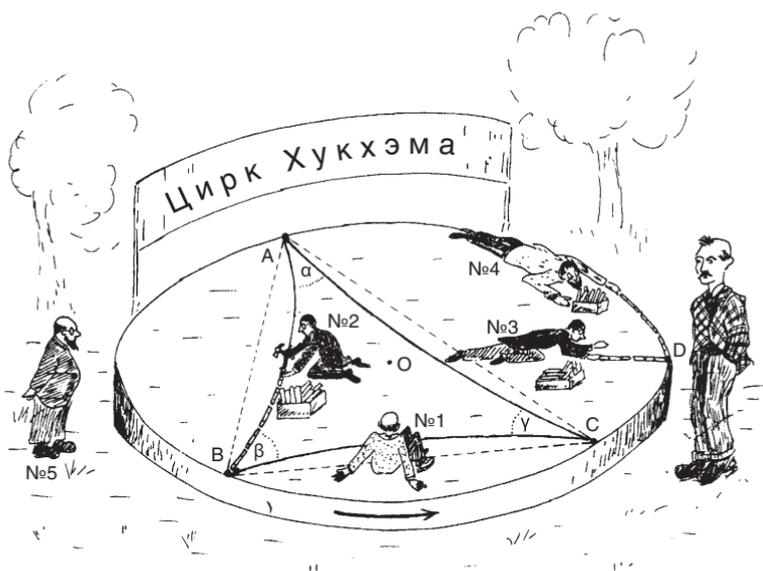


Рис. 6.15. Геометрические исследования на вращающейся платформе

падение двух объектов, брошенных с высокой башни. Поскольку люди на платформе профессиональные физики и знают все аргументы, представленные в этой главе, они могут связать это «псевдогравитационное поле» с геометрией пространства и попытаться произвести некоторые геометрические измерения. Например, они могут попытаться построить треугольник с вершинами A , B , C и измерить сумму его углов. Используя определение прямой линии, как кратчайшего расстояния между двумя точками, физик номер 2 (физик номер 1 большой начальник, он просто наблюдает за работой) берет коробку с деревянными палочками одной и той же строго заданной длины и пытается выложить из них линию между точками A и B , так чтобы использовать наименьшее количество палочек. Если бы платформа не вращалась, то самым лучшим результатом была бы прерывистая линия, обозначенная на рисунке. Но в случае вращения ситуация меняется. Теперь палочки движутся в направлении своей длины и подвергаются со-

крашению Фицджеральда. На самом деле физик номер 5, стоящий на земле, будет в этом уверен. Палочки, расположенные посередине, двигаются вдоль своей длины и в полной мере испытывают на себе сокращение Фицджеральда, в то время как у палочек, расположенных ближе к периферии, вдоль их длины направлена по меньшей мере какая-то компонента скорости. Благодаря этому сжатие между палочками появляется пространство, и номеру 2 придется добавлять палочек, чтобы сделать линию непрерывной. Но существует как минимум частичное средство борьбы с этой проблемой. Если палочки сдвинуты ближе к центру платформы, их линейные скорости, а также их сжатие будут несколько уменьшены, и дополнительных палочек понадобится меньше. Таким образом, номер 2 будет класть свои палочки, как показано на рисунке, и будет вынужден делать то же самое на двух других сторонах треугольника. Теперь сумма углов треугольника будет *меньше* 180 градусов, и физики на платформе придут к выводу, что их пространство имеет отрицательную кривизну.

Можно добавить, что в случае, если эти физики решат проверить результаты, описанные выше, оптическими методами, они придут к такому же результату. Действительно, поскольку поле центробежных сил во всех отношениях похоже на гравитационное поле отталкивания, световые лучи, соединяющие вершины *A*, *B* и *C*, будут отклонены *от* центра платформы и повторят путь деревянных палочек.

Теперь на платформе появляются еще два человека: номер 3 и номер 4, занятые чем-то другим. Они пытаются измерить отношение окружности к ее диаметру, которое в геометрии на плоскости обозначается греческой буквой π . Здесь вращение платформы тоже внесет смуту. В то время как у номера 3 возникнут проблемы, поскольку палочки, которые он использует, двигаются перпендикулярно их длине и становятся тоньше, но не меняют свою длину; палочки, которые использует номер 4, испытывают максимальное сжатие Фицджеральда, и ему понадобится их очень много. Таким образом, отношение длины окружности к диаметру, измеренное на платформе, становится больше числа 3,1416..., используемого в геометрии на плоскости.

Этот результат тоже подтверждает вывод относительно отрицательной кривизны пространства.

Давайте на минуту вернемся к изогнутым двумерным поверхностям и посмотрим, что произойдет, если нарисовать на них круги. На глобусе круги с центром на полюсе называются параллели, и очевидно, что отношение длины параллели к ее диаметру (измеренному вдоль меридиана) меньше, чем число π . Фактически длина экватора (0-й параллели), деленная на длину меридиана, равна всего 2. Длина параллелей возрастает медленнее, чем их радиус, измеренный вдоль меридиана, и для 80-й, 70-й, 60-й и т. д. параллелей (с радиусами 10, 20, 30 градусов и т. д.) длина возрастает медленнее, чем 1, 2, 3 и т. д. Аналогично площадь поверхности внутри этих параллелей возрастает медленнее, чем 1, 4, 9 и т. д. Противоположная ситуация возникает на седловой поверхности, где длина окружности растет *быстрее*, чем ее радиус, а площадь поверхности — быстрее квадрата ее радиуса. Если отрезать круглый кусок кожи от футбольного мяча и положить его на стол, он вспучится посередине, и, чтобы сделать его плоским, нужно будет растянуть его края. Кусок кожи, вырезанный из ковбойского седла, напротив, будет топорщиться по краям, и, чтобы сделать его плоским, нужно будет стянуть их. С помощью этой аналогии мы также можем приписать пространству внутри вращающейся лаборатории отрицательную кривизну.

В случае трехмерного пространства поверхность шара возрастает медленнее, чем r^2 , а его объем — медленнее, чем r^3 в случае положительной кривизны, а для отрицательной кривизны верно обратное. Этот математический результат дал основание для одной очень интересной работы в области астрономии, которая была проведена достаточно давно Эдвином Хабблом в обсерватории Маунт-Уилсон. Хаббл, будучи крупным знатоком звездных галактик, миллиарды которых разбросаны в пространстве мироздания в диапазоне, доступном для больших телескопов, решил выяснить, как растет количество галактик с увеличением расстояния от нас: прямо пропорционально, более медленно или более быстро, чем кубы этих расстояний. Если верно первое, то мы должны сделать вывод, что космическое пространство явля-

ется евклидовым. Во втором случае пространство имеет положительную кривизну и, вероятно, должно быть замкнутым. В третьем случае пространство имеет отрицательную кривизну и является открытым во всех направлениях. К несчастью, в то время техника, отвечающая за измерение межгалактических расстояний, была недостаточно развитой, и результаты Хаббла оказались противоречивыми и неубедительными. Остается надеяться, что повторение галактических расчетов Хаббла на более совершенном оборудовании позволит решить эту важную для космологии проблему.

Придя к заключениям, описанным выше, Эйнштейн создал теорию, согласно которой все гравитационные взаимодействия следует интерпретировать как вызванные искривлением пространства. К счастью для Эйнштейна, подробная математическая теория искривленных пространств с любым числом измерений была разработана за много десятилетий до него немецким математиком Бернардом Риманом, поэтому все, что нужно было сделать Эйнштейну, — это применить существующие математические формулы к физически реальному искривленному пространству. Конечно, это было четырехмерное пространство координат x , y , z и ict , обсуждавшееся ранее в этой главе. Соотнося так называемый тензор кривизны пространственно-временного континуума с распределенными и движущимися массами (эта базовая формула приведена под портретом Эйнштейна на рис. 6.6), Эйнштейн смог получить все результаты ньютоновской теории гравитации как первое приближение. Однако более точные вычисления указывали, что должно существовать какое-то небольшое отклонение от первоначальной теории гравитации Ньютона, открытие которого доказало бы превосходство взглядов Альберта над взглядами Исаака. Один из выводов теории гравитации Эйнштейна — отклонение пути светового луча в гравитационном поле — уже обсуждался. Другое важное заключение касается движения планет вокруг Солнца. Ньютон показал, что, согласно его закону притяжения, планеты должны двигаться вокруг Солнца по эллиптическим орбитам в соответствии с эмпирическими законами Кеплера. В теории Эйнштейна все движения необходимо рассматривать в четырехмерном про-

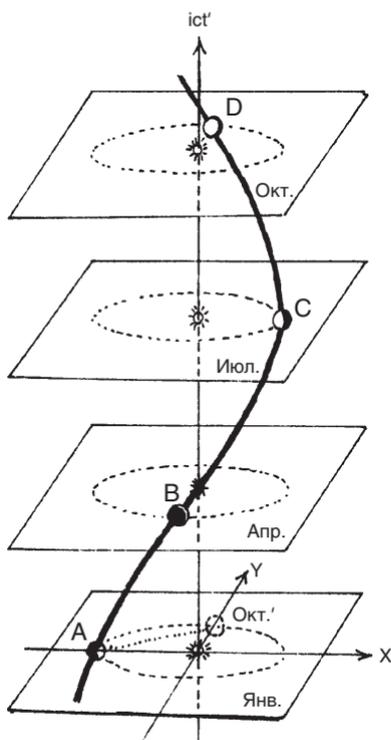


Рис. 6.16. Планетарная линия Земли в ее движении вокруг Солнца в системе координат x, y, z, ict . В пространственно-временном измерении расстояние между положением Земли в январе и в октябре является кратчайшим расстоянием. Но расстояние между положением в январе и *проекцией* положения в октябре на плоскость января (*Окт.'*), конечно, кратчайшим не является

странстве (x, y, z, ict) , которое искривляется, если в нем присутствуют гравитационные поля. Линии, представляющие «историю движения» любого материального тела в четырехмерном мире, известные как мировые линии этого тела, должны быть «геодезическими», то есть кратчайшими линиями, и могут быть рассчитаны на основании релятивистской теории гравитационного поля.

На рисунке 6.16 показано графическое представление планетарной линии Земли в ее движении вокруг Солнца.

Две пространственные координаты x и y взяты в плоскости эклиптики, а третья представляет собой временную координату *ict*. Пространственно-временной континуум искривляется в окрестности Солнца, и мировая линия Земли соответствует самой прямой (то есть геодезической) линии в этом искривленном пространстве. Таким образом, линия $ABCD$ является кратчайшим расстоянием между точками (событиями) A и D в трехмерном пространственно-временном континууме, и ее проекция на плоскость (x, y) является орбитой вращения Земли вокруг Солнца. Однако точные вычисления показывают, что этот эллипс не остается постоянным, как утверждала теория Ньютона, а медленно вращается вместе со своей главной осью, которая смещается на маленький угол с каждым циклом вращения. Этот эффект должен быть более заметен в случае орбиты Меркурия, которая вытянута сильнее, чем орбиты других планет, и находится ближе всего к Солнцу. Эйнштейн рассчитал, что орбита Меркурия должна поворачиваться на 43 угловые секунды за сто лет, и тем самым разгадал старую загадку небесной механики. Задолго до рождения Эйнштейна математики-астрономы рассчитали, что большая ось орбиты Меркурия должна медленно поворачиваться из-за пертурбаций, то есть гравитационных возмущений от других планет Солнечной системы. Но между расчетами и наблюдениями существовало расхождение, достигавшее 43 угловых секунд за сто лет, которое невозможно было объяснить. Релятивистская теория гравитации Эйнштейна заполнила этот пробел и одержала бесспорную победу над теорией Ньютона.

Общая теория поля

Работа жизни Альберта Эйнштейна завершилась геометризацией значительной части физики: время стало законным четвертым товарищем трех пространственных координат (если не считать множителя i), и силы гравитации стали интерпретироваться как зависящие от кривизны этого четырехмерного мира. Но электрические и магнитные

силы еще оставались вне этих геометрических завоеваний, и, зайдя так далеко, Эйнштейн направил всю свою энергию на то, чтобы накинуть на упрямое электромагнитное поле прочную геометрическую узду. Тогда каково неизведанное геометрическое свойство четырехмерного пространства, которое отражает электрические и магнитные взаимодействия? Сам Эйнштейн и многие другие «заинтересованные наблюдатели», такие как известный немецкий математик Герман Вейл, изо всех сил старались придать электромагнитному полю чисто геометрическую интерпретацию. Но электромагнитное поле — детище Вильяма Клерка Максвелла — с чисто шотландским упрямством отказывалось геометризироваться. По меньшей мере четыре десятилетия, до самой своей смерти в 1955 году, Эйнштейн работал над так называемой общей теорией поля, то есть теорией, которая объединила бы гравитационные и электромагнитные поля на единой геометрической основе. Но годы шли, а задача становилась все более безнадежной. Время от времени Эйнштейн выходил с новым набором формул, которые, по его словам, должны были разрешить проблему общей теории поля, и эти сложные тензорные выражения печатались на первых страницах «Нью-Йорк таймс» и других газет по всему миру. Но каждый раз оказывалось, что эти формулы не годятся, и до следующего откровения снова воцарялась тишина. И молодые, и опытные физики-теоретики постепенно теряли уверенность в том, что придать электромагнитному полю чисто геометрическую интерпретацию действительно можно. Конечно, было бы хорошо сделать это, но Природу нельзя заставить делать то, что не в ее природе. С другой стороны, физики быстро прогрессировали в деле освоения вновь открытых полей, и в дополнение к классическим гравитационным и электромагнитным полям новые поля заняли прочные позиции в науке. Если бы электромагнитному полю была дана чисто геометрическая интерпретация, нам пришлось бы подчинять себе мезонные, гиперонные и многие другие новые поля, чтобы иметь возможность сказать: физика — это не что иное, как геометрия. Сам Эйнштейн становился все более и более раздражительным и проявлял все меньше желания обсу-

дать эту тему с коллегами. Во время одного из визитов в Великобританию в начале 1930-х годов он прочитал лекцию по общей теории поля в школе для девочек в Северной Англии, но отказался говорить об этом в Кембридже. Его внимание все больше занимали проблемы сионизма и мира во всем мире, но научная мысль оставалась неизменно острой. Когда в годы Второй мировой войны автор этой книги стал посещать Эйнштейна в его тихом доме в Принстоне, он имел с Эйнштейном много интересных и информативных бесед по разным разделам современной физики. На его письменном столе были разбросаны бумаги, исписанные сложными тензорными формулами, очевидно имевшими отношение к общей теории поля. Но Эйнштейн никогда не говорил о том, над чем работал. Сейчас он наверняка в раю и должен знать, прав ли был в своей попытке свести всю физику к геометрии.

Глава 7

КВАНТОВЫЕ ЗАКОНЫ

Делимость материи

Как всем известно, *атом* (что на греческом значит «неделимый») является детищем Демокрита, который жил и преподавал в Афинах двадцать с лишним веков тому назад. Он считал невероятным, чтобы материальные тела могли бесконечно делиться на все более и более мелкие частицы, и утверждал, что должны существовать предельные частицы, такие маленькие, что их дальнейшее деление невозможно. Демокрит признавал четыре разных вида атомов: атомы камня, воды, воздуха и огня — и верил, что все разнообразие существующих веществ есть результат различных комбинаций этих четырех элементов. Его взгляды, которые были приняты и получили прочный экспериментальный фундамент в начале XIX века благодаря британскому химику Джону Далтону, легли в основу современной химии, хотя теперь мы знаем, что атомы не являются неделимыми и на самом деле имеют довольно сложную внутреннюю структуру. Но идея Демокрита о пределе делимости в наши дни перешла на гораздо более мелкие частицы, которые составляют внутреннюю структуру атомов, и остается надеяться, что электроны, протоны и другие так называемые элементарные частицы, действительно элементарны и неделимы в старом добром демокритовском смысле слова. Но, возможно, это впечатление есть результат нашего сравнительно слабого знакомства с недавно открытыми частицами, и мы совершаем ту же ошибку, что и физики и химики XIX века, считавшие, что делимость материи

ограничивается атомом. И если так случится, что сегодняшние элементарные частицы в будущем окажутся сложными структурами с новыми названиями, придуманными для их частей, то это докажет, что мы не в конце пути, и с годами может быть сделан новый шаг к еще более мелким частицам. Невозможно предсказать развитие науки в будущем, и на вопрос о том, справедлива ли изначальная философская концепция неделимости Демокрита, нельзя ответить эмпирическим способом. Но многие физики, в том числе автор этой книги, почему-то чувствуют себя счастливее от мысли, что в изучении материи «дело идет к концу» и физики будущего узнают о внутренней структуре материи все. И кажется весьма правдоподобным, что элементарные частицы современной физики заслуживают своего названия на все сто процентов, поскольку их свойства и поведение выглядят гораздо проще того, что когда-либо можно было сказать об атомах.

Такой же, как старый добрый атом

К концу XIX века физики обратили внимание на прохождение электричества через газы. Уже много веков было известно, что газы, которые обычно являются довольно хорошими изоляторами, иногда могут быть пробиты высоким электрическим напряжением. Интенсивность разрядов колеблется в широком диапазоне от крохотных искр между дверной ручкой и рукой человека, прошедшего по ковру в обуви на резиновой подошве, до сильнейших молний во время гроз. Но сэр Уильям Крукс, чей вклад в науку отчасти остается в тени из-за его веры в спиритизм и сверхъестественное, показал, что прохождение электричества сквозь газы имеет место и в более мирной форме, если давление газа снижено до маленького значения в 1 атмосфере. Трубки Крукса светились мягким светом, цвет которого зависел от вида газа, и до наших дней они освещают улицы городов, названия отелей, ночных клубов и тысячи других вещей. Когда давление газа в трубке, к которой подведено высокое напряжение, достаточно мало, там виден

четко очерченный луч, идущий от катода к аноду и доходящий до дальнего конца трубки, если лукавый физик уберет с пути луча анод. Попав на стеклянную преграду, загадочный луч, исходящий с пластины катода, заставит ее светиться рассеянным зеленым светом, и любой объект, помещенный на его пути, будет отбрасывать четкую тень. Поместив вблизи трубки магнит, Крукс наблюдал отклонение луча, как было бы в случае электрического тока, или роя отрицательно заряженных частиц, летящих от катода. Примерно в то же время французский физик Жан Перрен обнаружил, что металлическая пластина, помещенная на пути такого луча, приобретает отрицательный электрический заряд. Все это, по-видимому, указывало, что должны были существовать отрицательно заряженные частицы, летящие через разреженный газ очень похожим образом на то, как ионы Фарадея двигались в жидкости в процессе электролиза. Основная разница заключалась в том, что, если в случае электролиза ионам приходилось медленно пробиваться через плотный строй молекул жидкости и они никогда не отступали от своего пути к противоположному электроду, *катодные лучи* (так их называли) в разреженных газах летели прямо и попадали на то, что оказывалось у них на пути.

Эта точка зрения была оспорена немецким физиком Филиппом Ленардом, который выяснил, что катодные лучи могли с легкостью проходить сквозь различные экраны, установленные у них на пути, не оставляя на них дыр, что наверняка сделали бы любые материальные частицы. Это могли сделать только волны, а не потоки материальных частиц, заявил Ленард. Конечно, сегодня, когда мы знаем, какие толстые кирпичные стены необходимо строить вокруг атомного реактора, чтобы его сотрудники избежали лучевой болезни, вызываемой исходящим от него потоком нейтронов, аргументы Ленарда звучат достаточно слабо. Но для того времени они были достаточно сильны.

Задача разрешить экспериментальные противоречия, доказав, что катодные лучи *действительно* являются потоком частиц, и найти физические характеристики этих частиц была поручена Высшим советом прогресса и науки



Рис. 7.1. Лорд Резерфорд (слева) и сэр Дж.Дж. Томсон

уроженцу Манчестера, физику Джозефу Джону Томсону, позднее сэру Джозефу (на рис. 7.1 справа). К тому времени Томсону было 40 лет, и он возглавлял знаменитую лабораторию Кавендиша в Кембридже, одного из крупнейших физических центров того времени.

Предполагая, что катодные лучи состоят из быстро летящих частиц, Томсон решил измерить их массу и электрический заряд. Определенную часть информации об этих величинах давало наблюдавшееся отклонение катодных лучей в магнитном поле (рис. 7.2, в). Это отклонение зависит не только от заряда и массы летящих частиц, но и от их скорости, и, измерив ее, можно получить только значение $(\text{масса} \times \text{скорость})/\text{заряд}$, или в стандартных обозначениях mv/e . Однако из теории следовало, что отклонение, вызванное электрическим полем (рис. 7.2, а), зависит от другой комбинации тех же величин, а именно от результата mv^2/e . Таким образом, измеряя оба отклонения и комбинируя результаты, Томсон смог найти отдельно скорость

v и отношение заряда к массе e/m . В то время как скорость зависела от электрического потенциала, подведенного к трубке, e/m оставалось постоянным и равнялось

$$5,28 \times 10^{17} \text{ статкулон/г.}$$

Хотя то, что e имеет такое же числовое значение, как элементарный электрический заряд, обнаруженный Фарадеем в его опытах с электролизом жидкостей, почти не вызывало сомнений, Томсон провел специальный эксперимент, чтобы измерить это значение для ионов газа. Его метод был основан на открытии другого физика из лаборатории Кавендиша, Ч.Т.Р. Вильсона («Ч.Т.Р. — сияющая звезда!» — поется в кембриджской песенке), который открыл, что, если очищенный от пыли воздух, насыщенный водяным паром, быстро охладить путем расширения, на всех содержащихся в нем ионах образуются крохотные капельки воды*.

При небольшом расширении (ниже 30%) центрами конденсации становятся только отрицательные ионы, тогда как при сильном расширении водяной пар конденсируется и на отрицательных, и на положительных ионах. Схема опыта Томсона показана на рисунке 7.2, с. В нем используется стеклянный цилиндр C с поршнем P и металлический диск D , соединенный с электроскопом. Цилиндр заполняется влажным воздухом через трубку T , подсвеченную рентгеновскими лучами. Когда поршень резко поднимается вверх, создавая расширение воздуха (меньше 30%), в полости цилиндра появляется облако тумана, образованного при конденсации воды на отрицательных ионах. Туман медленно оседает на диске D , и полученный общий электрический заряд ионов измеряется электроскопом. Зная начальное количество воды в цилиндре и средний размер капель тумана, можно подсчитать число полученных капель или, что то же самое, общее число ионов. Поскольку капли были слишком малы, чтобы их увидеть, Томсон решил найти их размер из скорости, с которой они оседают

* Если в воздухе имеется пыль, то первыми паром насытятся частички пыли, и опыт будет испорчен.

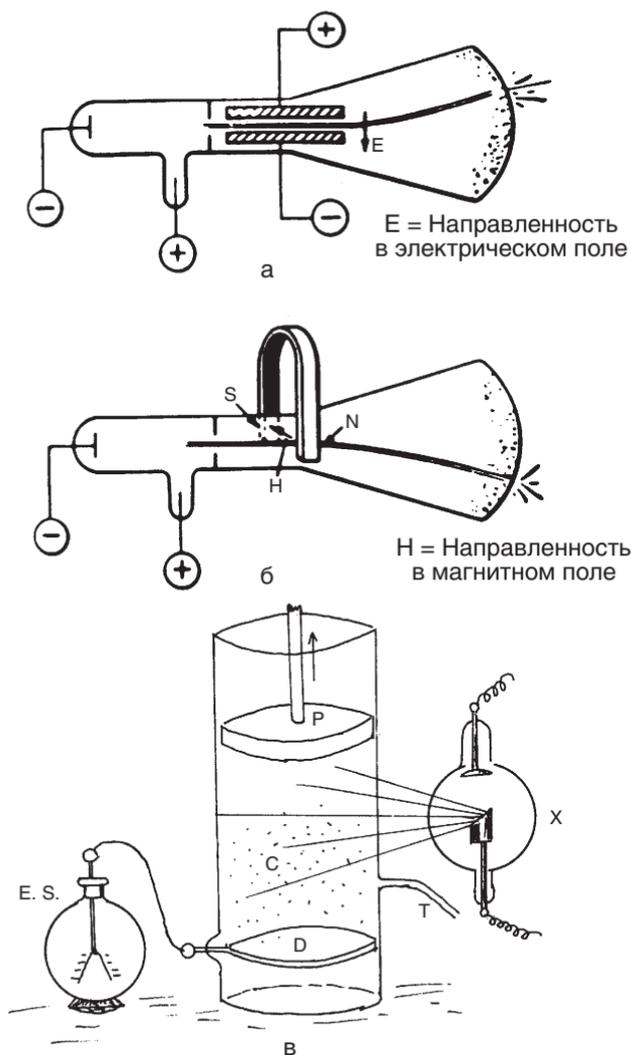


Рис. 7.2. Измерение сэром Дж.Дж. Томсоном массы электрона. Отклонение в электрическом поле позволяет измерить mv^2/e (а). Отклонение в магнитном поле позволяет измерить mv/e (б). Объединяя эти два результата, можно найти m/e (в). Отношение скорости падения капель, создающихся на ионах газа, позволяет измерить e . Зная e/m и e , легко найти m

на диске. Чем меньше капля, тем медленнее она падает вниз, и существует формула, впервые полученная Стоксом, которая дает отношение между скоростью падения, радиусом капли и вязкостью воздуха. Используя этот метод и разделив общий заряд, полученный электроскопом, на количество капель, Томсон нашел, что электрический заряд каждой капли имеет значение $4,77 \times 10^{-10}$ статкулонов, то есть то же значение, как в случае электролиза жидкостей.

Теперь Томсон мог найти значение m из измеренного ранее отношения e/m , и оно оказалось равно $0,9 \times 10^{-20}$ г, то есть она оказалась в 1,840 раза меньше массы атома водорода.

И тут Томсон сделал великое открытие — открыл частицу почти в две тысячи раз легче самого легкого из атомов! Томсон сделал вывод, что, в то время как ионы Фарадея являются атомами, несущими электрические заряды, частицы, образующие катодные лучи, являются чистыми электрическими зарядами как таковыми, которым он дал имя *электроны*. Он представлял себе атом в виде шара из положительно заряженного весомого вещества с множеством крохотных электронов, распределенных по его телу, как черные семена по красной мякоти арбуза. Это было то, что называется статическая модель, то есть предполагалось, что электроны внутри атома находятся в состоянии покоя и располагаются в определенных местах, задаваемых балансом сил электростатического отталкивания между отрицательно заряженными электронами и сил электростатического притяжения между электронами и центром положительно заряженного тела атома. Когда атом становится возбужденным, то есть получает избыточную энергию извне, предполагалось, что электроны, находящиеся внутри, начинают колебаться вокруг своих равновесных позиций, эмитируя электромагнитные (световые) волны различной длины. Были проведены трудоемкие вычисления в попытке связать частоты колебаний различных конфигураций электронов с наблюдаемым линейчатым спектром различных химических элементов, но эта работа оказалась напрасной, и проблема осталась нерешенной до появления модели атома, предложенной Резерфордом.

Загадочные X-лучи

Несколько важных открытий, превративших физику из ее классической формы в современную, были сделаны ближе к концу XIX века практически случайно. Однако в этих открытиях всегда принимали участие ученые, наделенные острым умом, которые были достаточно внимательны, чтобы заметить необычные вещи и продолжить исследования, пока не обнаружатся важные факты. 10 ноября 1895 года немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген (рис. 7.3), проводивший опыты с катодными лучами в трубке Крукса, заметил, что флуоресцентный экран, случайно оказавшийся рядом на столе, начинал ярко светиться, когда по трубке проходил электрический ток. Рентген накрыл трубку листом черной бумаги, но свечение не исчезло. Между тем металлический лист определенно прекращал свечение. Таким образом, это было новое излучение, исходящее от трубки, которое могло с легкостью проходить сквозь материалы, не пропускавшие обычный свет. На первой фотографии, сделанной Рентгеном с помощью вновь открытого излучения, которое он назвал X-лучами, была рука его жены, причем четко просматривалась ее костная структура и обручальное кольцо. Дальнейшие исследования показали, что это проникающее излучение исходило от дальнего конца стеклянной трубки, подвергнутой действию потока катодных лучей. Интенсивность X-лучей можно было заметно усилить, поместив на пути катодного луча пластину из тяжелого металла, называемую антикатодом (рис. 7.3). Эмиссию X-лучей приписали действию быстро движущихся электронов, которые образуют катодные лучи (как помнит читатель, электроны были открыты сэром Дж.Дж. Томсоном двумя годами ранее), падающие на цель, помещенную у них на пути. Будучи внезапно остановленными на своем пути, электроны сбрасывают свою кинетическую энергию в виде очень коротких электромагнитных волн, похожих на звуковые волны, появляющиеся в результате удара пули о пластину брони. Как и в случае с пулей, где результирующий звук содержит все возможные частоты и описывается скорее как шум, чем как музыка. X-лучи представляют



Рис. 7.3. Макс фон Лауэ и Вильгельм Рентген

собой смесь из континуума длин волн. Немцы назвали его *Bremsstrahlung* (*Bremse* означает тормоз, *Strahlung* — радиация).

Поскольку X-лучи не отклонялись в магнитном поле, Рентген с самого начала предположил, что это колебания, похожие на обычный свет. Если так, они демонстрировали бы эффект дифракции, и Рентген потратил годы в попытке доказать это экспериментально, но нужного результата не получил. Через двенадцать лет после его великого открытия Рентгена, который в то время был профессором экспериментальной физики в Мюнхенском университете, пригласил молодой (тридцатитрехлетний) физик-теоретик Макс фон Лауэ из того же университета посмотреть несколько фотографий, которые были только что сделаны ассистентами В. Фридрихом и П. Книппингом. Рентген с первого взгляда понял, что это то, что он искал годами: красивая картина дифракции, произведенная X-лучами,

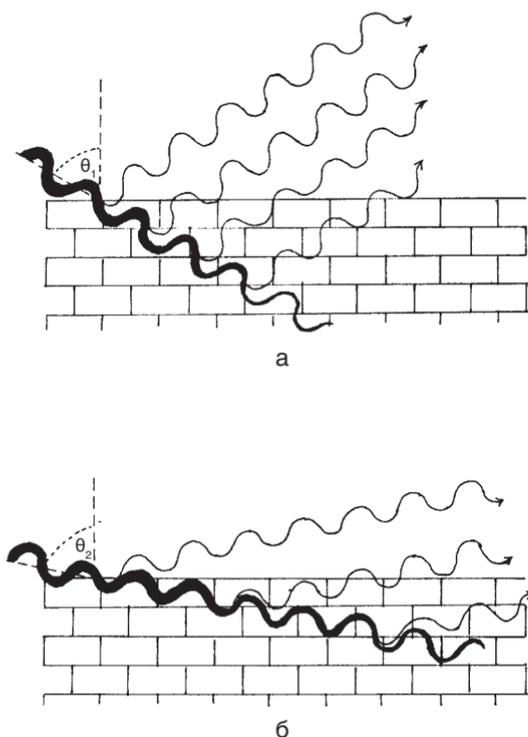


Рис. 7.4. Отражение X-лучей, или волн де Бройля, от поверхности кристалла. В случае (а) волны, отраженные от последовательных слоев кристаллической решетки (условно представленной в виде кирпичей), находятся в противофазе и гасят друг друга. В случае (б) волны находятся в фазе, что приводит к увеличению интенсивности

проходящими через кристалл (вкладка IV, сверху). Фон Лауэ пришел к мысли об использовании кристалла как дифракционной решетки на основании чисто теоретических соображений. Исходя из того, что при использовании обычных оптических решеток X-лучи не демонстрировали никакой дифракции, они должны были иметь гораздо меньшую длину волны. Теперь кристаллическая решетка формировалась обычными слоями атомов или молекул, находящихся на расстоянии около 10^{-8} друг от друга. Когда поток X-лучей падает на поверхность кристалла, он глубоко-

ко проникает в него, частично отражаясь от каждого слоя, через который проходит (рис. 7.4). Если угол падения таков, что отраженные вторичные волны находятся в фазе, интенсивность отраженного потока будет увеличена (*б*). При другом угле, когда отраженные волны в противофазе, следует ждать потемнения (*а*). Как и в случае с оптическими решетками, картину дифракции можно наблюдать как на отраженном, так и на проходящем луче.

Ситуация осложнялась тем, что кристаллы имеют много систем параллельных молекулярных слоев, так что ожидаемая картина выглядит более сложно, чем в случае обычного света. На вкладке IV, *сверху*, показана дифракция X-лучей в сплаве никеля и железа (данные Bell Telephone Laboratories).

Позже было открыто, что помимо непрерывного *Bremstrahlung* X-лучи содержат последовательности четких линий, очень похожих на обычный оптический спектр и возникающих из-за глубокого проникновения электронов вглубь атомов. Большую работу с линейчатым спектром X-лучей провели В. Брэгг (отец) и В.Л. Брэгг (сын), разработавшие точные методы X-лучевой спектроскопии.

Изотопы

В начале XIX века британский химик У. Праут был поражен тем, что атомные массы различных элементов, выраженные в атомных массах водорода, достаточно точно выражаются целыми числами. Это наблюдение привело его к гипотезе, что атомы различных химических элементов являются не чем иным, как агломератами различного числа атомов водорода: гелий = 4 атома водорода; углерод = 12 атомов водорода; кислород = 16 атомов водорода и т. д. Современники Праута не разделяли его взглядов и быстро указали на ряд фактов, противоречащих его гипотезе. Так, например, атомные массы хлора и кадмия оказались равны 35,457 и 112,41 соответственно и находились практически посередине между двумя целыми. Кроме того, для элементов с атомными массами, близкими к целым числам, их значения всегда были несколько меньше, чем ожидалось,

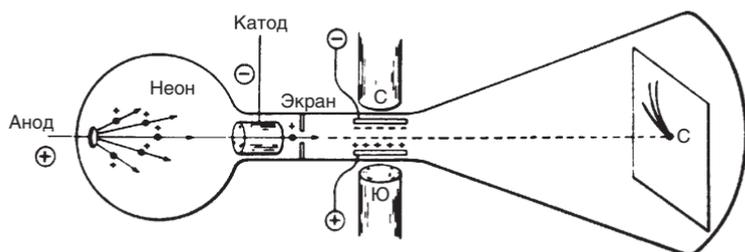


Рис. 7.5. Аппарат Томсона для изучения канальных лучей. Положительные ионы,двигающиеся от анода к катоду, проходят через щели в катодe и после прохождения через экран входят в область электрического и магнитного полей, ориентированных в одном и том же направлении. Поскольку отклонение магнитным полем (в горизонтальном направлении) зависит от скорости частиц, тогда как отклонение в электрическом поле (вертикальное) зависит от квадрата скорости, частицы одинаковой массы, но имеющие разную скорость будут распределяться на экране С по параболе

если бы их атомы состояли из скопления атомов водорода. Поскольку атомная масса водорода равна 1,0080, ее значение для гелия было бы $4 \times 1,0080 = 4,0320$, в то время как на самом деле она равна 4,003, то есть на 0,8% меньше. Аналогично двенадцать атомов водорода, собранные вместе, весили бы $12 \times 1,0080 = 12,096$, тогда как атомная масса углерода — ближайшего к этому химического элемента — всего 12,010. Из-за этих очевидных несоответствий гипотеза Праута была отвергнута и забыта почти на полвека до ее блестящего воскрешения в 1907 году в результате исследований Дж.Дж. Томсона.

Установив существование электрона и измерив его массу и заряд, благодаря отклонению потока электронов в электрическом и магнитном поле, Дж.Дж. обратил свое внимание к частицам, двигавшимся в газоразрядной трубке в противоположном направлении. Пучки этих положительно заряженных частиц получили название канальных лучей, поскольку впервые их наблюдали через узкие щели (каналы) в пластинке катода, позволявшие этим частицам проникать в пространство за катодом. Аппарат, использованный Томсоном для изучения канальных лучей, показан на рис. 7.5. Он основан на том же принципе, который Том-

сон использовал при изучении потоков электронов. Положительно заряженные частицы, образующиеся в газоразрядной трубке между анодом и катодом, проходят через щели (каналы), проделанные в катоде, и попадают в область действия электрического и магнитного полей, ориентированных в одном и том же направлении.

Как говорилось раньше, вертикальное отклонение потока, вызванное электрическим полем, пропорционально $(e/m)v^2$, в то время как горизонтальное отклонение, вызванное магнитным полем, меняется как $(e/m)v$. Таким образом, для частиц с одинаковым отношением заряда к массе, но разными скоростями вертикальное отклонение пропорционально квадрату горизонтального отклонения и кривые, наблюдаемые на флуоресцентном экране S , должны иметь форму параболы.

Именно это и наблюдал Томпсон, но вместо одной параболы (для каждого химического элемента) он видел две и более, что указывало на наличие атомов с другой массой. Например, в случае хлора получается одна парабола для атомов хлора с массой 34,98, а другая для атомов хлора с массой 36,98, причем обе цифры очень близки к целым. Атомы одного и того же элемента, имеющие разные атомные массы, окрестили изотопами, то есть занимающими одно и то же место в таблице Менделеева. Соотношение числа атомов хлора с двумя разными массами (посчитанное по потемнению на фотографической пластинке) оказалось равно 75,4% и 24,6% соответственно. Таким образом, средняя атомная масса составляет $34,98 \times 0,754 + 36,98 \times 0,246 = 35,457$, что в точности совпадает с определенной химически атомной массой хлора. Дальнейшие исследования Ф.В. Астона показали, что то же самое верно и для других химических элементов. Таким образом, например, кадмий состоит из восьми разных типов атомов с массами: 106, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 116, процентное соотношение которых составляет 1,4; 1,0; 12,8; 13,0; 24,2; 12,3; 28,0; 7,3, а средняя масса — 112,41 в полном соответствии с химическими измерениями. Так старая идея Праута снова привлекла к себе внимание.

Но даже после открытия изотопов некоторое несоответствие оставалось, поскольку, например, точная атомная мас-

са двух изотопов хлора была 34,98 и 36,98, вместо 35,280 ($= 35 \times 1,008$) и 37,296 ($37 \times 1,008$). Однако теперь это вызвало не сложности, а удовлетворение, поскольку, согласно закону Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии, комбинация нескольких частиц должна весить несколько меньше количества связывающей их энергии, деленного на c^2 . Таким образом, разница между массой композита атомов и суммарной массой его компонент указывает на энергию, затраченную в процессе его возникновения. Возьмем, например, атом углерода ${}_6\text{C}^{12}$, который состоит из 6 протонов и 6 нейтронов. Точная масса атома водорода составляет 1,008131, а нейтрона — 1,008945. Тогда общая масса должна быть $6 \times 1,008131 + 6 \times 1,008945$. Однако точные измерения массы атома углерода дают значение 12,003882, то есть на 0,098546 единицы меньше. Этот так называемый *дефект массы* должен представлять собой массу энергии, высвобожденной при формировании ядер углерода из нейтронов и протонов. Согласно Эйнштейну, она соответствует энергии $0,0986 \times 1,66 \times 10^{-24} \times 9 \times 10^{20} = 1,48 \times 10^{-4}$ эрг, или 92,5 МэВ.

Модель атома Резерфорда

Эрнест Резерфорд (рис. 7.1) родился в 1871 году вблизи города Нельсон на южном острове Новой Зеландии и, когда он через много лет получил британский титул за свои научные заслуги, стал зваться лорд Резерфорд Нельсон. В возрасте 24 лет он приехал в Кембридж учиться в лаборатории Кавендиша под руководством Дж.Дж. Томсона и после окончания учебы получил место преподавателя в университете Макгилла в Монреале, где сделал свой первый вклад в изучение недавно открытого явления радиоактивности. Позже он переехал в университет Манчестера, а в 1919 году, после ухода Томсона в отставку, стал директором лаборатории Кавендиша. Среди своих коллег он был известен под прозвищем Крокодил, данным ему одним из его любимых студентов, русским физиком Петром Капи-

* $1,66 \times 10^{-24}$ г — это $1/16$ массы атома кислорода.

цей. Нужно заметить, что, если для англичан, которые часто ездят (или, скорее, ездили) в Египет и бывали покусаны или даже съедены крокодилами, это прозвище звучало несколько неуважительно, то для русских, которые никогда не видели крокодилов на их родине, оно является символом несокрушимой силы. Несмотря на то что никто не смел упоминать это прозвище в его присутствии, Резерфорд знал о нем и втайне им гордился, и на стене нового здания, построенного для исследований Капицы в области очень сильных магнитных полей, по причине, которая никогда официально не указывалась, красуется большой барельеф крокодила.

Но давайте вернемся к годам, проведенным Резерфордом в Манчестере. Ему не нравилась «арбузная» модель атома Томсона, и он решил прощупать внутренность атома, обстреливая его новым видом снарядов, которые попали в руки физикам после открытия радиоактивности. В первые годы пребывания в университете Макгилла Резерфорд показал, что так называемые альфа-частицы, излучаемые различными радиоактивными веществами, на самом деле являются потоком положительно заряженных ионов гелия, вылетающих с невероятно большой энергией из нестабильных атомов. Взаимодействуя с заряженными частями атомов, альфа-частицы должны отклоняться от своего первоначального пути, и результирующее рассеяние потока должно нести информацию о распределении электрических зарядов внутри атома. Таким образом, Резерфорд стал направлять потоки альфа-частиц на тонкую фольгу из различных металлов (рис. 7.6) и подсчитывать число частиц, разбросанных в разных направлениях после прохождения через фольгу.

В то время подсчет частиц был трудоемкой процедурой. Если сегодня физик может установить автоматический счетчик Гейгера и отправиться на прогулку или в кино, то Резерфорду приходилось смотреть в микроскоп на флуоресцентный экран, помещенный на пути потока, и подсчитывать на пальцах мерцания, то есть крохотные вспышки, появлявшиеся там, где высокоэнергетическая частица ударялась в экран. Некоторые физики-ядерщики того времени даже принимали белладонну, чтобы расширить зрачки. В резуль-

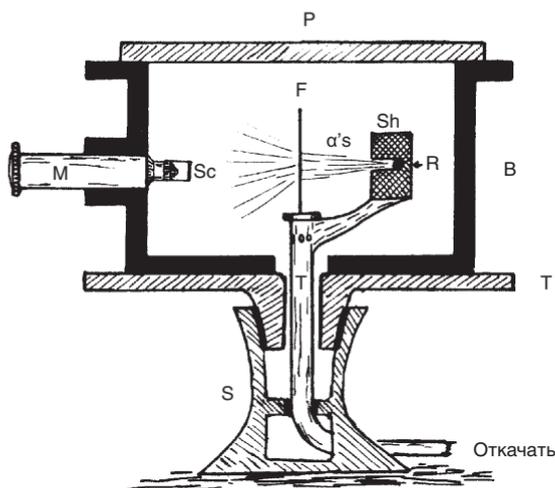


Рис. 7.6. Первый аппарат для изучения разброса альфа-частиц. Вакуумный короб B со съемной верхней пластиной P установлен на вращающийся стол T . Радиоактивный источник R помещен на свинцовый щиток Sh , а фольга для рассеивания F прикреплена к опоре S и неподвижна. Микроскоп M с флуоресцентным экраном Sc прикреплен к коробу и может вращаться вокруг горизонтальной оси

тате этих исследований Резерфорд выяснил, что рассеяние альфа-частиц, проходящих через металлическую фольгу, довольно значительно. Хотя большинство частиц исходного потока сохраняли первоначальное направление движения, некоторые сильно отклонялись, а иные даже были практически отброшены назад. Такой результат совсем не совпадал с тем, что ожидалось от модели Томсона, в которой масса положительного заряда была распределена по всему телу атома почти равномерно. В таком случае взаимодействие между зарядом летящей частицы и внутренним зарядом атома не было бы достаточно сильным, чтобы отклонить альфа-частицу от исходного направления на большой угол, не говоря уже о том, чтобы отбросить ее назад. Единственным возможным объяснением было то, что положительный заряд и масса атома были сконцентрированы в очень маленькой области, практически в точке, расположенной в самом центре атома (рис. 7.7).

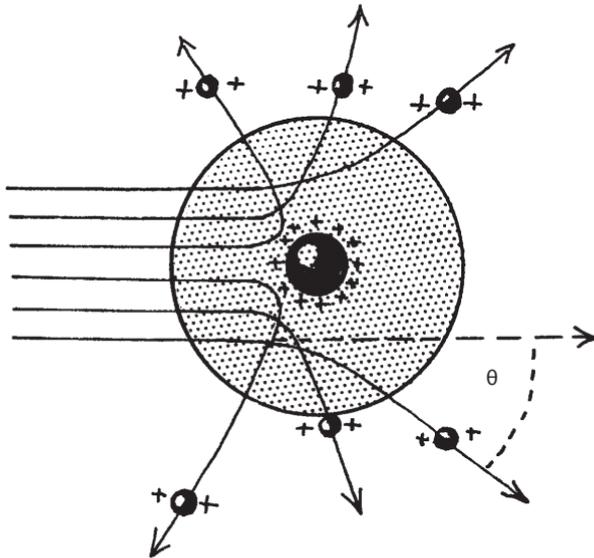


Рис. 7.7. Ядерная модель атома

С целью проверить, соответствует ли это предположение наблюдаемому рассеянию, была получена основанная на законах механики формула для отклонения частиц, проходящих на разных расстояниях от центра отталкивания. Как и многие другие экспериментаторы, Резерфорд не любил математику и, по крайней мере по слухам, эту формулу вывел для него молодой математик Р.Х. Фаулер, который позднее женился на дочери Резерфорда. Согласно формуле Резерфорда, количество альфа-частиц, отклоняющихся от исходного направления на угол θ , должно быть обратно пропорционально четвертой степени $\sin \theta/2$, и этот вывод очень хорошо согласуется с наблюдаемыми кривыми разброса. Таким образом, появилась совершенно новая картина атома с крохотным, но тяжелым центром, который Резерфорд назвал *атомным ядром*, и стайкой электронов, вращающихся вокруг него под действием кулоновского притяжения. Это выглядело похоже на систему планет, вращающихся вокруг Солнца по своим орбитам под действием ньютоновской силы гравитации. Позже, благодаря

работе учеников Резерфорда Х. Гейгера и И. Марседена, было установлено, что положительный заряд атомного ядра или, что то же самое, число вращающихся вокруг него электронов равно порядковому номеру, или *атомному номеру*, этого элемента в периодической таблице Менделеева. Так появилась современная картина структуры атома.

Ультрафиолетовая катастрофа

Теперь мы должны вернуться немного назад, к последней декаде XIX века, когда физика проходила болезненную метаморфозу от классической личинки к современной бабочке. В то время кинетическая теория тепла была хорошо разработанной, благодаря трудам Больцмана, Максвелла и других, и никто не сомневался, что то, что называется теплом, — это результат случайного неравномерного движения бесчисленных молекул, составляющих все материальные тела. В самом простом случае, а именно в газах, где молекулы свободно летают в пространстве, можно вывести простое математическое выражение для распределения скоростей, числа межмолекулярных столкновений и других молекулярных характеристик теплового явления. На этом этапе прославленный британский физик, астроном и популярный писатель сэр Джеймс Джинс решил применить к задаче теплового излучения статистические методы, которые показали себя очень хорошо при изучении теплового движения молекул. В главе 4 мы видели, что горячие тела излучают свет непрерывного спектра, содержащий колебания всех световых частот и длин волны. Мы также видели, что для каждой заданной температуры существует распределение имеющейся энергии между волнами разной длины, соответствующее максимальному изменению концентрации энергии с изменением температуры (рис. 4.13). Джинс спросил себя, будет ли распределение энергии между волнами разной длины в случае теплового излучения подчиняться тем же статистическим законам, что и в случае распределения энергии между молекулами газа. Рассмотрим так называемый «куб Джинса», который представляет

собой контейнер, отделанный «идеальными зеркалами», то есть зеркалами, отражающими 100% падающего на них света. Конечно, каждое реальное зеркало поглощает некоторое количество падающего на него света, но мы говорим о «мысленном эксперименте», похожем на ящик Эйнштейна в релятивистской теории гравитации. Имея такой куб Джинса с маленьким окошком и шторкой на нем, мы можем открыть шторку, впустить внутрь свет от лампы и запереть его внутри, снова закрыв шторку. Поскольку стенки контейнера не могут поглощать свет, он будет отбрасывать бесконечное количество отражений и, если через час или два мы откроем шторку, свет вырвется из контейнера, как газ вырывается из открытого клапана автомобильной шины.

На рисунке 7.8 приведено сравнение между двумя контейнерами, один из которых наполнен молекулами, находящимися в тепловом движении, в другом имеется тепловое излучение с волнами разной длины, которые, отражаясь от зеркальных стенок, распространяются во всех возможных направлениях.

На второй картинке не хватает «столкновений между волнами», при которых между ними происходит обмен энергией. Действительно, базовым свойством волн любого типа, будь то океанские волны, звуковые волны, радио- или световые волны, является то, что, встречаясь, они не влияют друг на друга. Волны, порождаемые носами двух кораблей, плывущих рядом, звуковые волны голосов нескольких людей, находящихся в одной комнате, радиоволны двух радиостанций, вещающих в одном городе, или два световых потока от прожекторов, пересекающиеся в небе, проходят один сквозь другой, как два старых добрых средневековых призрака. Чтобы исключить это несоответствие в аналогии, представим, что внутри куба Джинса находится несколько крохотных частиц угольной пыли, которые могут поглощать некоторое количество энергии волн одной длины и передавать ее волнам другой длины. Мы говорим об угольной пыли условно, поскольку она черная, а как известно, черные тела (вернее, *идеально* черные тела, что соответствует *идеальным* зеркалам куба Джинса) могут по-

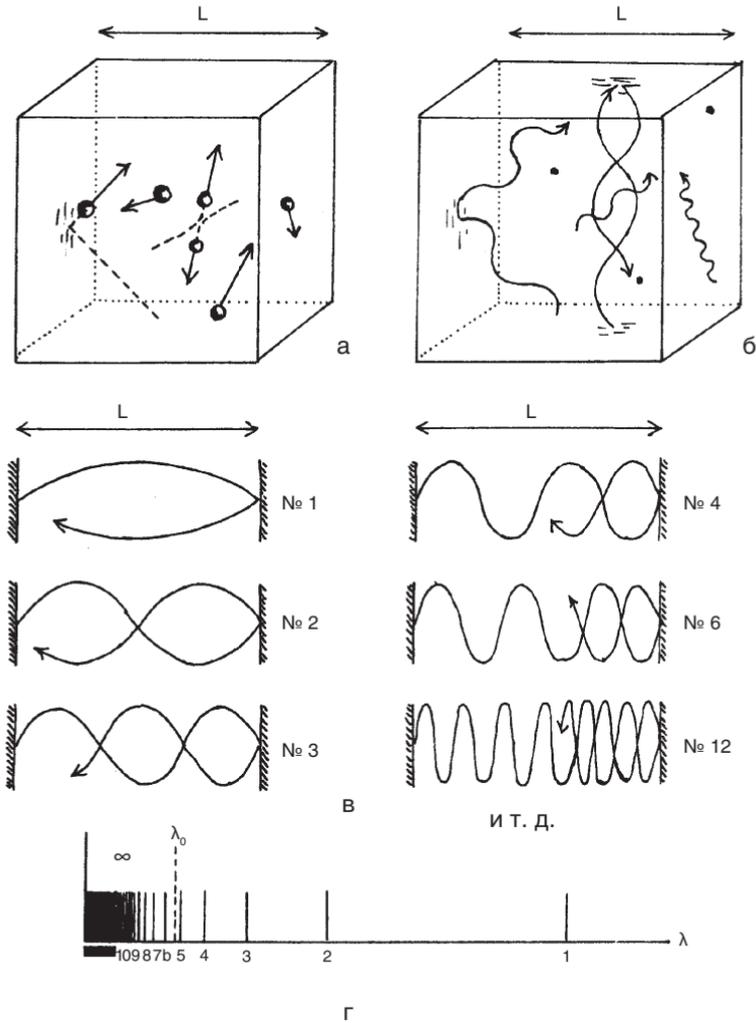


Рис. 7.8. Сравнение между случайным движением молекул газа в замкнутом контейнере (а) и случайным движением волн в кубе Джинса (б). Черными точками на (б) обозначены крохотные частички угольной пыли, служащие для обмена энергией между волнами. На (в) показаны различные виды колебаний в кубе Джинса (для простоты взят одномерный случай), а на (г) — соответствующий им спектр

глощать и испускать излучение с любой длиной волны. Частицы угольной пыли включены в этот эксперимент, просто чтобы сделать возможным обмен энергией между световыми колебаниями с разными длинами волн. Они могут это сделать, не забирая энергию из системы, благодаря своему крошечному размеру и, соответственно, маленькой теплоемкости.

Теперь посмотрим, как имеющаяся энергия будет распределена между различными видами колебаний, которые могут существовать в кубе Джинса. В статистической физике существует одно базовое правило, известное как закон равномерного распределения энергии. Он гласит, что если имеется большое количество систем (таких как отдельные молекулы газа), которые статистически взаимодействуют между собой, то имеющаяся энергия будет в среднем распределена равномерно между ними. Таким образом, если в контейнере имеется всего N молекул газа и их общая энергия равна E , то каждая молекула будет иметь среднюю энергию:

$$\varepsilon = \frac{E}{N}.$$

Этот же простой закон должен быть применим и к совокупности волн, которые могут существовать внутри куба Джинса. Но сколько в нем может быть таких волн? Рассматривая для простоты только волны, идущие горизонтально между правой и левой стенками куба (рис. 7.8, ϑ), мы обнаружим ситуацию, похожую на ту, что возникает со скрипичной струной, закрепленной с двух концов (посмотрите на работу Пифагора, описанную в главе 1). Самой длинной из возможных волн будет волна номер 1 с длиной, равной двойному расстоянию L между стенками. Следующей будет волна номер 2 с длиной L , или, что то же самое, $2L/2$. Еще более короткими будут волны $2L/3$, $2L/4$ (или $L/2$), $2L/5$, $2L/6$ (или $L/3$), . . . $2L/100$, $2L/101$, . . . $2L/1\ 000\ 000$. . . Нижнего предела возможной длины волны при электромагнитных колебаниях не существует, и, продолжая приведенную последовательность, мы перейдем от видимого света к ультрафиолету, X-лучам, гамма-лучам

и т. д. Таким образом, количество возможных колебаний бесконечно, и, обобщая этот аргумент на случай волн, распространяющихся в трех измерениях, мы получаем такой же результат. Теперь, следуя классическому закону равномерного распределения и поделив имеющуюся энергию — не важно, насколько она велика, — среди возможных волн, получаем:

$$\xi = \frac{E}{\infty} = 0.$$

Физически это означает следующее. Если с помощью вертикальной прямой λ_0 разделить все возможные волны, показанные на рисунке 7.8, z , на две группы, то справа от λ_0 всегда будет конечное число возможных колебаний, а между λ_0 и нулевой точкой — бесконечное число. Принцип равномерности требует, чтобы вся имеющаяся энергия досталась волнам длиной волны меньше λ_0 , какой бы маленькой ни была λ_0 . Следовательно, если наполнить куб Джинса красным светом, то этот свет начнет превращаться (благодаря абсорбции и повторному излучению частицами угольной пыли) в ультрафиолетовые лучи, X-лучи, гамма-лучи и т. д. То, что верно для гипотетического куба Джинса, должно быть верно и в общем случае, и, открыв дверцу кухонной духовки или заслонку топки локомотива, мы будем поражены смертельным коротковолновым излучением и тут же умрем на месте. Очевидно, что этот вывод абсурден, но он следует из применения к лучистой энергии фундаментальных законов классической физики.

В течение нескольких лет после публикации статьи Джинса ни сам Джинс, ни кто-либо другой не знал, как объяснить этот парадоксальный результат. Затем, в последнюю неделю последнего года XIX века, немецкий физик Макс Планк (рис. 7.9) вышел к доске на рождественском собрании Германского физического общества и сделал экстраординарное предположение.

Его идея состояла в том, что свет и все другие виды электромагнитного излучения, которые всегда считались непрерывным шлейфом волн, на самом деле состоят из отдельных порций энергии с точно заданным количеством



Рис. 7.9. Нильс Бор, Макс Планк и квантовый переход в атоме водорода

энергии в каждой. Количество энергии на порцию зависит от частоты ее колебаний ν и прямо пропорционально ей, так что можно написать:

$$\mathcal{E} = h\nu,$$

где h — это универсальная константа. Планк назвал эти порции энергии *квантами света* (или в более общем виде *квантами излучения*), а константа h получила название *квантовой постоянной**.

* Также носит название постоянная Планка.

Теперь посмотрим, как эта революционная идея Планка ликвидировала опасность ультрафиолетовой катастрофы Джинса. Для того чтобы дать читателю представление о том, как это было сделано, рассмотрим случай человека, который умер, оставив наследство, скажем, 600 долларов. У него не было наследников, но было пять кредиторов: хозяин бара, мясник, аптекарь, бакалейщик и портной, каждый из которых хотел вернуть свои деньги, тем более что общая сумма долгов была существенно больше имевшихся денег. Простым решением было бы использовать «закон равномерного распределения» и дать каждому по 100 долларов. Но дело осложнялось тем, что каждый из кредиторов хотел получить все свои деньги или ничего. Хозяин бара хотел забрать все свои 600 долларов, мясник и аптекарь требовали по 300, бакалейщик 200, а портной — 100 долларов. Поскольку денег на оплату всех этих долгов не хватало, судья обратился к тому, что у юристов называется «правом справедливости», то есть к решению на основании здравого смысла. Очевидно, было бы неразумно отдать все 600 долларов хозяину бара и совсем лишить остальных кредиторов каких-либо денег. Более разумным решением было бы потратить больше денег, чтобы удовлетворить кредиторов с меньшими запросами, и отказать тем, кто просит много. Так, например, портному можно дать 100 долларов, бакалейщику 200, 300 — мяснику или аптекарю (бросив монетку) и ничего не давать хозяину бара. (Здесь можно заметить, что в действительности этот принцип распределения используется Национальным фондом науки, у которого очень мало денег, но он пытается распределить их по справедливости между различными соискателями.) Сомнительно, что право справедливости дает общее решение проблем такого рода, но статистическая физика дает. Как только гипотеза Планка относительно минимального количества энергии в световом кванте волн различной длины была обнаружена, в дело вступили точные законы математической статистики, полностью лишив многие коротковолновые колебания какой-либо энергии из-за их слишком высоких притязаний. Как результат, для распределения энергии теплового излучения получилась формула, в которой большая часть энергии приходится на долю

волн средней длины, тогда как высокочастотным коротковолновым колебаниям остается очень мало или совсем ничего. Формула, выведенная Планком на основании гипотезы светового кванта, оказалась идеально согласующейся со всеми известными законами теплового излучения. Вместе с тем внедрение идеи индивидуальной порции энергии в классическую картину распространения световых волн произвело идейную революцию, сравнимую только с той, которая произошла в результате эксперимента Майкельсона—Морли.

Реальность светового кванта

В то время как первоначально предложенное Планком понятие порций лучистой энергии было несколько расплывчатым и годилось только как основа для статистического распределения энергии между различными длинами волн в спектре, пять лет спустя оно обрело более четкую форму в руках Альберта Эйнштейна. В одной из трех статей, опубликованных им в 1905 году, Эйнштейн применил идею светового кванта для объяснения так называемого «фотоэлектрического эффекта». Какое-то время уже было известно, что свет (в особенности ультрафиолетовые лучи), падающий на металлические поверхности, сообщает им положительный электрический заряд. После открытия электронов было доказано, что это происходит благодаря выбросу электронов с освещенных поверхностей.

На рисунке 7.10 показано стандартное оборудование для изучения фотоэлектрического эффекта. Свет от электрической дуги A (который содержит много ультрафиолетовых лучей) проходит через систему из двух кварцевых линз и призмы (монокроматор), разделяющую волны различной длины. Выбранный поток (который можно менять, поворачивая призму) входит через кварцевое окно W в вакуумную трубку T , проходит через дырку в нижней части медного цилиндра C и падает на металлическую пластину Pl , которая может быть сделана из разных материалов. Переменный электрический потенциал между пластиной и ци-

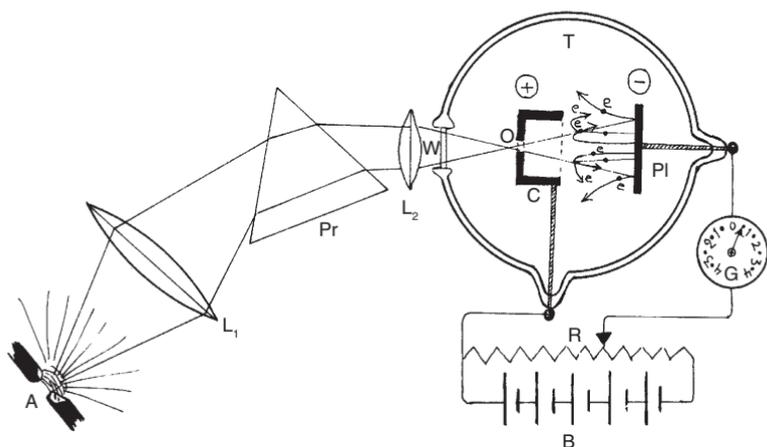


Рис. 7.10. Оборудование для изучения фотоэлектрического эффекта. Фотоэлектроны, вылетающие с пластины $P1$ в сторону цилиндра C , останавливаются электрическим полем, если разница потенциалов между $P1$ и C достаточно велика

линдром замедляет движение излучаемых фотоэлектронов. (Батарея B и переменное сопротивление R создают электрическое напряжение, а гальванометр G замеряет ток.) Когда приложенный электрический потенциал, умноженный на заряд электрона, становится равным его кинетической энергии, ток в цепи останавливается. Таким образом, меняя интенсивность и длину волны падающего света и замеряя потенциал, при котором ток останавливается, можно найти отношение между интенсивностью, частотой колебаний света и скоростью фотоэлектронов. Результатом экспериментальных исследований фотоэлектрического эффекта стало открытие двух законов:

1. При заданной частоте и интенсивности света энергия испускаемых фотоэлектронов не меняется, но их число возрастает прямо пропорционально интенсивности света.

2. Когда частота падающего света меняется (возрастает), электроны не испускаются, пока не будет достигнута определенная пороговая частота (зависящая от металла). При более высоких частотах энергия фотоэлектронов возрастает прямо пропорционально разнице используемой и пороговой частот.

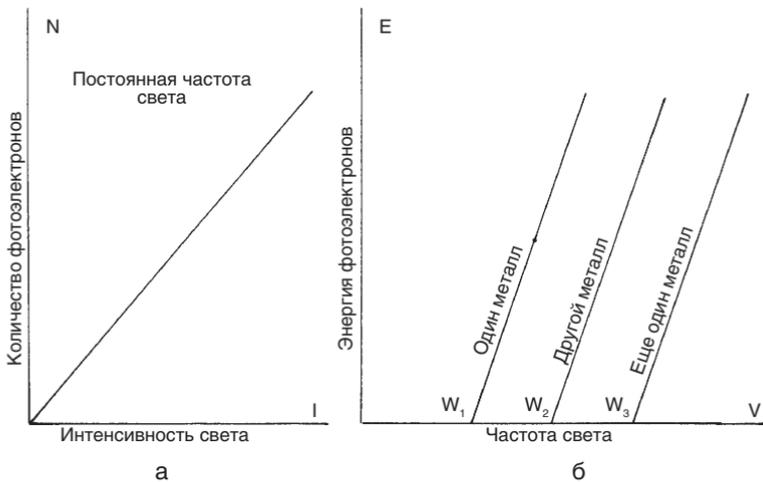


Рис. 7.11. Законы фотоэлектрического эффекта, полученные экспериментальным путем. Зависимость количества фотоэлектронов от интенсивности света (а). Зависимость энергии фотоэлектронов от частоты света (б)

Эти два закона показаны графически на рис. 7.11. Однако эти очень простые законы совсем не соответствовали прогнозам электромагнитной теории света. Согласно этой теории возрастание *интенсивности* света означало бы возрастание колебательной электрической силы в волне. Действуя на электроны вблизи поверхности металла (это те электроны, которые несут электрический ток по металлическим проводам), эта электрическая сила должна была бы выталкивать их с большей кинетической энергией. Но эксперимент показал, что, даже если интенсивность света была повышена в сто раз, фотоэлектроны вылетали с той же скоростью.

Между тем кривая на рис. 7.11 совершенно определенно показывает взаимосвязь скорости (или кинетической энергии) электронов и *частоты* падающего света — взаимосвязь, для которой в классической теории света, похоже, нет никаких причин.

Однако, используя идею световых квантов, несущих определенное количество энергии, пропорциональное их

частоте, мы получаем совершенно естественное объяснение этих двух эмпирических законов. Когда падающий световой квант достигает поверхности металла и взаимодействует с одним из электронов, он должен передать этому электрону всю свою энергию, поскольку порция энергии не может быть меньше, чем у одного кванта. Увеличение интенсивности падающего света означает больше световых квантов одинаковой частоты и, следовательно, пропорционально больше электронов с той же кинетической энергией. Когда возрастает частота падающего света, ситуация другая. Теперь каждый световой квант несет больше энергии и, передавая ее электрону, заставляет его вылетать из металлической пластины с большей скоростью. Проходя сквозь поверхность металла, электрон теряет определенное количество энергии, полученной от светового кванта. Это количество энергии зависит от природы металла и известно под названием «работа выхода». Таким образом, энергия фотоэлектрона выражается очень простой формулой:

$$E = h\nu - W,$$

где W — работа выхода для данного металла. До тех пор, пока $h\nu < W$ (или $E < 0$), электроны получают от светового кванта недостаточно энергии, чтобы пройти сквозь поверхность, и ничего не происходит. Как только $h\nu$ становится больше, чем W , начинается эмиссия фотоэлектронов, и энергия электронов растет линейно с ростом ν . Наклон прямой на рисунке 7.11, *б* должен быть равен квантовой постоянной h , и он действительно равен ей! Таким образом, Эйнштейн одним махом объяснил загадочные законы фотоэлектрического эффекта и оказал решительную поддержку изначальной идее Планка в отношении порций лучистой энергии.

Такую же решительную поддержку гипотезе светового кванта, которая к тому времени уже почти заслужила название теории, оказала работа американского физика Артура Комптона, поклонника гавайской гитары, чемпиона по теннису и крупного исследователя природы космических лучей. Эти исследования принесли ему славу самого сильного человека во всей Мексике. По словам самого Комптона, это произошло при следующих обстоятельствах. Изучая

изменения интенсивности космических лучей от полюса до экватора, Комптон должен был измерять эту интенсивность где-то в южной части Мексики. Место для измерений должно было находиться где-нибудь за пределами городов, чтобы избежать возмущений от линий электропередачи, транспорта и т. д., но непременно там, где есть достаточно хороший источник электрического тока. Решением стал католический монастырь, расположенный на некотором расстоянии от города Мехико, спокойное место со своей силовой станцией, аккумуляторными батареями и аббатом, пожелавшим ускорить прогресс науки. Комптон прибыл на ближайшую к монастырю железнодорожную станцию с двенадцатью ящиками научного оборудования, которые представляли собой аккуратные деревянные ящики размером со средний чемодан, снабженные металлическими ручками для переноски. В двух ящиках лежали электрометры — черные металлические шары с маленькими окошками, через которые можно наблюдать нить накаливания, регистрирующую электрический заряд. В остальных ящиках лежали свинцовые брикеты для защиты от излучения.

Как хорошо известно всем, кто бывал в Мексике, по прибытии на станцию пассажиров мгновенно окружает толпа босоногих мужчин и мальчишек, вырывающих у вас из рук чемодан с криками: «Вам поднести чемодан, сеньор?» В данном случае Комптон взял два ящика с электрометрами и кивком предложил мексиканцам взять остальное. Образовалась процессия: почтенный американец, легко шагающий по платформе с двумя ящиками в руках, и вереница мексиканцев, сгибающихся под тяжестью ящиков, каждый из которых они несли вдвоем. Но это не конец истории. Когда грузовик с Комптоном и его оборудованием подъехал к воротам монастыря, его остановили два мексиканских солдата, пожелавшие осмотреть багаж. Дело в том, что в то время правительство Мексики ввязалось в большой конфликт с католической церковью, и вокруг всех католических учреждений был выставлен караул. Открыв ящики, солдаты обнаружили «четыре черные бомбы и много свинца», вероятно предназначенного для изготовления пуль. Комптон был арестован, и ему пришлось ждать не-

сколько часов в местном полицейском участке, прежде чем с помощью междугородного звонка в американское посольство в Мехико дело удалось уладить. Интенсивность космических лучей в этом монастыре оказалась именно такой, как ожидалось.

Но вернемся к результатам Комптона. Как искусственному экспериментатору, Комптону нравилось представлять столкновения между световыми квантами и электронами похожими на столкновения костяных шаров на бильярдном столе, за исключением того, что, в то время как все бильярдные шары абсолютно одинаковы (не считая цвета), световые кванты и электроны следовало считать шарами с разными массами. Он утверждал, что, хотя электроны, составляющие планетарную систему атома, привязаны к центральному ядру силами электрического притяжения, эти электроны будут вести себя так, словно они совершенно свободны, если попавший на них световой квант несет достаточно большое количество энергии. Предположим, что черный шар (электрон), лежащий на бильярдном столе, привязан нитью к гвоздю, вбитому в стол, и что игрок, который не видит нити, пытается забить его в угловую лузу, ударяя по нему белым шаром (световым квантом). Если игрок посылает свой шар со сравнительно малой скоростью, нить удерживает черный шар, и из его попытки ничего не выходит. Если белый шар движется быстрее, нить может порваться, но за счет этого удар вызывает возмущение и черный шар отправится в совершенно неверном направлении. Однако если кинетическая энергия белого шара во много раз больше силы, с которой нить удерживает шар, она уже не играет практически никакой роли и столкновение шаров происходит, как если бы черный шар двигался совершенно свободно.

Комптон знал, что энергия связи электронов в атоме сравнима с энергией кванта видимого света. Поэтому, чтобы придать удару непреодолимую силу, он решил использовать в своих опытах богатые энергией высокочастотные X-лучи. Результат столкновения кванта X-луча и (практически) свободных электронов можно было трактовать в значительной мере как столкновение двух бильярдных шаров. В случае столкновения почти лоб в лоб шар, находив-

шийся в состоянии покоя (электрон), будет с большой скоростью отброшен в направлении удара, тогда как исходный шар (квант X-луча) потеряет значительную часть своей энергии. В случае бокового удара исходный шар (квант X-луча) потеряет меньше энергии и меньше отклонится от своего первоначального направления. В случае легкого касания исходный шар проследует дальше практически без отклонения и потеряет малую часть первоначальной энергии. Говоря языком световых квантов, такое поведение означает, что в процессе разброса *кванты X-лучей, отклонившиеся на большие углы, будут иметь меньшее количество энергии и большую длину волны*. Опыты, проведенные Комптоном, во всех подробностях соответствовали теоретическим ожиданиям и, таким образом, подтвердили гипотезу квантовой природы лучистой энергии.

Атом Бора

В 1911 году в Манчестер приехал молодой (двадцатипятилетний) датский физик по имени Нильс Бор (рис. 7.9), который во время учебы в Копенгагене применил свой опыт общенационально известного футболиста к задаче «проталкивания» альфа-частиц через скопление атомов, пытающихся схватить и остановить их. В это время Резерфорд как раз проводил свои эпохальные опыты, которые привели к открытию атомного ядра. Бору понравились идеи Резерфорда, и Резерфорд сказал своему другу: «Этот молодой датчанин — самый умный парень из всех, кого я когда-либо встречал». Так они стали друзьями и навсегда остались товарищами по оружию.

Описать Нильса Бора человеку, который никогда с ним не работал, практически невозможно. Вероятно, его самой характерной чертой была медлительность мысли и восприятия. Когда в конце двадцатых — начале тридцатых автор этой книги был одним из «мальчиков Бора» и работал в его институте в Копенгагене, получая стипендию от Карлсберга (лучшего пива в мире!), он имел массу возможностей наблюдать это. Вечерами, когда горстка аспирантов Бора «ра-

ботала» в институте Paa Blegdamsvejen, обсуждая новейшие задачи квантовой теории, или играла в пинг-понг на столе в библиотеке, поставив на него кофейные чашки, чтобы усложнить игру, появлялся Бор с жалобами на то, что очень устал и хотел бы «чем-нибудь заняться». «Чем-нибудь заняться» неизбежно означало пойти в кино, а единственными фильмами, нравившимися Бору, были те, что назывались «Стрельба на ранчо Джи» или «Одинокий рейнджер и девушка Сиу». Но ходить с Бором в кино было тяжело. Он не мог уследить за сюжетом и, к большому раздражению остальных зрителей, постоянно задавал нам вопросы типа: «Это сестра того ковбоя, который застрелил индейца, пытавшегося украсть стадо коров, принадлежавшее ее шурину?»

Такая же замедленная реакция наблюдалась и на научных собраниях. Сколько раз очередной вновь прибывший молодой физик (большинство физиков, приезжавших в Копенгаген, были молодыми) произносил блестящую речь о своих последних расчетах в решении какой-нибудь сложной задачи квантовой теории. В аудитории все понимали его абсолютно ясно, но только не Бор. Поэтому все начинали объяснять ему простые вещи, которые он упустил, и в результате возникшей суматохи уже никто ничего не понимал. В конце концов, через какое-то время Бор сам начинал объяснять, и оказывалось, что в задаче, изложенной визитером, Бор понял совершенно не то, что имел в виду визитер. И он был прав, а интерпретация визитера была ошибочной.

Пристрастие Бора к вестернам вылилось в появление теории, не известной никому, кроме его тогдашних товарищей по посещению кинотеатров. Всем известно, что во всех вестернах (по крайней мере, голливудских) негодяй всегда достает оружие первым, но герой оказывается быстрее и убивает негодяя. Нильс Бор приписывал этот феномен разнице между умышленным и спонтанным действием. Негодяй должен решить, когда хвататься за оружие, что замедляет его действия, тогда как герой действует быстрее, поскольку ни о чем не думает, когда видит, что негодяй тянется к оружию. Мы все были не согласны с этой теорией, и на следующее утро автор этой книги пошел в магазин игрушек купить пару ковбойских ружей. Мы стали

стреляться с Бором, изображая негодяев, а он героя, и он уложил нас всех.

Другим примером медлительности Бора была его неспособность быстро решать кроссворды. Однажды вечером автор этой книги приехал в загородный дом Бора на севере Ютландии, где Бор со своим ассистентом Леоном Розенфельдом (из Бельгии) весь день трудился над важной статьей, касавшейся неопределенности отношений (см. дальше) для электромагнитного поля. Оба, и Бор, и Розенфельд, очень устали от этой работы, и после обеда Бор предложил «для расслабления» решить кроссворд из одного британского журнала. Дело двигалось не туго, и примерно через час фру Бор предложила всем пойти спать. Где-то посреди ночи нас с Розенфельдом, который спал со мной в одной гостевой комнате наверху, разбудил стук в дверь. Мы вскочили в темноте с криками: «Что? Что случилось?» Из-за двери раздался приглушенный голос: «Это я, Бор. Я не хотел вас беспокоить, просто хотел сказать, что английский промышленный город из семи букв, кончающийся на „ич“, это Ипсвич!»

«Я не хотел... но...» было излюбленным выражением Бора, и он много раз приходил с раскрытым журналом в руке и говорил: «Я не хотел критиковать, но мне просто хочется понять, как человек может писать такую чушь!»

Еще одна реальная история про Бора, прежде чем мы перейдем к его теории атома. Однажды поздно вечером (примерно в 11 часов по копенгагенскому времени) автор возвращался с Бором, фру Бор и датским физиком Касом Казимиром с обеда, который давал один из членов боровского института. Кас был опытным скалолазом (по-немецки «Fasadenklaterer»), и его часто можно было видеть в библиотеке под самым потолком с книгой в руке и ногами, упирающимися в верхние полки. Мы шли по пустым улицам и проходили мимо здания банка. Фасад банка был сделан из больших цементных блоков, между которыми имелось то, что альпинисты назвали бы опорой для ног. Они привлекли внимание Казимира, и он поднялся на несколько этажей вверх. Когда он спустился, Бору захотелось повторить его подвиг. Он стал медленно подниматься вверх

по стене банка. Мы с Казамиром и фру Бор стояли внизу и с некоторой тревогой следили за его медленным продвижением по стене. В этот момент к нам сзади быстро подошли два копенгагенских полисмена, готовые принять меры. Они посмотрели на Бора, висевшего между первым и вторым этажом, и один из них сказал: «О, это всего лишь профессор Бор!» — и, совершенно успокоившись, оба стража порядка тихо удалились.

После этих предварительных замечаний давайте поговорим о теории атома Нильса Бора, опубликованной в 1913 году и основанной на открытии Резерфорда, то есть на том, что атом состоит из тяжелого заряженного ядра и стайки электронов, вращающихся вокруг него наподобие крохотной планетной системы. Первая трудность, с которой столкнулся Бор, состояла в том, что атомы не могли существовать дольше ничтожной доли секунды. Действительно, электрон, несущийся по орбите, является эквивалентом электрического генератора и должен излучать электромагнитные волны, быстро теряя свою энергию. Легко рассчитать, что, как следствие, электроны в атоме должны двигаться по спирали и падать на ядро в течение одной стомиллионной доли секунды. Но атомы определенно этого не делают, поскольку имеют вполне стабильную конфигурацию. Ситуация казалась такой же парадоксальной, как ультрафиолетовая катастрофа Джинса, и Бору было очевидно, что решение нужно искать в том же направлении. Если лучистая энергия может существовать только в определенных минимальных количествах или количествах, кратных им, то почему бы не сделать такое же предположение относительно механической энергии электронов, окружающих ядро? В этом случае движение электронов при нормальном состоянии атома соответствовало бы этим минимальным количествам энергии, тогда как в возбужденном состоянии оно соответствовало бы большему количеству этих квантов механической энергии. Таким образом, механизм атома должен вести себя, как автомобильная коробка передач, которую можно установить на первую, вторую или максимальную скорость, но не между ними. Если движение электронов атома, как и излучаемый свет, состоит из квантов, то переход электрона в атоме от

более высокого квантового уровня к более низкому должен сопровождаться излучением светового кванта с $h\nu$, равной разнице энергий между двумя уровнями. И обратно, если $h\nu$ падающего светового кванта равна разнице энергий спокойного и возбужденного состояния данного атома, то световой квант будет поглощен и электрон перейдет с более низкого уровня на более высокий. Такие процессы обмена энергией между материей и излучением схематично показаны на рис. 7.12, который позволяет сделать очень важный вывод. Если при переходе электрона от энергетического состояния E_3 к состоянию E_2 происходит излучение светового кванта с энергией $h\nu_{32}$, и если переход от E_2 к E_1 приводит к эмиссии светового кванта с энергией $h\nu_{21}$, то мы могли бы наблюдать, по крайней мере в некоторых случаях, световой квант с энергией $h\nu_{32} + h\nu_{21} = h(\nu_{32} + \nu_{21})$, соответствующей переходу от E_3 непосредственно к E_1 . Аналогично эмиссия светового кванта с энергиями $h\nu_{31}$ и $h\nu_{32}$ привела бы нас к мысли о возможности излучения света со световым квантом $h\nu_{31} - h\nu_{32} = h(\nu_{31} - \nu_{32})$. Отбросив h , можно сказать, что если в спектре атома наблюдается эмиссия света с двумя заданными частотами, то можно ожидать появления их суммы и разности. Но это в точности то, что называется «комбинационным принципом Ридберга», открытым эмпирически немецким спектроскопистом Ридбергом задолго до появления квантовой теории.

Все описанные выше факты не оставляли никаких сомнений в том, что фундаментальная концепция Бора о квантовании механической энергии электрона верна, и осталось только найти правила этого квантования. Чтобы это сделать, Бор взял самый простой из атомов — атом водорода, который, как было сказано ранее, состоит из одного электрона, вращающегося вокруг ядра, несущего единичный положительный заряд, или протона, как мы его теперь называем. Видимый спектр водорода состоит из четырех линий: одной красной, одной синей и двух фиолетовых, хотя изучение ультрафиолета открыло большое число линий с более короткой длиной волны. Этот спектр изображен на вкладке II, где спектральные линии расположены по возрастанию частоты колебаний. Такая после-

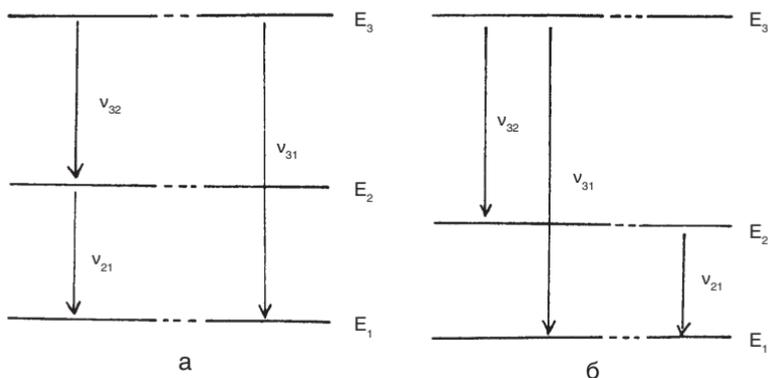


Рис. 7.12. Иллюстрация принципа Ридберга. Если электрон может перепрыгнуть с энергетического уровня E_3 на уровень E_2 , излучая частоту ν_{32} , а потом перепрыгивает с E_2 на E_1 , излучая частоту ν_{21} , то должна существовать возможность прямого перехода с E_3 на E_1 с излучением частоты $\nu_{31} = \nu_{32} + \nu_{21}$ (а). Если электрон может перепрыгнуть с E_3 и на E_2 , излучая частоту ν_{32} , и на E_1 , излучая частоту ν_{31} , то должна существовать возможность перехода с E_2 на E_1 с излучением частоты $\nu_{21} = \nu_{31} - \nu_{32}$ (б)

довательность линий, которая становится все более и более плотной и приближается к определенному пределу со стороны высоких частот, в спектроскопии называется *спектральной серией*, и спектральная серия водорода является наиболее типичной и равномерной. В 1885 году школьный учитель из Германии И.Я. Бальмер открыл, что линии в спектре водорода (теперь известные как серия Бальмера) можно выразить очень простой формулой:

$$\nu = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где R — числовая константа, а n принимает значения 3, 4, 5, 6 и т. д. (очевидно, что n не может быть равна 1 или 2, поскольку в этом случае ν была бы отрицательной или равной нулю). Умножая эту формулу на h , чтобы получить слева энергию излучаемого светового кванта, мы получаем:

$$h\nu = Rh \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right),$$

что, согласно хорошо известному арифметическому правилу, можно переписать как:

$$h\nu = Rh\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right).$$

Из сказанного выше следует, что $-Rh/n^2$ должно представлять уровни энергии электрона в атоме водорода, переход между которыми ведет к появлению линий Бальмера. Мы пишем «минус», поскольку орбитальная энергия электронов в атоме отрицательна. Это означает просто, что их кинетическая энергия меньше, чем их потенциальная энергия в электрическом поле, поэтому они не могут выйти наружу. Какой тип движения вокруг ядра соответствует этим значениям энергии?

Самый простой способ ответить на этот вопрос — это вспомнить, что потенциальная энергия кулоновских сил меняется обратно пропорционально расстоянию от центра. Поскольку условия в формуле Бальмера меняются обратно пропорционально квадратам целого числа n , мы делаем вывод, что радиус последовательных орбит электрона должен возрастать как n^2 . Для случая круговых орбит, которые Бор рассмотрел первыми, относительные размеры показаны на рис. 7.13. Переход электрона на вторую орбиту с орбит, расположенных за ее пределами, соответствует линиям серии Бальмера, но что насчет других возможностей? Переход с орбит с номерами 2, 3, 4 и т. д. на первую орбиту должен порождать серию линий, похожих на серию Бальмера, но находящихся дальше в ультрафиолетовой части спектра. Вместе с тем переход с более высоких орбит на орбиту 3 должен давать серию в инфракрасной части. Обе серии были открыты спектроскопистами Теодором Лиманом и Фридрихом Пашеном, а их опыты стали серьезной поддержкой теории Бора о прыгающем электроны.

Зная, что радиусы квантовых орбит (в предположении, что они круговые) возрастают, как квадраты целых чисел, Бор смог найти, какое количество механической энергии «квантуется», то есть возрастает на одинаковое количество при переходе с одной орбиты на другую. Оказалось, что это результат умножения механического импульса электрона на длину его орбиты — величина, которая в классической механике назы-

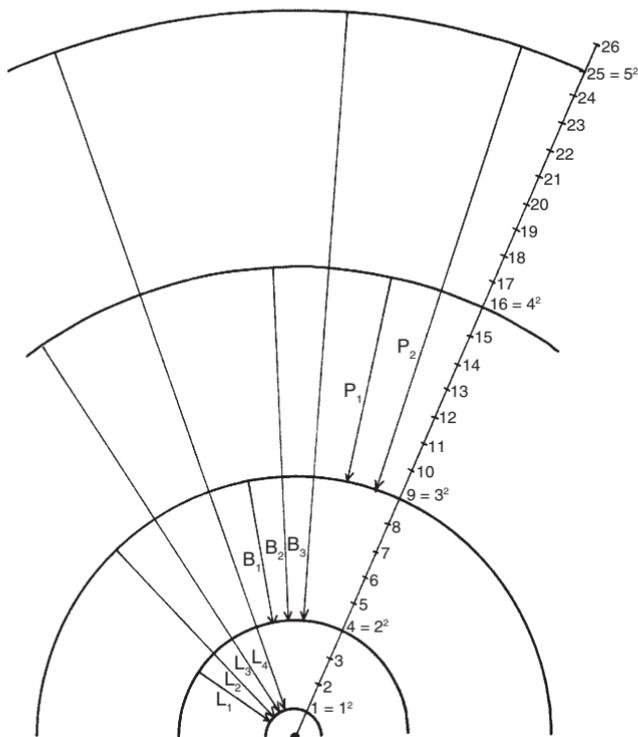


Рис. 7.13. Первые четыре круговые орбиты в боровской модели атома водорода с радиусами, возрастающими, как квадраты целых чисел. Переходы $L_1, L_2, L_3, L_4, \dots$ на первую орбиту порождают линии из серии Лимана. Переходы B_1, B_2, B_3, \dots и P_1, P_2, \dots на вторую и третью орбиты дают линии серий Бальмера и Пашена

вается действием. Изменение действия от одной квантовой орбиты к другой оказалось в точности равным постоянной h , использованной Планком в его теории теплового излучения и Эйнштейном в его объяснении фотоэлектрического эффекта.

Вскоре стало ясно, что исходную модель Бора с круговыми концентрическими квантовыми орбитами нужно обобщить, добавив квантованные эллипсы. Это обобщение было сделано немецким физиком Арнольдом Зоммерфельдом. На рисунке 7.14 показан полный набор возможных квантовых орбит электрона в атоме водорода.

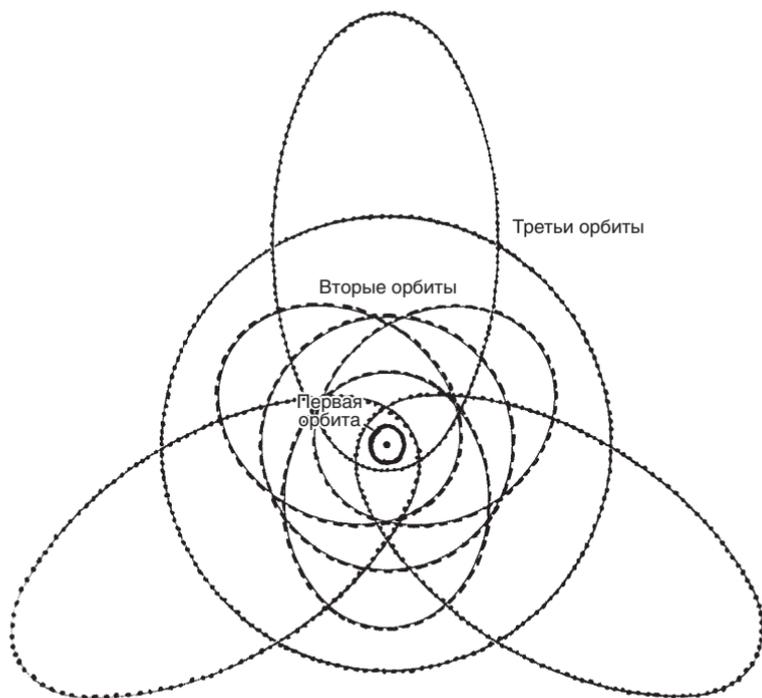


Рис. 7.14. Круговые и эллиптические квантовые орбиты в атоме водорода. Первая круговая орбита (*непрерывная линия*) соответствует самому низкому уровню энергии электрона. Следующие четыре орбиты: одна круговая и три эллиптические (*прерывистые линии*) соответствуют одному и тому же уровню энергии, который выше, чем у первой орбиты. Следующие девять орбит (*точечные линии*), из которых на рисунке изображены только четыре, соответствуют еще более высокой энергии (одинаковой для всех девяти)

Первая круговая орбита (*непрерывная линия*) осталась без изменений. Ко второй круговой орбите (*прерывистая линия*) Зоммерфельд добавил три эллиптические орбиты, двигаясь по которым электрон имеет такую же энергию, как и на круговой орбите. К третьей круговой орбите добавлены восемь эллиптических орбит (на рисунке показаны только три из них), и все они соответствуют энергии, как на круговой орбите. Дальше к круговым орбитам более высокого порядка

добавлялось все больше и больше эллиптических орбит. Ситуация становилась все более сложной, но, как ни странно, она все лучше и лучше соответствовала наблюдаемым фактам. Атом больше не был похож на планетную систему, в которой Юпитер мог внезапно перепрыгнуть на орбиту Венеры, а описывался абстрактной моделью, лишь отдаленно связанной с окружностями и эллипсами из классической механики.

В течение первой декады своего развития теория Бора имела огромный успех в объяснении свойств сложных атомов, их оптического спектра, химических взаимодействий и т. д. Но, несмотря на все эти успехи, теория сохранила свою изначальную скелетную основу, и все попытки описать природу перехода электронов из одного энергетического состояния в другое и рассчитать интенсивность спектральных линий, излучаемых в результате этих переходов, никуда не привели.

Модель атома Бора и периодическая таблица Менделеева

Обсудив движение единственного электрона в атоме водорода, мы должны вернуться к вопросу о том, что происходит в случае атомов, содержащих 2, 3, 4 и намного больше электронов. Для ядер, несущих больший электрический заряд, общий рисунок орбит электронов остается тем же, что в случае атома водорода, за исключением того, что, благодаря большей силе притяжения со стороны ядра, диаметры всех орбит все больше и больше сжимаются по мере перехода к элементам с более высокими атомными номерами.

Как более многочисленные электроны в атомах более тяжелых элементов размещаются на этих сжимающихся орбитах? С точки зрения классической физики ответ на этот вопрос почти тривиален. Самой стабильной механической системой является та, которая не может больше терять энергию, переходя на еще более низкий энергетический уровень. Таким образом, можно предположить, что все дополнительные электроны в более тяжелых атомах перейдут на первую квантовую орбиту, где будут водить хоровод вокруг ядра.

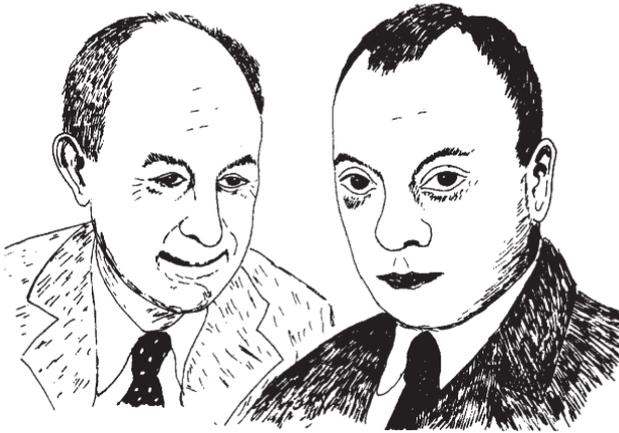


Рис. 7.15. Энрико Ферми (слева) и Вольфганг Паули

А поскольку мы знаем, что в атомах с более высоким атомным номером диаметр этого кольца становится все меньше и меньше, можно предсказать, что электроны на этом кольце будут размещаться все более плотно. Но дело в том, что этого не происходит, и независимо от заряда ядра внешний размер атома остается примерно тем же самым.

Эта проблема привлекла внимание немецкого физика Вольфганга Паули (рис. 7.15), чья корпулентная фигура и жизнерадостное лицо были хорошо знакомы в Институте теоретической физики Бора, где ему всегда были рады. Паули был первоклассным физиком-теоретиком, но среди друзей его имя всегда ассоциировалось с таинственным явлением, известным как эффект Паули.

Хорошо известно, что физики-теоретики очень неловки в обращении с экспериментальным оборудованием и постоянно ломают сложные дорогие приборы, лишь слегка прикоснувшись к ним. Паули был таким хорошим физиком-теоретиком, что приборы ломались, как только он входил в лабораторию. Самый убедительный случай эффекта Паули произошел в тот день, когда в лаборатории профессора Джеймса Франка в Геттингенском институте физики оборудование неожиданно взорвалось и разлетелось на куски без всякой видимой причины. Последующее расследование

показало, что эта катастрофа имела место именно тогда, когда поезд, на котором ехал Паули, остановился на пять минут на железнодорожном вокзале Геттингена.

Думая о движении электронов в атоме, Паули сформулировал свой знаменитый ныне принцип (который он сам называл принципом исключения), согласно которому на каждой квантовой орбите может находиться не более двух электронов. Этот принцип требует, что, если оба этих места заняты, следующий электрон должен размещаться на других орбитах. Когда все орбиты в этой оболочке заданного атома заполнены, начинают заполняться орбиты следующей оболочки (соответствующей более высокому уровню энергии).

По мере того как мы движемся в периодической таблице элементов в сторону более тяжелых атомов, радиусы квантовых орбит сжимаются из-за возрастающего заряда ядра. Но вместе с тем все больше и больше орбит становится занятыми электронами. Таким образом, в среднем размер атома остается тем же самым и у самых легких, и у самых тяжелых элементов. Однако существуют небольшие колебания размера атома, когда мы переходим от одной заполненной оболочки к другой (конфигурации благородных газов). Это вызывает незначительные периодические изменения плотности различных элементов, которые идут параллельно изменениям их химических свойств.

Электронные оболочки атомов всех видов в периодической таблице заполнены в соответствии с фиксированной иерархией энергетических состояний. Первой заполняется оболочка, соответствующая состоянию с самым низким уровнем доступной энергии. В атоме гелия эта оболочка полностью заполнена двумя электронами, вращающимися друг за другом по квантовой орбите. Следующий элемент, литий, содержит три электрона, один из которых, согласно принципу исключения, должен находиться на второй оболочке, состоящей из одной круговой и трех эллиптических орбит. Поскольку эти четыре орбиты могут удерживать всего 8 электронов, а внутренняя орбита удерживает два, в атоме неона, содержащем 10 электронов, обе эти оболочки будут заполнены. Дополнительные электроны в еще более тяжелых элементах должны размещаться на третьем мно-

жестве круговых и эллиптических орбит и т. д. Таким образом, принцип исключения Паули объясняет внутреннюю структуру элементов с точки зрения того, как последовательно заполняются их электронные оболочки. Кроме того, этот принцип лежит в основе внешней, или химической, идентичности атома и периодичности химических свойств в последовательности типов атомов в таблице Менделеева. Эти свойства определяются количеством электронов на внешних оболочках атомов, которые могут соприкасаться, когда атомы сталкиваются друг с другом.

Когда принцип Паули был сформулирован впервые, электроны считались не более чем точечными зарядами отрицательной энергии. Однако вскоре было открыто, что электроны должны рассматриваться как крохотные магниты. Благодаря тому что при движении по орбите вокруг ядра они быстро вращаются, электроны обладают магнитным моментом. Поняв, что электроны — это крохотные магниты, мы должны принимать в расчет и электрические силы, которые в основном отвечают за их орбитальное движение, и магнитные силы, возникающие благодаря их вращению. Электрон может вращаться в двух направлениях: либо он вращается по направлению его орбитального движения, либо в противоположном направлении. Было показано, что два электрона, следующие по орбите друг за другом, должны вращаться в противоположных направлениях. Это открытие требует от нас сформулировать принцип Паули в несколько ином виде. Из-за того что два электрона вращаются в противоположных направлениях, возникают слабые магнитные поля, и поле одного немного меняет орбиту другого и наоборот, поэтому можно сказать, что два электрона, которые изначально могли двигаться по одной орбите, на самом деле двигаются по двум разным (хотя и очень близким) орбитам. Следовательно, более правильно рассматривать их квантовые орбиты как пары близких орбит, разделенных слабыми магнитными взаимодействиями.

Этот взгляд на структуру оболочек атома дает простое объяснение природе химической валентности различных элементов. На основании квантовой теории можно показать, что атомы, имеющие почти заполненную внешнюю

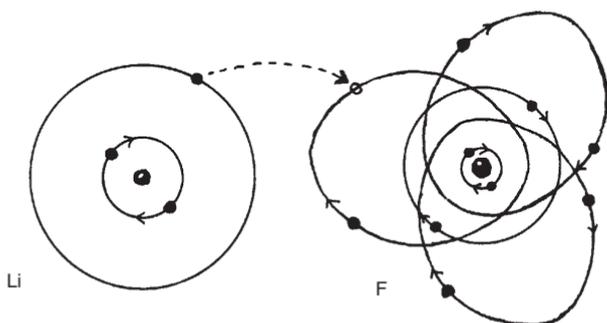


Рис. 7.16. Химические связи между атомом лития (Li) и атомом фтора (F) в молекуле фторида лития (LiF). Одинокий электрон из оболочки атома Li перепрыгивает на свободное место в почти заполненной оболочке атома F

оболочку, стремятся присоединять дополнительные электроны, чтобы дополнить ее; а атомы, которые только начали заполнять электронами новую оболочку, стремятся избавиться от лишних электронов. Например, у хлора (атомный номер 17) есть 2 электрона на первой оболочке, 8 на второй и 7 на третьей, и, значит, на его внешней оболочке не хватает 1 электрона. С другой стороны, у атома натрия (атомный номер 11) 2 электрона на первой оболочке, 8 на второй и только 1 электрон на третьей. При таких обстоятельствах, когда атом хлора встречается с атомом натрия, он «принимает» одинокий электрон последнего и становится Cl^- , а атом натрия становится Na^+ . Теперь два этих иона связаны друг с другом электрической силой и образуют устойчивую молекулу пищевой соли. Аналогично у атома кислорода на внешней оболочке не хватает двух электронов (атомный номер $8 = 2 + 6$), и он стремится получить два электрона от какого-нибудь другого атома, поэтому может связать два одновалентных атома (H, Na, K и т. д.) или один двухвалентный атом, например магний (атомный номер $12 = 2 + 8 + 2$), которому приходится отдать 2 электрона. Пример химической связи такого рода показан на рисунке 7.16. Кроме того, становится ясно, почему благородные газы, у которых заполнены все оболочки, не имеют свободных электронов и являются химически инертными.

Волны материи

В 1924 году тридцатидвухлетний французский аристократ маркиз Луи де Бройль (рис. 7.17), который начал свою научную карьеру с изучения истории Средневековья и только позднее заинтересовался теоретической физикой, представил на факультете Парижского университета свою докторскую диссертацию, содержащую экстраординарные идеи.

Де Бройль считал, что движение материальных частиц сопровождается и направляется определенными волнами-пилотами, распространяющимися в пространстве вместе с частицами. Если это так, то отдельные квантовые орбиты в модели атома Бора можно интерпретировать как орбиты, которые соответствуют условию, что *их длина содержит целое число этих волн-пилотов*; одна волна на первой квантовой орбите, две на второй и т. д. (рис. 7.18).

Ранее мы видели, что для простого случая кругового движения квантовые орбиты Бора удовлетворяют условию, что произведение их длины и импульса (массы, умноженной на скорость) электрона равняется h для первой орбиты, $2h$ для второй, $3h$ для третьей и т. д. Эти два утверждения становятся идентичными, если предположить, что длина пилотной волны равна h , деленной на импульс частицы:

$$h/mv,$$

а именно это и предположил Луи де Бройль. Для орбит промежуточного радиуса пилотная волна, обегая их по кругу, не может «схватить себя за хвост» и, следовательно, этот тип движения не может существовать. Таким образом, де Бройль одним ударом заменил жесткие орбиты Нильса Бора более мягким представлением типа органических труб, мембран барабанов и т. п. Квантовая механика частиц приобрела свойства, сходные со свойствами звуковых или световых волн.

Это революционное предположение следовало подвергнуть экспериментальной проверке. Если электроны в своем движении внутри атома направляются волнами де Бройля, они должны также проявлять некоторые свойства волн, когда летят по прямой в пространстве. Для электронных



Рис. 7.17. П.А.М. Дирак (слева) и Луи де Бройль

потоков в несколько киловольт, используемых в лабораториях, ожидалось, что длина волны де Бройля будет около 10^{-8} см, что сравнимо с длиной волны X-лучей, так что для проверки того, сопровождаются ли электроны волнами, можно было использовать технику дифракции X-луча.

Такого рода эксперимент был проведен в 1927 году сэром Дж.Дж. Томсоном, сыном Джорджа (позднее сэра Джорджа), и американскими физиками К.Дж. Дэвиссоном и Л.Х. Джермером, которые направили на кристалл поток электронов, двигавшихся с ускорением в электрическом поле. В результате была получена картина, похожая на ту, что изображена на вкладке IV *снизу*, без сомнения показывающую, что здесь имеет место явление дифракции. Длина волны, полученная из диаметров дифракционных колец, в точности совпадает с данной де Бройлем формулой h/mv . Кроме того, она уменьшается и увеличивается, когда электроны в потоке ускоряются или замедляются. Несколько лет спустя немецкий физик Отто Штерн повторил опыты Дэ-

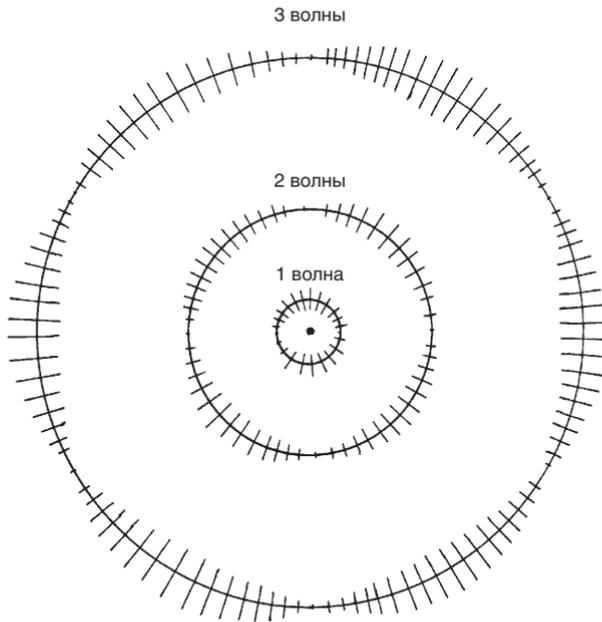


Рис. 7.18. Волны де Бройля, бегущие вдоль орбит Бора

виссона и Джермера, используя вместо электронов поток атомов натрия, и обнаружил, что явление дифракции, описанное формулой де Бройля, имеет место и в этом случае.

В 1926 году гипотезу де Бройля удалось обобщить и подвести под нее прочную математическую основу. Это сделал австрийский физик Эрвин Шрёдингер (рис. 7.19), который выразил ее в знаменитом уравнении Шрёдингера, применимом к движению частиц в поле любых сил. Использование уравнения Шрёдингера для случая водорода, как и для случая более сложных атомов, воспроизвело все результаты квантовой орбитальной теории Бора и, кроме того, ответило на вопросы (например, об интенсивности спектральных линий), на которые не могла ответить старая теория. Теперь внутреннее строение атома вместо круговых или эллиптических орбит описывалось так называемыми ψ -функциями, соответствующими разным типам волн де Бройля, которые могут существовать в пространстве, окружающем атомное ядро.



Рис. 7.19. Вернер Гейзенберг (слева) и Эрвин Шрёдингер

Одновременно с первой статьей Шрёдингера, опубликованной в ведущем немецком журнале *Annalen der Physik*, в конкурирующем издании *Zeitschrift der Physik* появилась статья по квантовой теории, написанная молодым немецким физиком (в то время ему было 24 года) Вернером Гейзенбергом (рис. 7.19).

Очень сложно описать теорию Гейзенберга хотя бы с какой-то степенью популярности. Основная идея состоит в том, что такие механические величины, как положение, скорость, сила и т. д., не могут быть представлены обычными числами, как, например, 5 , $7\frac{1}{2}$, или $13\frac{5}{7}$, а выражаются абстрактными математическими структурами, известными как матрицы, похожими на таблицу кроссворда, составленную из обычных чисел, но с бесконечным количеством столбцов и строк. Для таких матриц можно разработать правила сложения, вычитания, умножения и деления, которые будут очень похожи на действия в элементарной алгебре, но с одним большим исключением. В матричной алгебре результат умножения A на B не обязательно равняется результату умножения B на A , что является следствием более высокой сложности операции умножения матриц. В качестве самой близкой аналогии можно привести человеческий язык, на

котором Дуглас Малькольм не то же самое, что Малькольм Дуглас, и flat top (плоская вершина) не то же, что top flat (верхняя квартира). Итак, Гейзенберг показал следующее: если считать, что все величины в уравнениях классической механики — это матрицы, а также ввести дополнительное условие: импульс \times скорость — скорость \times импульс = hi , где h — постоянная Планка, а i — наш старый приятель мнимая единица, получится теория, правильно описывающая все квантовые явления.

Одновременное появление двух статей, которые приводили к абсолютно одинаковым результатам совершенно разными методами, ввергло мир физиков в состояние ужаса, но вскоре обнаружилось, что математически эти две теории идентичны. В действительности матрицы Гейзенберга представляют собой табличное решение уравнения Шрёдингера, а решая различные задачи квантовой теории, можно использовать и волновую механику, и матричную механику.

Отношения неопределенности

Каков физический смысл волн де Бройля, направляющих движение материальных частиц? Являются ли они реальными волнами, как световые волны, или только математическими функциями, введенными просто для удобства описания физических явлений микрокосма? Ответ на этот вопрос был дан через пару лет после того, как волновая механика была сформулирована Гейзенбергом, спросившим себя, как квантовые законы, использующие понятие минимального количества лучистой и механической энергии, влияют на основные понятия классической механики.

Гейзенберг вскрыл корень этой проблемы — попытку применить обычные правила и методы наблюдений к явлениям, происходящим в масштабе атома. В своем повседневном опыте мы можем наблюдать любые явления и измерять их свойства, не оказывая сколько-нибудь значительного влияния на эти явления. Точнее, если мы попытаемся измерить температуру кофе водяным термометром для ванны,

он поглотит из кофе столько тепла, что температура кофе заметно изменится. Но с помощью маленького химического термометра мы можем добиться достаточно точного измерения. Температуру маленького объекта размером с живую клетку можно измерить миниатюрной термопарой с пренебрежимо малой теплоемкостью. Но в мире атома мы никогда не можем игнорировать возмущение, внесенное нашим измерительным прибором. Энергии такого масштаба столь малы, что даже самое деликатное измерение может привести к существенному возмущению в наблюдениях, и мы не можем гарантировать, что результаты измерений действительно будут описывать то, что произошло бы в отсутствие измерительных устройств. В ходе исследований наблюдатель и его инструменты становятся составной частью явления. Физического явления как такового нет даже в принципе. Во всех случаях мы имеем неизбежное взаимодействие между явлением и наблюдателем.

Гейзенберг проиллюстрировал это с помощью детального рассмотрения попытки отследить движение материальной частицы. В большом мире мы можем следить за полетом шарика пинг-понга, ни на йоту не меняя его траектории. Известно, что свет оказывает давление на шарик, но нам не нужно играть в пинг-понг в темной комнате, поскольку давление света слишком мало, чтобы изменить полет шарика. Но замените шарик для пинг-понга на электрон, и ситуация станет совершенно иной. Гейзенберг изучил ситуацию с помощью мысленного эксперимента — метода размышлений, который использовал Эйнштейн, рассуждая о теории относительности.

В ходе такого умственного упражнения экспериментатору предоставлена «идеальная мастерская», где он может сделать любой инструмент или прибор, такой, что его конструкция и функционирование не противоречит базовым законам физики. Например, он может сделать ракету, скорость которой почти равна скорости света, но не больше скорости света. Или он может воспользоваться источником света, излучающим один-единственный протон, но не полпротона. Гейзенберг оснастил себя идеальной установкой для наблюдения за полетом электрона (рис. 7.20).

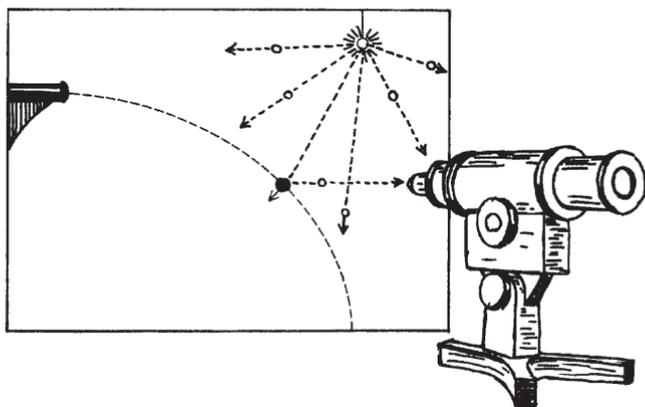


Рис. 7.20. Идеализированный эксперимент Гейзенберга по наблюдению за траекторией частицы

Он представил себе электронное ружье, которое может выпустить горизонтально один-единственный электрон в камеру с абсолютным вакуумом, где нет ни одной молекулы воздуха. Его свет шел из идеального источника, способного излучать фотоны с любой заданной длиной волны и в любом заданном количестве. А наблюдал он за движением электрона в идеальный микроскоп, который мог настраивать по своему усмотрению во всем диапазоне спектра от самых длинных радиоволн до самых коротких гамма-лучей.

Что произойдет, когда электрон вылетит в камеру? Согласно классическим учебникам механики, частица должна следовать по траектории, известной как парабола. Но в действительности удар фотона по электрону вызовет изменение его скорости. Наблюдая за частицей в последовательных точках ее движения, мы обнаружим, что она делает зигзаг из-за влияния фотона. Тогда, поскольку у нас есть идеально гибкий инструмент, минимизируем это влияние, уменьшив энергию фотонов, что можно сделать, если использовать свет низкой частоты. Действительно, приближаясь к бесконечно низкой частоте (которую допускает наш прибор), мы можем сделать возмущение сколь угодно малым. Но тут возникает новая трудность. Чем длиннее длина световой волны, тем труднее нам различать объект из-за эффекта

дифракции. В результате мы больше не можем найти точное положение электрона в каждый заданный момент. Гейзенберг показал, что значение неопределенности при определении положения и скорости электрона не может быть меньше, чем постоянная Планка, деленная на массу частицы.

$$\Delta v \Delta x \geq \frac{h}{m}.$$

Так что при очень малой длине волны мы можем точно определить положение движущейся частицы, но будем сильно влиять на ее скорость, в то время как при очень большой длине волны мы можем определить ее истинную скорость, но получим большую неопределенность в отношении ее положения. Теперь мы можем выбрать нечто среднее между этими неопределенностями. Если использовать промежуточную длину световой волны по своему усмотрению, мы не слишком сильно изменим траекторию частицы и сможем с достаточной точностью определить ее путь (рис. 7.21). Наблюдаемый путь не будет четкой линией, как в классических условиях, скорее, это будет полоса с нечеткими границами. Подобное описание траектории электрона не вызовет у нас сложностей в случаях, подобных трубке телевизора, где «толщина» пути электрона до экрана гораздо меньше диаметра точки, формируемой на экране электронным лучом. Здесь мы можем вполне удовлетворительно представлять траекторию электрона в виде линии. Но мы не можем таким же образом описывать траекторию электрона внутри атома. Полоса неопределенности будет иметь примерно такую же ширину, как расстояние от орбиты до ядра!

Предположим, что мы оставили попытки проследить путь движущейся частицы с помощью света и вместо этого пытаемся воспользоваться методом облачной камеры. В нашей гипотетической мастерской мы создадим идеальную облачную камеру, где полностью отсутствуют какие-либо материальные частицы, но присутствуют крошечные воображаемые индикаторы, которые становятся активными, как только близко от них пролетает электрон. Активные индикаторы покажут путь движущейся частицы, как капельки воды в реальной облачной камере, которая будет описана в следующей главе.

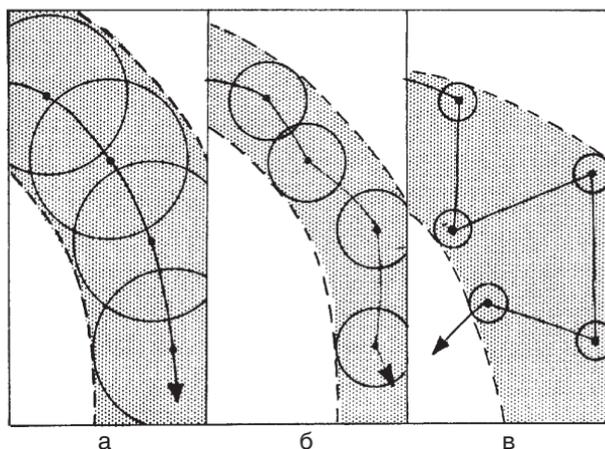


Рис. 7.21. Путь частицы в воображаемом эксперименте Гейзенберга. Длина световой волны слишком велика, и определение каждого положения частицы очень неточно (а). Оптимальные условия (б). Частота слишком высока, и частица подвергается слишком сильному удару (в)

Классическая механика сказала бы, что в принципе индикаторы можно сделать достаточно маленькими и достаточно чувствительными, чтобы они не отбирали существенного количества энергии у движущейся частицы, и мы смогли бы наблюдать ее траекторию с любой заданной точностью. Но в квантовой механике существует препятствие для проведения такой процедуры. Одно из ее правил гласит: чем меньше механическая система, тем больше в ней квант (минимально возможное количество) энергии. Таким образом, по мере уменьшения размера индикаторов (для повышения точности измерений) они будут забирать все больше энергии от пролетающих рядом частиц. Ситуация совершенно аналогична фатальной трудности, возникающей при попытке проследить путь частицы с помощью света, и мы снова приходим к тому же отношению неопределенности в определении положения частицы и ее скорости.

К чему же все это нас ведет? Гейзенберг пришел к выводу, что на атомном уровне мы должны отказаться от понятия траектории объекта как математической (то есть

бесконечно тонкой) линии. Эта концепция достаточно точна, когда мы имеем дело с явлением в обычном мире, где можно считать, что движущийся объект следует по своему пути, как по рельсам. Но в микромире электронов в атоме индивидуальные движения и события предопределены не так строго. Такие маленькие материальные частицы, как электроны и протоны, двигаются по своему маршруту под руководством волн, которые следует считать просто расширенными линиями траекторий классической механики. Важно то, что это руководство происходит скорее в *стохастическом*, чем в строго *детерминистском* смысле. Мы можем рассчитать только *вероятность* того, что электрон попадет в заданную точку экрана или что какая-то другая материальная частица будет обнаружена в заданном месте, но мы не можем сказать наверняка, каким путем она пройдет в заданном силовом поле.

Необходимо пояснить, что слово «вероятность» используется здесь в несколько ином смысле, чем его обычно понимают в повседневной жизни и в классической физике. Когда мы, играя в покер, говорим, что есть определенная вероятность сыграть флеш-рояль, мы имеем в виду только примерные шансы, поскольку не знаем, как лежат карты в колоде. Если мы точно знаем, как лежат карты, мы можем с определенностью предсказать, будет у нас флеш-рояль или нет. Классическая физика предполагает, что это же справедливо при решении задачи, например, в отношении поведения молекул газа. Их поведение должно быть описано на основании статистической вероятности только из-за неполноты нашего знания. Если бы мы знали положение и скорости всех частиц, то могли бы предсказать события, происходящие в газе, во всех подробностях. Принцип неопределенности выбивает почву из-под этой идеи. Мы не можем предсказать движение индивидуальных частиц, прежде всего потому, что никогда точно не знаем начальных условий. В масштабе атома *в принципе* невозможно получить точные значения положения частицы и ее скорости.

Является ли волновая функция ψ (или, скорее, ее квадрат), направляющая материальную частицу, определенной «физической сущностью», которая *существует* в том же

смысле слова, в котором существуют атом натрия или межконтинентальные баллистические ракеты? Ответ зависит от того, что понимать под словом «существование». Волновые функции «существуют» в том же смысле, что и траектории материальных частиц. Орбиты Земли вокруг Солнца или Луны вокруг Земли *действительно существуют* в математическом смысле, представляя собой континуум точек, последовательно занимаемых движущимся материальным телом. Но они *не существуют* в том смысле, как железнодорожные пути, направляющие движение поезда по стране. В частности, волновая функция не имеет массы, являясь не более чем размытой траекторией.

Возможно, самую близкую аналогию в области классической физики дает понятие энтропии. Энтропия — это математическая функция, изобретенная физиками-теоретиками и связанная с математической вероятностью любого заданного рисунка движения молекул, который определяет направление, в котором обычно протекают термодинамические процессы: от меньших значений энтропии к большим. Но энтропия не является физической сущностью в том смысле, как масса или энергия, и, если мы можем говорить об одном грамме материи или одном грамме энергии (после Эйнштейна), говорить об одном грамме энтропии бессмысленно. Так же бессмысленно говорить об одном грамме волн де Бройля или одном грамме функции Шрёдингера!

Взгляд на формулу Гейзенберга показывает, почему мы можем пренебречь принципом неопределенности и спокойно довериться старому доброму принципу детерминизма, когда речь идет о макроскопическом масштабе. Результат умножения неопределенности положения на неопределенность скорости равняется постоянной Планка h , деленной на массу частицы. Постоянная Планка — это очень маленькая величина: ее числовое значение примерно равно 10^{-27} в единицах сантиметр-грамм-секунда. Когда мы рассматриваем частицу весом 1 мг, мы в принципе можем одновременно определить ее положение с точностью до триллионной доли сантиметра и ее скорость с точностью до одной триллионной сантиметра в секунду, или 30 μ за век!

Принцип Гейзенберга был развит Бором до новой философии физики. Он стал призывом к глубокому изменению наших идей и взглядов на материальный мир, идей, которые формируются у нас с раннего детства на основании повседневного опыта. Но он придавал смысл многим задачам атомной физики.

Одни физики с готовностью восприняли новые взгляды. Другим они совсем не нравились. К последним принадлежал Альберт Эйнштейн. Его философская убежденность в детерминизме не позволяла возвести неопределенность в принцип. И точно так же, как скептики пытались отыскать противоречия в его теории относительности, Эйнштейн пытался найти противоречия в принципе неопределенности квантовой физики. Однако его старания лишь подкрепили принцип неопределенности. Интересной иллюстрацией этого стал инцидент, имевший место на Шестом международном Сольвеевском конгрессе физики, проходившем в 1930 году в Брюсселе.

В дискуссии, на которой присутствовал Бор, Эйнштейн провел мысленный эксперимент.

Указав, что время — это четвертая пространственно-временная координата, а энергия — четвертая компонента импульса (масса \times скорость), он подчеркнул, что уравнение неопределенности Гейзенберга подразумевает, что неопределенность во времени связана с неопределенностью энергии, но их произведение по меньшей мере равно постоянной Планка h . Эйнштейн взялся доказать, что это не так, что время и энергию можно определить без всякой неопределенности. Он предложил рассмотреть идеальный ящик, покрытый изнутри идеальными зеркалами, который мог бы бесконечно удерживать лучистую энергию. Нужно взвесить ящик. Затем несколько позднее в выбранный момент часовой механизм, установленный как в часовой бомбе, открывает идеальную шторку и выпускает некоторое количество света. Теперь ящик снова нужно взвесить. Изменение массы укажет энергию выпущенного света. Таким образом, уверял Эйнштейн, можно измерить выпущенную энергию в момент, когда она была выпущена, с любой заданной точностью, что противоречит принципу неопределенности.

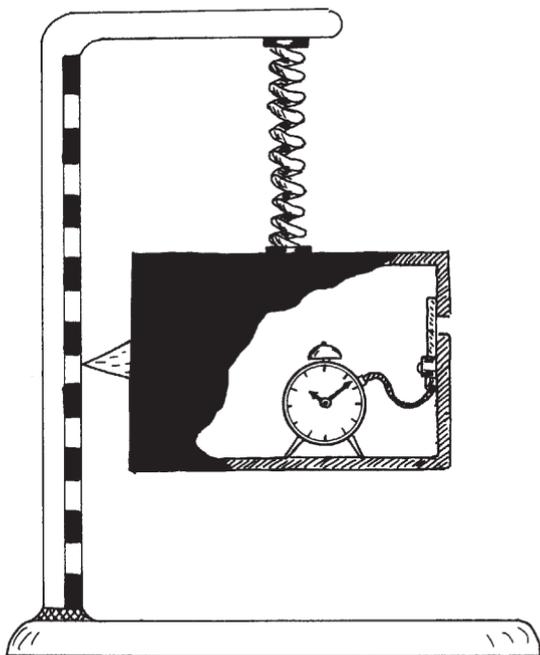


Рис. 7.22. Весы Эйнштейна—Бора для измерения веса света

На следующее утро после почти бессонной ночи Бор нанес по доказательству Эйнштейна смертельный удар. Он предложил мысленный эксперимент со своим идеальным прибором (который автор этой книги, будучи студентом Бора, создал в действительности из дерева и металла, чтобы Бор использовал его на лекциях по этой теме (рис. 7.22).

Бор напал на процесс взвешивания эйнштейновского ящика. Возьмем пружинные весы, снабженные указателем веса на вертикальном столбе, расположенном вдоль пружины, которые ничем ни хуже любых других. Теперь, поскольку ящик при изменении его веса должен двигаться вертикально, возникает неопределенность в его вертикальной скорости и, следовательно, в его высоте над столом. Более того, неопределенность в его поднятии над поверхностью земли ведет к неопределенности в ходе часов, поскольку, согласно теории вероятности, этот ход зависит от

положения часов в гравитационном поле. Далее Бор показал, что неопределенность во времени и неопределенность в изменении массы ящика связаны между собой, что Эйнштейн пытался опровергнуть.

Эйнштейну, сраженному его собственными аргументами, пришлось согласиться, что концепция Бора—Гейзенберга свободна от внутренних противоречий, но он до конца жизни отказывался признавать принцип неопределенности и продолжал надеяться, что в один прекрасный день физики вернуться к детерминистской точке зрения.

Дыры в пустоте

Поль Адриен Морис Дирак (рис. 7.17) получил диплом по электротехнике в начале 1920-х годов и сразу же оказался безработным. Не имея возможности найти работу, он подал документы в аспирантуру Кембриджского университета и был принят. Меньше чем через десять лет после этого он получил Нобелевскую премию по физике за свой вклад в развитие квантовой механики. Дирак был из тех ученых, которые живут как бы в башне из слоновой кости, и, хотя он всегда был не прочь поболтать со своими коллегами об их путешествиях на Восток или на любую другую житейскую тему, предпочитал заниматься своими исследованиями и делать это в одиночку. Тем не менее его замечания на научных конференциях всегда были острыми и сделанными по существу. Однажды во время Копенгагенской конференции по теоретической физике он слушал японского физика Й. Нишина, который исписал всю доску вычислениями и в конце концов получил важную формулу, относившуюся к рассеянию коротковолнового излучения на свободных электронах. Дирак обратил внимание Нишины на то, что в формуле, которую тот вывел на доске, третье выражение в скобках имело отрицательный знак, тогда как в первоначальной рукописи выражение было положительным. «Что ж, — возразил Нишина, — правильно так, как в рукописи. Выводя формулу на доске, я, должно быть, в каком-то месте ошибся в знаке». «В нечетном количестве

мест», — поправил его Дирак. Действительно, три, пять, семь и т. д. ошибок в знаке привели бы к тому же результату.

Однажды во время лекции Дирака в университете Торонто, когда настало время задавать вопросы, один канадский профессор поднял руку. «Доктор Дирак, — сказал он. — Я не понимаю, как вы получили формулу, написанную на доске в верхнем левом углу». «Это не вопрос, а утверждение, — ответил Дирак. — Следующий вопрос, пожалуйста».

Свою способность к быстрым умственным упражнениям он продемонстрировал, предложив необычное решение запутанной задачи, которая занимала умы математиков и физиков Гёттинггенского университета во время одного из его приездов. Задача состояла в том, чтобы написать все числа от 1 до 100, используя существующие алгебраические понятия: +, −, степень, корень и т. д., но не используя никаких цифр, кроме двоек. Так, например, 1 можно представить в виде $(2 \times 2)/(2 \times 2)$. Для 2 имеем $2/2 + 2/2$, для 3 и 5 имеем $2^2 - 2/2$ и $2^2 + 2/2$, а для 7 — $2/(0,2 \times 2) + 2...$

Когда эту задачу дали Дираку, он очень быстро нашел общее решение для написания *любого* числа с использованием *только трех двоек*. Это решение таково:

$$N = -\log_2 \log_2 \sqrt{\sqrt{\sqrt{2}}},$$

где число корней равняется заданному числу N . Для тех, кто немного знает алгебру, доказательство очевидно.

Но среди всех своих важных математических открытий Дирак особенно гордился одним, которое, однако, не принесло ему никакой славы. Беседуя с женой одного из преподавателей, он рассматривал ее вязаный шарф или что-то в этом роде. Вернувшись к себе, он попытался воссоздать в уме быстрое движение спиц в руках женщины и пришел к выводу, что существует другой способ держать спицы. Дирак поспешил назад, чтобы рассказать о своем открытии, но был разочарован, когда выяснилось, что оба способа вязания известны женщинам испокон веков.

Таким образом, упустив возможность сделать открытие в области топологии, Дирак внес очень большой вклад в развитие релятивистской квантовой теории. Волновая ме-

ханика, которой в то время было всего несколько лет от роду, была изначально сформулирована Шрёдингером для случая нерелятивистского движения, то есть для движения частиц со скоростью много меньше, чем скорость света, и физики-теоретики ломали головы в попытке объединить две великие теории: квантовую теорию и теорию относительности. Кроме того, волновое уравнение Шрёдингера рассматривало электрон как точку, и все попытки применить ее к вращающемуся электрону, который обладает свойствами маленького магнита, не приводили ни к какому удовлетворительному результату.

В своей знаменитой статье, опубликованной в 1930 году, Дирак вывел новое уравнение — теперь оно носит его имя, — позволяющее одним выстрелом убить двух зайцев. Оно удовлетворяет релятивистским требованиям, поскольку применимо к электрону независимо от того, как быстро он движется, и в то же время автоматически приводит к выводу, что электрон *должен вести себя* как крохотный намагниченный волчок. Релятивистское волновое уравнение Дирака слишком сложно, чтобы обсуждать его здесь, но читатель может быть уверен в том, что оно абсолютно верно.

Однако, как ни хорошо было уравнение Дирака, оно немедленно привело к серьезным проблемам уже потому, что успешно объединяло теорию вероятности и квантовую теорию. Проблема возникла из-за того (в главе 6 об этом не говорилось), что релятивистская механика ведет к математической возможности двух разных миров: один положительный — мир, где мы живем, а другой странный отрицательный, который может только будоражить наше воображение. В этом отрицательном мире все объекты имеют *отрицательную массу*. Это означает, что, если их толкнуть в одном направлении, они будут двигаться в противоположном. Пользуясь очевидной аналогией, можно назвать электроны с отрицательной массой ослиными электронами*. Странные вещи происходили бы в этом мире отрицательной массы. Чтобы заставить предмет двигаться вперед, нам пришлось бы толкать его назад, а чтобы заставить его остановиться, надо

* Иными словами, антиэлектрон.

было бы толкнуть его вперед. Благодаря их заряду между электронами существует сила отталкивания. Если оба электрона «нормальные», эта сила сообщит им ускорения, направленные в противоположные стороны, и электроны разлетятся с большой скоростью. Однако если один из этих двух электронов ослиный, то сила отталкивания притянет его к другому электрону, в то время как тот будет улетать от него. Поскольку ускорения численно равны, эти два электрона будут разгоняться все быстрее и быстрее, и ослиный электрон будет гнаться за нормальным. Но здесь возникает противоречие с законом сохранения энергии. Кинетическая энергия нормального электрона равна $1/2mv^2$, тогда как для ослиного электрона мы имеем:

$$-1/2mv^2.$$

Таким образом, общая энергия системы равняется $1/2mv^2 - 1/2mv^2 = 0$, то есть то же самое, что было бы, если бы они находились в покое.

Никто никогда не видел ослиных электронов, ослиных камней или ослиных планет; это всего лишь мнимое дополнительное уравнение Эйнштейна. И до того, как Дирак объединил теорию относительности и квантовую теорию, это никого не беспокоило. На самом деле нормальный электрон в покое имеет энергию m_0c^2 , а когда он движется со скоростью v , к ней нужно прибавлять его кинетическую энергию. С другой стороны, ослиный электрон в покое имеет энергию $-m_0c^2$, и движение добавляет ему отрицательную кинетическую энергию. Таким образом, график энергии электронов обоих типов выглядит, как показано на рисунке 7.23. Она распадается на две части, верхнюю для нормального электрона и нижнюю для ослиного. Эти части разделены промежутком между $+m_0c^2$ и $-m_0c^2$, который не соответствует никакому возможному движению. Получается, что *если движение частиц непрерывно*, то не существует способа изменить его так, чтобы движение из верхней части стало движением из нижней. Можно было бы отмахнуться от этой проблемы, сказав: «Все наши электроны — это хорошо воспитанные частицы с положительной массой, и нам наплевать на другие математические возможности!»

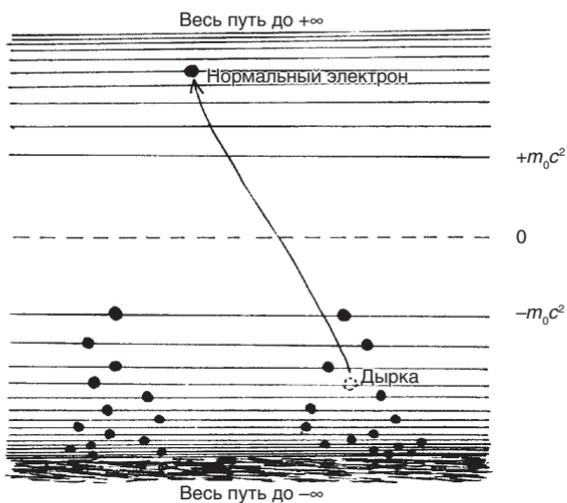


Рис. 7.23. Океан ослиных электронов Дирака и формирование электронной пары (один положительный и один отрицательный)

Однако мы не можем так просто отделаться от этой проблемы, если объединим теорию относительности и квантовую теорию.

В действительности, согласно квантовой теории, электроны просто обожают прыгать с одного уровня энергии на другой, даже несмотря на то, что не существует непрерывного перехода между двумя состояниями движения. Если электроны могут прыгать с одной орбиты Бора на другую, излучая при этом энергию в виде светового кванта, то почему они не могут перепрыгнуть с верхних уровней энергии на нижние на рис. 7.23? Но если бы это было возможно, каждый нормальный электрон прыгал бы вниз в ослиные стойла отрицательной энергии и в результате терял бы все больше и больше энергии за счет излучения и двигался бы все быстрее и быстрее, получая отрицательную кинетическую энергию... Конечно, этого не происходит, но почему?

Единственным способом, которым Дирак мог справиться с этой трудностью, было предположить, что все состояния с отрицательной энергией заняты ослиными электронами и что электронам из состояний с положительной

энергией запрещено опускаться вниз из-за принципа исключения Паули. Конечно, это значит, что вакуум больше не вакуум и что он плотно заполнен ослиными электронами, движущимися во всех возможных направлениях со всеми возможными скоростями. В действительности каждая единица объема должна содержать *бесконечное множество* этих противоречащих самим себе частиц! Но почему мы никогда не замечаем их? Объяснение несколько загадочное. Представьте глубоководную рыбу, которая никогда не подплывает к поверхности океана и, следовательно, не знает, что где-то выше вода заканчивается. Если эта рыба достаточно умна, чтобы размышлять о том, что ее окружает, ей даже в голову не придет считать воду «средой», она будет считать ее открытым пространством. Точно так же можно утверждать, что физики не воспринимают присутствие бесконечных стад ослиных электронов, поскольку они распределены в пространстве равномерно. Конечно, эта мысль пахнет старомодным мировым эфиром, но ее стоит обдумать. Возвращаясь к нашей умной глубоководной рыбе, можно представить, что из наблюдения за пустыми бутылками, другим мусором и даже целыми кораблями, опускающимися на дно океана, у нее сформировалось представление о гравитации. Но что, если однажды из кабины затонувшего корабля вырвется оставшийся там воздух и наша умная глубоководная рыба увидит вереницу серебристых блестящих пузырьков, поднимающихся к океанской поверхности? Конечно, рыба будет очень удивлена и после некоторых раздумий решит, что эти серебристые пузырьки должны иметь отрицательную массу. Действительно, как иначе они могут двигаться вверх, когда сила тяжести тянет все вниз?

У Дирака возникли похожие идеи относительно его океана, до отказа заполненного электронами с отрицательной энергией. Предположим, что в океане Дирака есть пузырек, иначе говоря, один ослиный электрон исчез. Как воспринял бы это физик? Поскольку отсутствие отрицательного заряда эквивалентно присутствию положительного заряда, он бы увидел в этом присутствие положительно заряженной частицы. Кроме того, по аналогии с пузырька-

ми, ее масса имела бы противоположный знак. Возможно ли, что таким пузырьком в океане Дирака было не что иное, как обыкновенный протон? Это была блестящая идея, но она не сработала. Дирак попытался объяснить значительно большую массу предполагаемых протонных пузырьков высокой скоростью, возникшей как результат взаимодействий между ослиными электронами, но потерпел неудачу. Масса положительно заряженной частицы-пузырька упорно оказывалась равной массе обычного электрона. Трудности возросли после расчетов Паули, который показал, что если бы протон действительно был пузырьком в океане Дирака, то атом водорода мог бы существовать не более пренебрежимо малой доли секунды. Действительно, если бы атом водорода представлял собой «капельку, вращающуюся вокруг пузырька», капелька упала бы на него и заполнила его полость и атом водорода исчез бы в одно мгновение. В связи с этим Паули предложил то, что называется «вторым принципом Паули», согласно которому любая новая идея, сформулированная физиком-теоретиком, немедленно становится применимой ко всем атомам его тела. В соответствии с этим принципом тело Дирака должно было исчезнуть за долю микросекунды после того, как он выдвинул свою идею, и другие физики-теоретики были бы избавлены от того, чтобы слышать о ней...

В 1931 году американский физик Карл Андерсон изучал следы, оставленные в облачной камере высокоэнергетическими электронами космических лучей. Чтобы измерить скорость этих электронов, он поместил облачную камеру в сильное магнитное поле, и, к его огромному удивлению, фотографии показали, что одна половина электронов отклонялась в одну сторону, а другая половина в противоположную. Таким образом, это была смесь из 50% отрицательно заряженных электронов и 50% положительно заряженных электронов, имевших такую же массу. Это и были дырки в океане Дирака, которые ему не удалось идентифицировать как протоны. Эксперименты с положительно заряженными электронами, или *позитронами*, как их назвали позднее, быстро подтвердили все предсказания, основанные на теории Дирака. Пара положительного и отрицательного элек-

трона могла стать результатом удара высокоэнергетического кванта света (гамма-лучей или космических лучей) по ядру атома, а вероятность такого события в точности совпала со значением, рассчитанным на основании теории Дирака. Наблюдения показали, что, пролетая сквозь обычную материю, позитроны аннигилируются при столкновении с обычными электронами, и при этом энергия, эквивалентная их массе, высвобождается в виде высокоэнергетических фотонов. Каждая деталь *действительно* оказалась такой, как было предсказано.

Но что насчет фантастической теории, которая рассматривает положительные электроны как дырки в бесконечно плотном распределении электронов с отрицательной массой? Что ж, теория — это теория, и она соответствовала экспериментальным данным, нравится она нам или нет. После опубликования статьи Дирака было показано, что в действительности нет необходимости предполагать существование бесконечного океана, наполненного электронами с отрицательной массой, и что для всех практических целей позитроны могут рассматриваться как дырки в абсолютно пустом пространстве.

Антиматерия

После открытия положительных электронов физики мечтали о возможности существования отрицательных протонов, которые находились бы в таких же отношениях с обычными положительными протонами, как позитроны с электронами. Но поскольку масса протона почти в две тысячи раз больше массы электрона, их соединение потребовало бы энергии порядка нескольких миллиардов электронвольт. Это послужило началом ряда амбициозных проектов по созданию ускорителей частиц, которые могли бы снабдить ядерные снаряды достаточной энергией, и в Соединенных Штатах были заложены краеугольные камни для двух таких суперускорителей: *беватрона* в радиационной лаборатории Калифорнийского университета в Беркли и *космотрона* в Брукхейвенской национальной лаборатории

на Лонг-Айленде. Гонку выиграла физики с западного побережья Эмилио Сегре, О. Чемберлен и др., которые в октябре 1955 года объявили, что они наблюдали отрицательные протоны, исходящие из мишеней, подвергавшихся обстрелу атомными снарядами мощностью 6,2 миллиарда электронвольт.

Основная трудность в наблюдении за отрицательными протонами, возникавшими в подвергавшихся обстрелу мишенях, заключалась в том, что их появление, как и ожидалось, сопровождалось потоком сотен тысяч других частиц (тяжелых мезонов), которые тоже формировались во время удара. Таким образом, отрицательные протоны нужно было находить и отделять от других частиц. Этому удалось добиться с помощью сложного «лабиринта», созданного из магнитных полей, узких щелей и т. д., через который проходили только частицы, обладавшие свойствами антипротонов. Когда поток частиц, исходящих от мишени (помещенной под обстрел в беватроне), прошел через лабиринт, на противоположном конце ожидали увидеть только отрицательные протоны. Ускоритель начал работать, и четверо наблюдателей были вознаграждены, наблюдая быстрые частицы, вылетающие из заднего отверстия со скоростью примерно одна каждые 6 минут. Как показали дальнейшие проверки, этими частицами действительно были отрицательные протоны, которые выбрасывались из мишени в результате бомбардировки высокоэнергетическим потоком беватрона. Их масса составляла 1840 масс электрона, что, как известно, равно массе обычного положительного протона.

Как и искусственно полученные положительные электроны, исчезающие при прохождении сквозь обычную материю, содержащую множество обычных отрицательных электронов, отрицательные протоны должны были аннигилироваться при встрече с положительными протонами ядер атомов, с которыми они сталкивались. Поскольку энергия, участвующая в процессе аннигиляции протон—антипротон, почти в две тысячи раз превышает энергию, участвующую в столкновении электрон—антиэлектрон, процесс аннигиляции происходит гораздо более бурно, формируя из множества излучаемых частиц звезду.

Доказательство существования отрицательных протонов представляло собой великолепный пример экспериментальной верификации теоретического предсказания относительно свойств материи, хотя первоначальное теоретическое предположение выглядело совершенно невероятным. За этим осенью 1956 года последовало открытие *антинейтронов*, то есть частиц, находящихся в таких же отношениях с обычными нейтронами, как отрицательные протоны с положительными протонами. Поскольку в этом случае электрический заряд отсутствует, разницу между нейтронами и антинейтронами можно было заметить только на основании их взаимной обоюдной способности к аннигиляции.

Если для протонов, нейтронов и электронов, составляющих атомы обычной материи, могут существовать античастицы, можно предположить существование состоящей из этих частиц антиматерии. Все физические и химические свойства антиматерии должны остаться такими же, как у обычной материи, и единственный способ сказать, что два камня являются анти по отношению друг к другу, — это соединить их вместе. Если ничего не произойдет, значит, они состоят из одной и той же материи, если они аннигилируются, породив мощный взрыв, то они анти.

Возможное существование антиматерии создает огромные проблемы для астрономии и космологии. Относится ли вся материя Вселенной к одному типу, или она состоит из частей нашей материи и антиматерии, разбросанных в бесконечном пространстве произвольным образом? Имеются серьезные аргументы в пользу того, что внутри нашей звездной системы — системы Млечного Пути — вся материя относится к одному типу. В самом деле, если бы это было не так, процессы аннигиляции между звездами и рассеянным межзвездным веществом вызывали бы сильное излучение, которое можно было бы наблюдать. Но что можно сказать о нашем ближайшем космическом соседе, туманности Андромеды, и о сотнях миллионов других звездных галактик, разбросанных в пространстве в диапазоне досягаемости телескопа обсерватории Паломар Маунтен? Состоят ли они из такой же материи или из смеси пятыеде-

сят на пятьдесят? Если вся материя Вселенной одного типа, то почему это так? А если это частично обычная материя, частично антиматерия, то как эти две взаимоисключающие части отделены одна от другой? У нас нет ответа на все эти вопросы, и остается только надеяться, что будущие поколения физиков и астрономов смогут разгадать эту тайну.

Квантовая статистика

Квантовая теория движения очень сильно повлияла на кинетическую теорию тепла, о которой говорилось в главе 4 этой книги. В самом деле, если электрон, двигаясь внутри атома, может иметь только дискретные значения кинетической энергии, то это же должно быть применимо и к молекулам газа, движущимся внутри закрытого контейнера. Таким образом, рассматривая распределение энергии между молекулами газа, больше нельзя предполагать, что они могут обладать произвольной кинетической энергией (рис. 7.24), как предполагалось в классической теории, разработанной Больцманом, Максвеллом, Гиббсом и другими. Напротив, должны существовать определенные уровни энергии, зависящие от размера контейнера, и никакие значения энергии между этими уровнями не возможны. Ситуация усложнялась тем, что некоторые частицы (такие как электроны) подчиняются принципу Паули, запрещающему, чтобы более двух из них находились на одном уровне, тогда как на другие частицы (такие как молекулы воздуха) это ограничение не распространяется. Этот факт порождал два вида статистики: так называемая статистика Ферми—Дирака и статистика Бозе—Эйнштейна, применимая к частицам, на которые не распространяется ограничение. Рисунки 7.24, *б* и *в* призваны разъяснить разницу между этими двумя типами статистики. В целом развитие квантовой статистики — нечто удивительное, однако это чрезвычайно трудно объяснить без использования технической терминологии.

Таким образом, можно сказать, что во всех случаях из обычной жизни, как, например, в атмосферном воздухе,

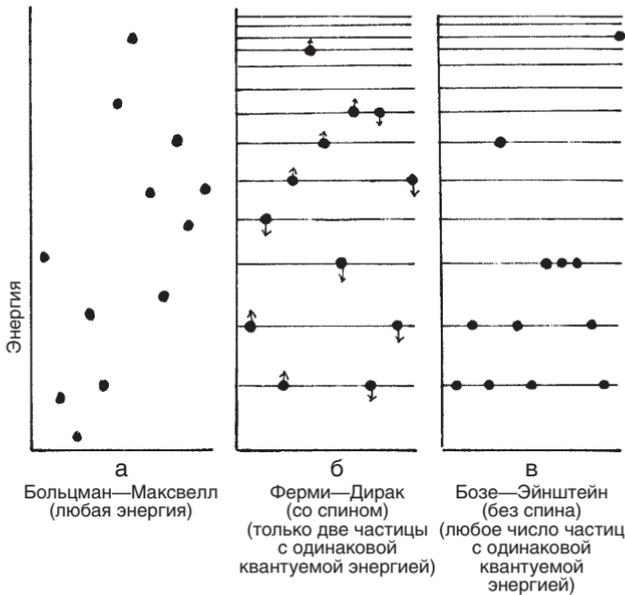


Рис. 7.24. Три типа статистической обработки энергии двенадцати частиц газа

оба новых типа статистики практически не отличаются от старой доброй классической статистики. Отклонения наблюдаются только в таких случаях, как электронный газ в металлах или в так называемых белых карликах — звездах, где ситуацию определяют правила Ферми—Дирака, а также в обычных газах при температуре, близкой к абсолютному нулю, где превалируют правила Бозе—Эйнштейна. Будем надеяться, что читатели этой книги, которых эта тема заинтересует в достаточной степени, продолжат дальнейшее изучение современной физики. В таком случае после каких-нибудь шести лет учебы задачи квантовой статистики станут для них прозрачными как стекло.

Глава 8

АТОМНОЕ ЯДРО И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Открытие радиоактивности

В начале 1896 года французский физик Анри Беккерель, слышавший о недавнем открытии Ренгеном X-лучей, решил посмотреть, не излучают ли что-то похожее на X-лучи флуоресцентные материалы, известные тем, что они светятся под действием лучей света. Для своих исследований он выбрал кристаллы минерала под названием уранилсульфат (двойной сульфат урана и калия), который он изучал, потому что этот минерал проявлял сильные флуоресцентные свойства. Поскольку Беккерель считал, что излучение является результатом воздействия внешнего освещения, он поместил кристалл уранилсульфата на фотопластинку, завернул ее в черную бумагу и спокойно оставил на окне под действием солнечного света. Когда через несколько часов он развернул пластинку, на ней четко отпечаталось темное пятно в том месте, где лежал кристалл уранилсульфата. Беккерель повторил эксперимент несколько раз, и темное пятно появлялось каждый раз, даже когда он добавлял слой черной бумаги, в котором лежала фотопластинка.

26 и 27 февраля (1896 г.) небо Парижа заволочили плотные тучи, шел непрерывный дождь, и вся жизнь на бульварах переместилась в ближайшие кафе и рестораны. Несчастный профессор Беккерель положил свежезавернутую фотографическую платину с кристаллом уранилсульфата в ящик своего письменного стола и стал ждать, когда улучшится погода. Солнце не появлялось до 1 марта, но даже потом часто скрывалось за пробегавшими облаками. Не-

смотря на это, Беккерель снова выложил свой сверток на свет, а потом пошел в темную комнату посмотреть результат. Это было что-то невероятное! Вместо темноватого пятна, которое получалось раньше за целый день лежания на ярчайшем солнце, Беккерель увидел в том месте, где лежал кристалл уранилсульфата, угольно-черное пятно! Было очевидно, что потемнение пластины не имело никакого отношения к воздействию солнечных лучей на уранилсульфат и происходило непрерывно на протяжении всего времени, пока она лежала в закрытом ящике письменного стола Беккереля рядом с куском уранилсульфата.

Это было проникающее излучение, похожее на X-лучи, но происходило оно само по себе без всякого внешнего возбуждения атомов, предположительно тех, из которых состоял кристалл уранилсульфата. Беккерель пытался нагревать кристалл, охлаждать его, измельчать в порошок, растворять в кислотах, делал все, что только мог придумать, но интенсивность загадочного излучения упорно оставалась одинаковой. Стало ясно, что это новое свойство материи, получившее название *радиоактивности*, не имело ничего общего с химическими или физическими способами взаимодействия атомов, помещенных вместе. Это было свойство, скрытое глубоко внутри самого атома.

Радиоактивные элементы

В течение первых лет после открытия радиоактивности многие химики и физики занимались изучением этого нового явления. Уроженка Польши, мадам Мари Склодовская-Кюри, которая получила образование по химии и была женой французского физика Пьера Кюри, провела множество экспериментов со всевозможными химическими элементами и их составляющими на предмет радиоактивности и обнаружила, что торий обладает излучающей способностью, похожей на радиоактивность урана. Сравнивая радиоактивность урановых руд с радиоактивностью металлического урана, она заметила, что руды в пять раз более радиоактивны, чем можно было ожидать от содержащегося в них урана. Это указы-

вало на то, что руды наверняка содержат малые количества некоторых других радиоактивных веществ, гораздо более активных, чем сам уран, но, чтобы выделить их, требовалось большое количество дорогостоящих урановых руд. Мадам Кюри удалось получить от австрийского правительства тонну ненужных (в то время) остатков с государственного завода по производству урана в Иоахимстали (Богемия), которые после извлечения урана сохранили большую часть своей радиоактивности. Следуя за тесевой нитью проникающей радиации, мадам Кюри удалось выделить вещество, имеющее химические свойства, сходные со свойствами висмута, которое она назвала *полонием* в честь своей родины. В ходе дальнейшей работы было выделено еще одно вещество, похожее на барий, которое получило название *радий* и которое оказалось в 2 млн раз более радиоактивным, чем уран.

Первопроходцы в исследовании как новых земель, так и новых областей науки часто становятся жертвами скрытых опасностей, встречающихся на их пути. Мадам Кюри умерла в возрасте 67 лет от лейкемии, заболевания, которое, как теперь известно, возникает в результате воздействия проникающей радиации. Когда физики лучше узнали, какими осторожными нужно быть с радиацией, между страницами лабораторных тетрадей мадам Кюри были проложены куски фотопленки. На этих пленках отобразились многочисленные отпечатки пальцев, оставшиеся на страницах в тех местах, где к ним прикасались пальцы мадам Кюри, покрытые налетом радиоактивных веществ.

За открытием полония и радия последовали открытия все новых и новых радиоактивных веществ. Среди них был *актиний* — близкий родственник модного урана, полученный Дебьерном и Гизелем, *радиоторий* и *мезоторий*, полученные Отто Ганом, который через сорок лет открыл явление деления урана.

Радиоактивные семейства

С точки зрения развития физики работа по изучению свойств проникающей радиации двигалась вперед. В 1899 году

двадцативосьмилетний Эрнест Резерфорд обнаружил существование трех типов лучей:

1) Альфа (α) — лучи, которые можно было остановить листом бумаги и которые оказались ионами гелия. (На самом деле они были ядрами атомов гелия, но Резерфорд не знал этого, пока через двадцать лет не провел эксперименты по их рассеянию.)

2) Бета (β) — лучи, которые могли проходить сквозь алюминиевую фольгу толщиной в несколько миллиметров и которые оказались потоком очень быстро движущихся электронов.

3) Гамма (γ) — лучи, способные проникать через многосантиметровую свинцовую пластину, которые были похожи на X-лучи, но имели гораздо более короткую длину волны.

В учебниках физики (в том числе написанных ранее автором этой книги) принято воспроизводить диаграмму, похожую на ту, что дана на рисунке 8.1, которая показывает отклонение альфа-, бета- и гамма-лучей, проходящих через магнитное (или электрическое) поле. Поток альфа-лучей (положительных зарядов) отклоняется влево, поток бета-лучей (отрицательных зарядов) отклоняется вправо, а гамма-лучи (электромагнитные волны) не отклоняются никуда.

Однако сомнительно, чтобы такой эксперимент когда-либо проводился на раннем этапе изучения радиоактивности (заметное отклонение альфа-частиц требует исключительно сильных электромагнитов, которые были созданы только гораздо позднее), а разница между альфа- и бета-частицами была установлена с помощью гораздо более сложных непрямых методов.

До этого Резерфорд и его коллега Фредерик Содди пришли к выводу, что явление радиоактивности — это результат спонтанной трансформации одного химического элемента в другой. Эмиссия альфа-частиц с зарядом $+2$ и массой 4 приводит к образованию элемента, находящегося в таблице Менделеева на два шага левее исходного и имеющего атомную массу на четыре единицы меньше. Эмиссия бета-частиц (отрицательных электронов) сдвигает элемент в таблице Менделеева на один шаг вправо и совсем не

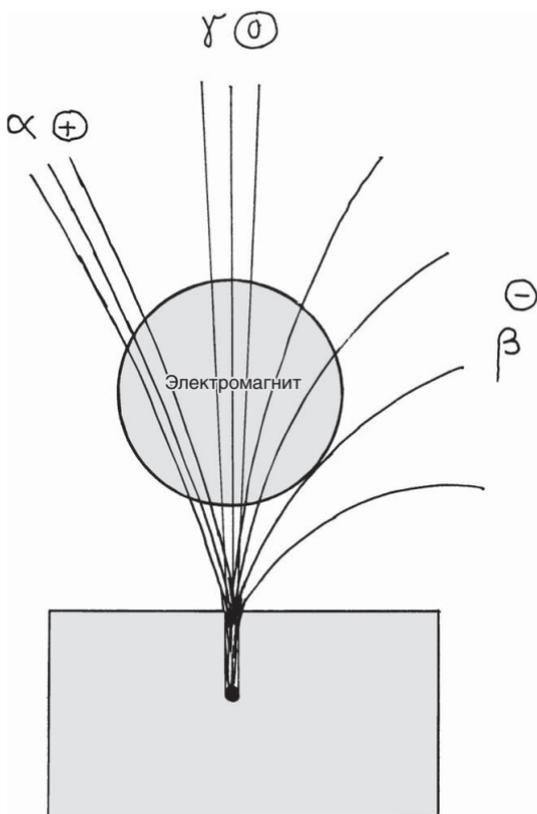


Рис. 8.1. Альфа-, бета- и гамма-лучи

меняет его атомной массы. Эмиссия гамма-лучей является просто результатом возбуждения атома, вызванного выбросом положительно или отрицательно заряженной частицы.

Серии последовательных альфа- и бета-распадов разрушают нестабильные атомы радиоактивных элементов, уменьшая их атомное число и массу до тех пор, пока они не достигнут наконец стабильного состояния, которым является атом свинца. Поскольку альфа-распад меняет атомную массу на 4 единицы, а бета-распад совсем не меняет атомную массу, существовать могут четыре семейства радиоактивных элементов:

Схема распада семейства урана

92-238
U (U 1)
 $4,5 \times 10^8$ г.

90-234
Th (UX 1)
24,1 д.
91-234
Pa (UX 2)
1,14 мин

92-234
U (U 2)
 $2,7 \times 10^5$ г.

90-230
Th (lo)
 $8,3 \times 10^4$ г.

88-226
Ra
1600 л.

86-222
Rn
3,8 д.

84-218
Po (RaA)
3 мин

82-214
Pb (RaB)
27 мин

83-214
Bi (RaC)
20 мин

84-214
Po (RaC')
 $1,64 \times 10^{-4}$

81-210
Tl (RaC'')
1,32 мин

82-210
Pb (RaD)
22,3 г.

83-210
Bi (RaE)
5 д.

82-206
Pb
Стабилен
138 д.

Б
Е
Т
А

Р
А
С
П
А
Д

А
Л
Ь
Ф
А

Р
А
С
П
А
Д

- 1) Те, атомная масса которых кратна четырем, то есть $4n$
- 2) Те, атомная масса которых равна $4n + 1$
- 3) Те, атомная масса которых равна $4n + 2$
- 4) Те, атомная масса которых равна $4n + 3$.

Атомная масса урана равна 238, то есть $4 \times 59 + 2$. Таким образом, уран и все члены его семейства, полученные путем альфа- и бета-распада, принадлежат к третьей из вышеупомянутых категорий. Атомная масса тория равна 232, то есть 4×58 , следовательно, семейство тория принадлежит к первой категории. Протактиний, который, распадаясь, превращается в актиний и другие члены семейства актиния, имеет атомную массу 231, то есть $4 \times 57 + 3$ и, таким образом, принадлежит к третьей категории. Радиоактивное семейство с атомной массой $4n + 1$ (вторая категория) не существует в природе, но может быть получено искусственно в атомных реакторах.

Благодаря тяжелому труду первых исследователей радиоактивности было построено геральдическое дерево существующих радиоактивных семейств. В книге показана схема распада уранового семейства, которая начинается со старика урана-238 и после восьми альфа- и шести бета-трансформаций заканчивается стабильным свинцом-206.

Две цифры над наименованием каждого радиоактивного элемента — это его атомное число и атомная масса, тогда как цифра под ним — это время его полураспада. Похожую схему распада можно построить для тория, протактиния и искусственно созданного (безымянного) четвертого семейства.

Закон выживаемости

Если проследить историю жизни большой группы детей, щенков, утят или каких-то других животных, родившихся в один и тот же день, окажется, что умирают они в разные дни. Одни живут чуть дольше, жизнь других несколько короче, и если нанести на график процент тех, которые были живы на заданную дату, то получится типичная кривая выживаемости, показанная на рисунке 8.2, *a*. Она показывает, что существует определенная ожидаемая продолжитель-

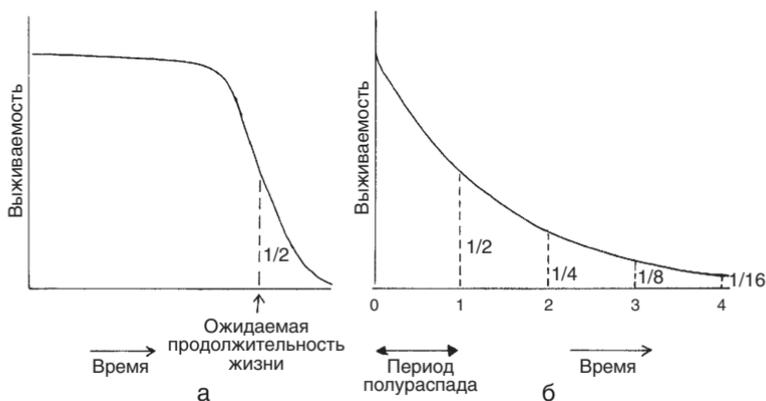


Рис. 8.2. Кривые выживаемости для животных (а) и атомов (б)

ность жизни, которая, как показано на графике, равна 75 годам для человека, 15 для собаки и всего несколькими годам для утки. Кривая показывает существование сравнительно небольших шансов, что они умрут значительно раньше этого срока, или таких же небольших шансов, что они проживут намного дольше.

В случае радиоактивных атомов ситуация совершенно иная, и для члена радиоактивного семейства, недавно возникшего в результате «реинкарнации» из его предшественника (в результате либо альфа-, либо бета-трансформации), шансы «реинкарнироваться» в следующем члене того же семейства не зависят от периода времени, который прошел с момента его возникновения. Ситуация похожа на случай с солдатами, ведущими продолжительную битву с врагом, где каждый день погибает определенный процент солдат, но нет способа сказать, чьих солдат умрет больше завтра. В этом случае мы не можем больше говорить об ожидаемой продолжительности жизни, но должны ввести несколько иное понятие периода полураспада, то есть периода времени, за которое половина нестабильных атомов распадется. (В случае солдат это период времени, за которое половина солдат будет убита.) Кривая, описывающая этот процесс, показана на рисунке 8.2, б, и математики называют ее экспоненциальной кривой. Диапазон значений периода полу-

распада для разных радиоактивных элементов очень широк. Уран распадается со скоростью 50% за 4,5 миллиона лет, радий за 1590 лет, в то же время половина атомов RaC' распадаются всего за одну десятитысячную долю секунды. Существование трех природных семейств радиоактивных веществ связано с долгим сроком существования их праотцов, урана I (или ${}_{92}\text{U}^{238}$), тория ($1,3 \times 10^{10}$ лет), и «прадедушки» протактиния (5×10^8 лет), что сравнимо с возрастом существования Вселенной.

Семейство типа $4n + 1$ не существует, потому что, как было обнаружено, когда эти атомы были получены искусственным путем в атомных реакторах, у главы семейства сравнительно короткая жизнь и, следовательно, все семейство должно было распасться много лет тому назад.

Переход через потенциальный барьер

Объяснение замедлению альфа-трансформации было дано независимо автором этой книги, который в то время работал в Германии, и группой Рональда Герни (Австралия) и Эдварда Кондона (США) и основывалось на волновой механике. Как было известно, ядра атомов окружены мощным электрическим силовым барьером, который впервые был исследован в ходе опытов Резерфорда по отклонению альфа-частиц. Когда альфа-частица приближается к ядру, на нее начинает действовать сила отталкивания, пропорциональная произведению заряда ядра (Ze) на заряд альфа-частицы, деленного на квадрат расстояния между ними. Когда частица вступает в контакт с ядром, сила сцепления между ним и частицей, формирующая ядро, затягивает частицу и крепко удерживает ее внутри. Потенциальная кривая, соответствующая этим двум силам, показана на рисунке 8.3 и напоминает вал или барьер с отвесной стеной внутри и более пологим склоном снаружи.

Для того чтобы добраться до ядра, летящие снаружи альфа-частицы должны подняться на вершину барьера, а затем упасть внутрь ядра. Аналогично частица, проникающая из ядра, должна вскарабкаться по внутренней стене барьера и скатиться вниз по его внешнему склону. Изучая

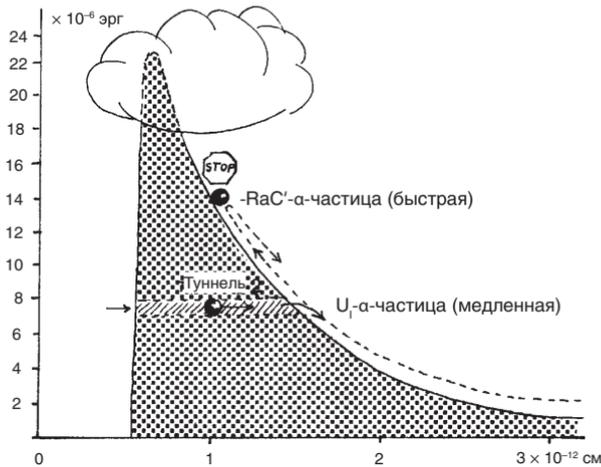


Рис. 8.3. Потенциальный барьер вокруг ядра урана, каким он был получен из опытов Резерфорда

разброс альфа-частиц урана, Резерфорд обнаружил, что барьер, окружающий ядро атома, имеет высоту, как минимум, 14×10^{-6} эрг, поскольку быстрые альфа-частицы, излучаемые RaC' и имеющие такую энергию, не проявляют никаких признаков того, что они достигли вершины. Вместе с тем альфа-частицы, излучаемые самим ураном, имеют энергию всего 8×10^{-6} эрг. Как могут исходящие частицы с такой маленькой энергией преодолевать барьер, который в несколько раз выше? Согласно классической механике, это, конечно, невозможно. Если построить на столе барьер и катить к нему шар, энергия которого составляет всего половину необходимой, чтобы добраться до вершины, то шар всегда будет добираться до половины склона, а затем скатываться назад. Но волновая механика приходит к другому выводу, и, чтобы понять это, мы должны воспользоваться аналогией между волнами де Бройля и волнами света. В геометрической оптике существует понятие «полного внутреннего отражения». Если луч света, проходящий через стекло (рис. 8.4, *a*), падает на границу AB между стеклом и воздухом под сравнительно небольшим углом, он будет преломляться, входя в воздух, и его новое направление будет

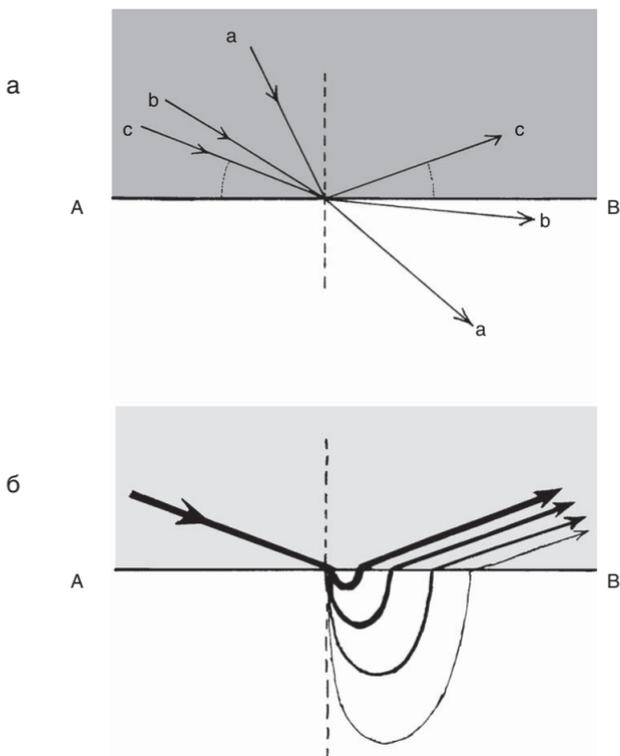


Рис. 8.4. Полное отражение света согласно геометрической оптике (а) и волновой оптике (б)

ближе к границе AB . Однако если угол падения больше определенного критического значения, никакой свет не проникнет в воздух и луч будет полностью отражаться от границы.

Однако, рассматривая явление с точки зрения волновой природы света, приходишь к другому выводу. Оказывается, что некоторое количество света *все-таки* попадает в воздух за границей AB , но он не проникает слишком далеко и оказывается отброшенным назад слоем воздуха толщиной всего несколько длин волн. На рис. 8.4, б, где линии представляют уже не лучи света, а поток лучистой энергии, показано, что происходит. Если поместить кусок стекла близко к границе AB , то некоторая часть потока, пройдя

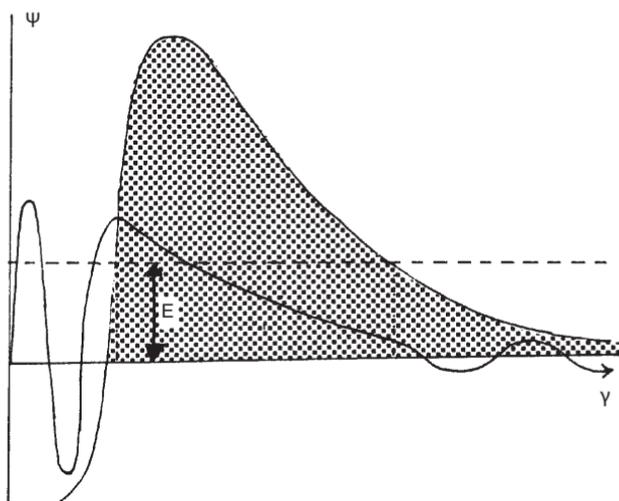


Рис. 8.5. Проникновение альфа-частиц через потенциальный барьер ядра

сквозь воздух, проникнет внутрь второго куска стекла. Это явление можно наблюдать экспериментально, если расстояние между границами равно всего нескольким длинам световой волны (то есть нескольким микронам).

Так волновая оптика допускает проникновение, которое совершенно запрещено геометрической оптикой, и точно так же волновая механика позволяет материальным частицам делать то, что было бы совершенно невозможно, если бы классическая механика была верна на все сто процентов.

Альфа-частицы, сидящие внутри ядра, находятся в состоянии очень быстрого движения, постоянно наталкиваясь на стенки окружающего их потенциального барьера. Волна де Бройля, направляющая движение этих частиц, медленно проникает сквозь стенки барьера, делая возможным их проникновение сквозь него, даже если они не могут перебраться через него сверху (рис. 8.5).

Проницаемость ядерного потенциального барьера очень мала, и в случае ядра урана только одна из 10^{38} попыток заканчивается успешно. Поскольку, двигаясь внутри пространства размером всего 10^{-12} см со скоростью 10^9 см/с,

альфа-частица достигает внутренней стенки барьера 10^{21} раз в секунду, прежде чем ей удастся выбраться наружу, проходит $10^{38}/10^{21} = 10^{17}$ с, или несколько миллиардов лет. В случае ядер RaC' проницаемость барьера выше, и удачной оказывается каждая из 10^{17} попыток. Таким образом, соответствующее время жизни становится $10^{17}/10^{21} = 10^{-4}$ с, как и наблюдалось. Расчеты периодов полураспада различных радиоактивных элементов на основании этой теории полностью совпали с экспериментальными цифрами.

Можно даже не говорить о том, что волновые явления подобного рода значимы только в мире атомов и ядер. В случае описанного выше опыта, в котором шар катили вверх по деревянному склону со скоростью недостаточной, чтобы он перебрался через барьер, еще остается шанс, что он пройдет сквозь потенциальный барьер, как древний дух сквозь стену замка. Но по расчетам, этот шанс примерно $(10^{-10})^{27}$, то есть число с 10^{27} нулей после запятой. Если попытаться написать это число, то первая значащая цифра появится по соседству самой отдаленной галактикой, которую можно увидеть в двухсотдюймовый телескоп. Так что не стоит пытаться катить этот шар вверх по склону.

Строение ядра и нейтроны

Интерпретация явления радиоактивности как спонтанного распада атомных ядер не оставляет сомнений в том, что ядра — это сложная механическая система, состоящая из многих частиц. Тот факт, что атомные массы изотопов всех элементов очень точно представимы целыми числами, указывает, что в роли одной из составляющих ядра выступают протоны. Но одних протонов не достаточно. Действительно, например, ядра углерода, имеющего атомную массу двенадцать, должны содержать 12 протонов. Но поскольку заряд ядра углерода всего 6, в нем должны присутствовать 6 отрицательных зарядов, и предполагалось, что эти отрицательные заряды обеспечивают 6 электронов, которые в соединении с 12 протонами составляют ядро углерода. Однако предположение о присутствии электронов внутри атомного

ядра приводит к очень серьезным проблемам с точки зрения квантовой теории. В самом деле, поскольку энергия квантовых состояний электрона быстро возрастает с уменьшением размеров области, в границах которой находится электрон, следует ожидать, что электроны, движущиеся внутри атомного ядра, должны иметь энергии в миллиарды электронвольт. Этот прямой вывод из квантовой теории выглядел очень странно, поскольку, если энергии такого порядка наблюдались в случае космических лучей, то энергии, участвующие в ядерных явлениях, составляли миллионы (а не миллиарды!) электронвольт. Когда Нильс Бор сказал Эрнесту Резерфорду об этой «правде жизни», они решили, что единственный способ спасти ситуацию — это предположить существование *незаряженных протонов*, которые предварительно назвали нейтронами. С таким предположением присутствия электронов в атомных ядрах совершенно не требовалось, и, например, строение ядер углерода можно было записать как: ${}_6\text{C}^{12} = 6 \text{ протонов} + 6 \text{ нейтронов}$.

В середине 20-х годов в лаборатории Кавендиша решительно стартовала программа, целью которой было вытолкнуть гипотетические нейтроны из каких-нибудь легких элементов, получив, таким образом, доказательство их существования. Но результаты были отрицательными, работы в этом направлении приостановили, и открытие нейтронов оказалось отложено на годы. И только в 1932 году ученик Резерфорда Дж. Чедвик, изучавший загадочную проникающую радиацию (которую первым наблюдал В. Боте для случая обстрела альфа-частицами мишени из бериллия), доказал, что она образована потоком нейтральных частиц с массой близкой к массе протона. Таким образом, после первоначальных ошибок в стенах лаборатории Кавендиша наконец появился на свет нейтрон.

Бета-распад и нейтроны

Если эмиссия альфа-частиц представляет собой реальный распад ядра, результат которого имеет меньшую атомную массу, то эмиссия бета-лучей — это не более чем элек-

трическая корректировка атомных ядер, происходящая вследствие эмиссии одной или более альфа-частицы. В предыдущем параграфе мы видели, что ядро атома состоит из протонов и нейтронов и что в более тяжелых элементах количество нейтронов превышает количество протонов. Например, в ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ число нейтронов $226 - 88 = 138$, а число протонов только 88, и их отношение будет $138/88 = 1,568$. Ядра ${}_{86}\text{Ra}^{222}$, полученные при альфа-распаде радия, имеют только 136 нейтронов, 86 протонов и их отношение $136/86 = 1,581$. Таким образом, в процессе альфа-распада отношение нейтронов к протонам возрастает, и после нескольких альфа-шагов оно может стать больше, чем нужно для мирного сосуществования частиц этих двух типов. В этом случае нейтрон превращается в протон с помощью эмиссии отрицательного электрона, или бета-частицы. Из приведенной выше схемы распада урана можно заметить, что бета-трансформация всегда происходит парами. Это обусловлено тем, что нейтроны и протоны в ядрах подчиняются тому же принципу Паули, что и электроны в атомах, и каждый квантовый уровень занимают два из них (с противоположными спинами). Таким образом, когда уровень становится нестабильным, две частицы одна за другой претерпевают бета-трансформацию.

В 1914 году молодой британский физик Джеймс Чедвик работал в Берлинском университете под руководством известного немецкого физика Фрица Гейгера (изобретателя счетчика Гейгера). Его занятием было изучение спектра бета-лучей, излучаемых различными радиоактивными веществами, которые, похоже, радикально отличались от альфа- и гамма-лучей тем, что демонстрировали непрерывное распределение кинетической энергии почти от нуля и до достаточно больших значений (рис. 8.6).

Осенью того года, когда работа Чедвика была закончена и отослана для публикации, разразилась Первая мировая война. Чедвика, как врага, быстро арестовали и на долгое время отправили в лагерь. Первый год в лагере был тяжелым, поскольку молодой талантливый физик не мог найти друзей среди других заключенных, которые были в основном бизнесменами, коммивояжерами и т. д. Потом, после

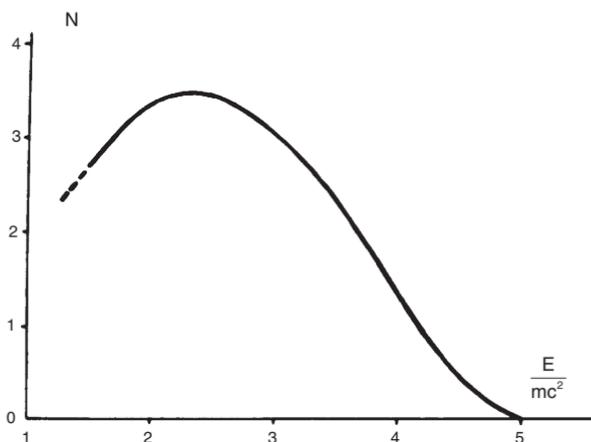


Рис. 8.6. Спектр бета-лучей в In^{114} . Каждая точка кривой — это энергия (E), выраженная в единицах mc^2 , соответствующая числу электронов (N)

крупного сражения где-то во Франции, в лагере появился новый пленник. Это был С.Д. Эллис, блестящий офицер Хайлендского полка ее величества, захваченный в плен на поле боя. Два британца стали друзьями, и, чтобы скоротать время, Чедвик начал обучать Эллиса ядерной физике. Когда война закончилась, они оба вернулись в Англию, и Эллис поступил в аспирантуру Кембриджского университета, где читал лекции Чедвик. Через несколько лет Эллис опубликовал статью, в которой представил важное расширение работы Чедвика.

Одним из возможных объяснений непрерывного спектра энергия бета-лучей могли бы стать большие потери энергии, происходящие с бета-частицами, вылетающими из радиоактивных веществ, которые их породили. Эллис разработал очень интересный эксперимент, где все бета-лучи, излучаемые радиоактивным веществом, были поглощены куском свинца, а выделившееся при этом тепло тщательно измерялось. Результат этого эксперимента показал, что общее количество высвобождаемой энергии на одну частицу в точности равно *средней* энергии электронов непрерывного спектра, подтверждая, что никаких потерь в веществе не

происходит. Таким образом, перед физиками предстала парадоксальная ситуация. В то время как излучаемые в результате серий радиоактивных трансформаций альфа-частицы всегда имеют четко определенную энергию, которая равна разнице между внутренней энергией составляющих материнского и дочернего ядер, энергии бета-частиц колеблется в широких пределах. Что происходит с разницей между энергиями двух ядер одного радиоактивного элемента, одно из которых испускает быструю бета-частицу, а другое — медленную? Нильс Бор, которого очень удивила эта парадоксальная ситуация, дошел до предположения, что в случае радиоактивной бета-трансформации закон сохранения энергии может не соблюдаться. И если в случае излучения медленной бета-частицы определенное количество энергии может исчезать в разреженном воздухе, то в случае эмиссии очень быстрой бета-частицы дополнительное количество энергии может создаваться из ничего. Согласно этой гипотезе, закон сохранения энергии в ядерных процессах соблюдался бы *только в среднем*, делая, таким образом, невозможным построение вечного двигателя первого типа (см. главу 4), основанного на радиоактивном распаде.

Вольфганг Паули, который придерживался более консервативных взглядов по этому вопросу, предложил альтернативу, которая балансировала бы энергетическую бухгалтерию в ядерных процессах. Он считал возможным, что эмиссия бета-частиц всегда сопровождается эмиссией другой «загадочной частицы», ускользающей от наблюдателей, что нарушает баланс энергии. Если предположить, что этот ядерный «багдадский вор» не имеет электрического заряда и имеет массу такую же маленькую, или даже меньше, чем у электрона, то он действительно может ускользать от самых внимательных блокпостов, расставленных физиками, унося свою долю энергии. Паули дал этим гипотетическим «воришкам» имя нейтроны. (Это было до того, как частицы, называемые теперь нейтронами, были открыты Чедвиком в 1932 году.) Но все эти споры остались достоянием частных разговоров и переписки, и это название, не будучи опубликованным в научных журналах, так и не стало «товарным знаком». Когда после открытия нейтронов (Чедвика) Энри-

ко Ферми (рис. 7.15), в то время профессор университета в Риме, рассказывал на семинаре о статье Чедвика, кто-то из слушателей спросил его, не являются ли нейтроны Чедвика теми же частицами, что и частицы, о которых говорил Паули. «Нет, — ответил Ферми, — *le neutron di Chadwick sono grande. Le neutron di Pauli erano piccolo; egli devono star chaimato „neutrini“* (Нейтрон Чедвика большой. Нейтрон Паули маленький, его стоило бы назвать нейтрино. По-итальянски «нейтрино» — это уменьшительное от «нейтрон».)

Поскольку в этой книге уже стало привычным рассказывать короткие истории о великих физиках и поскольку Энрико Ферми был одним из величайших физиков нашего времени, ниже следует небольшая история о нем, основанная на его собственных словах. За свои ранние открытия в области физики он был избран членом Итальянской королевской академии наук и получил от Бенито Муссолини титул *Eccellenza* — Совершенство. Однажды он ехал на своем маленьком «фиате» на встречу в академии, где должен был выступать сам Муссолини, и потому ворота во двор академии охраняли два карабинера. Они скрестили свои карабины перед маленькой машиной Ферми и спросили, кто он такой. «Они не поверят мне, если я скажу, что я *Eccellenza*, — подумал Ферми, — потому что все *Eccellenzas* выглядят гораздо более представительно и ездят на больших лимузинах с шофером». Поэтому он улыбнулся карабинерам и сказал, что он шофер *Eccellenza* Ферми. Это сработало, и они позволили ему проехать и подождать, когда его хозяин выйдет после встречи.

Возвращаясь к нейтрино, следует сказать, что эта частица действительно была неуловимой, и в течение долгого времени охотившимся за ней физикам-ядерщикам удавалось видеть лишь вред, который она причиняла, но поймать саму частицу они не могли. Только в 1955 году Клод Каон из Научной лаборатории Лос-Аламос сумел ее поймать. Самым интенсивным источником нейтрино были атомные реакторы, где легионы нейтрино излучались в результате бета-распада продуктов расщепления, возникающих в процессе цепной реакции. В то время как даже самые проникающие гамма-лучи и самые быстрые нейтроны эффективно оста-

навливаются с помощью толстой бетонной защиты, окружающей реактор, нейтрино пролетают сквозь нее так же легко, как стайка москитов сквозь проволочную сетку. Чтобы уловить их, Рейнс и Каон поместили снаружи от защиты огромный контейнер, заполненный водородом и окруженный батареей разнообразных счетчиков частиц. Ожидалось, что быстрый нейтрино, столкнувшись с протоном, вытолкнет наружу положительный электрон, превращая протон в нейтрон: $P + \nu \rightarrow n + e^+$; но рассчитанная теоретически вероятность такого процесса была чрезвычайно мала. Для того чтобы обнаружить этот процесс, физики использовали счетчики нейтронов и позитронов, связанные таким образом, чтобы они подавали сигнал, только когда на них одновременно попадали и нейтрон и позитрон. Поскольку вероятность такого совпадения крайне мала, одновременное срабатывание двух счетчиков могло произойти только в результате реакции, описанной выше. Проводя эксперимент с реактором на полном ходу, они получали несколько сигналов в минуту, но сигналы быстро исчезали, как только реактор останавливался. В ходе своих наблюдений физики обнаружили, что эффективная область процесса, где нейтрино превращает протон в нейтрон, составляет всего 10^{-43} см², и, значит, для того, чтобы снизить интенсивность потока нейтрино на два порядка, нужно использовать водяную защиту толщиной в сотни световых лет.

Теория трансформации нейтрон—протон с эмиссией электрона и нейтрино, разработанная Ферми, находится в идеальном согласии с экспериментальными данными, относящимися к бета-распаду. Кроме того, она послужила прототипом для всех теорий распада, разработанных позднее в связи с различными процессами трансформации элементарных частиц.

Первые взломщики атомного ядра

С тех пор как Резерфорд понял, что явление радиоактивности представляет собой спонтанную трансформацию одного химического элемента в другой, его охватило страст-

ное желание взломать атомное ядро какого-нибудь стабильного элемента и превратить его в другой элемент, реализовав, таким образом, древнюю мечту алхимиков. Когда в 1914 году разразилась Первая мировая война, Британское адмиралтейство попросило Резерфорда преобразовать лабораторию Кавендиша, директором которой он стал совсем недавно, в военный исследовательский институт по разработке противолодочного оружия для борьбы с немецкими подводными лодками. Резерфорд отказался на том основании, что у него есть гораздо более важная задача — взломать атомное ядро. Правда в том, что своей работой Резерфорд проложил дорогу для развития самого мощного вида оружия — атомных и водородных бомб, но то, что он предвидел эти разработки, неверно. На самом деле незадолго до своей смерти в 1937 году Резерфорд вступил в жаркий спор с венгерским физиком Лео Сциллардом о возможности масштабного высвобождения ядерной энергии и настаивал, что это не может быть сделано никогда. Желая доказать свою правоту, Сциллард поехал в патентное бюро и взял патент на крупномасштабные ядерные реакции. Три года спустя было осуществлено расщепление ядра урана, а еще через шесть лет в Хиросиме взорвалась первая атомная бомба, положившая конец Второй мировой войне. Резерфорд, несомненно, наблюдал за этими разработками, сидя на облаках эфира и внимая музыке сфер, но более чем вероятно, что старик думал: «И что? Теперь эти... парни используют мои открытия, чтобы убивать друг друга!»

Но, возвращаясь в 1919 год, мы должны посмотреть, что делал Резерфорд, чтобы взломать атомное ядро. Поскольку заслон из кулоновского отталкивания, окружающий атомные ядра, становится все выше и выше по мере продвижения по таблице Менделеева, наилучшие шансы дала бы бомбардировка более легких ядер. Кроме того, большая энергия альфа-частиц из быстро распадающихся радиоактивных элементов сработала бы лучше, чем из более медленных. Таким образом, в своих первых попытках Резерфорд решил обстреливать альфа-частицами RaC' ядра газа азота и, к своему огромному удовлетворению, заметил, что помимо многочисленных альфа-частиц, рассеянных ядрами азота, было

еще небольшое число быстро движущихся частиц другого типа, которые Резерфорд идентифицировал как протоны. Первые наблюдения Резерфорда были сделаны методом сцинтилляции, но вскоре исследования ядерных превращений существенно упростились благодаря использованию блестящего изобретения Вильсона, или облачной камеры Ч.Т.Р. Вильсона, исследования которого упоминались в предыдущей главе в связи с экспериментами Дж.Дж. Томсона. Она основана на том, что, если быстро движущаяся электрически заряженная частица перемещается в воздухе (или другом газе), она производит ионизацию вдоль всего своего пути. Если воздух, сквозь который проходят эти частицы, насыщен паром, то получившиеся при этом ионы становятся центрами конденсации крошечных водяных капель, и мы видим длинные тонкие следы тумана, протянувшиеся вдоль траекторий частиц. Схема облачной камеры показана на рисунке 8.7. Она состоит из металлического цилиндра C с прозрачной стеклянной крышкой G и поршнем P , верхняя поверхность которого покрашена черным. Воздух между поршнем и стеклянной крышкой изначально почти всегда насыщен водяным паром и ярко освещен источником света S через боковое окно W . Теперь представим, что у нас есть небольшое количество радиоактивного вещества на конце иглы N , которая помещена около отверстия O .

Частицы, которые выбрасываются радиоактивными атомами, полетят через камеру, ионизируя воздух вдоль своих путей. Однако, поскольку воздух не сильно насыщен паром, никакой конденсации не происходит, и положительные и отрицательные ионы, порожденные проходящими частицами, быстро воссоединяются в нейтральные молекулы. Предположим, однако, что поршень быстро тянут вниз на определенное расстояние. В результате расширения воздуха между поршнем и стеклянной крышкой температура воздуха понизится и это вызовет конденсацию водяного пара точно так же, как при формировании облаков в результате поднимающихся от поверхности земли потоков влажного воздуха. Но поскольку конденсации водяного пара существенно способствует присутствие ионов, порожденных частицами, проходящими через камеру в этот мо-

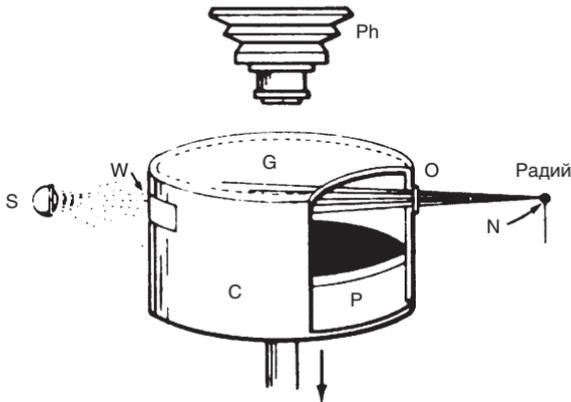


Рис. 8.7. Схема облачной камеры Ч.Т.Р. Вильсона

мент, туман будет возникать вдоль путей, по которым они двигаются, и длинные тонкие полосы тумана будут хорошо видны на черном фоне в потоке входящего через окно света. Эту картину можно наблюдать непосредственно, глядя через стеклянную крышку, или сфотографировать камерой *Ph*.

На вкладке *V сверху* мы видим первую фотографию искусственного деления ядра, сделанную в 1925 году учеником Резерфорда П.М.С. Блекетом. Многочисленные следы, ведущие из точки, находящейся за границами картинки, вызваны альфа-частицами из радиоактивного материала, помещенного в той точке. Этот материал представлял собой смесь RaC и RaC' , полученной из RaC в процессе альфа-трансформации. Альфа-частицы из RaC двигаются сравнительно медленно и останавливаются воздухом в средней части фотографии. Альфа-частицы из RaC' — одни из самых быстрых частиц, излучаемых радиоактивными элементами, — могут проходить через более толстые слои воздуха, и их следы заканчиваются в верхней части картины. В середине верхней фотографии мы видим вилку, получившуюся благодаря трансформации ядра азота под действием альфа-частицы. Тонкий длинный след, идущий влево, принадлежит протону, выбитому из этого ядра, в то время как тонкий след, идущий вверх, как было показано, принад-

лежит быстро движущемуся ядру кислорода. Алхимическая трансформация, имеющая место в этом случае, может быть представлена формулой: ${}_7\text{N}^{14} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{H}^1$, где нижние индексы — это атомный номер, а верхние — это атомная масса. Атом ${}_8\text{O}^{17}$ представляет собой более тяжелый изотоп обычного кислорода ${}_8\text{O}^{16}$ и в небольших количествах содержится в атмосферном воздухе. Измерив полученные в результате этой реакции энергии ${}_1\text{H}^1$ и ${}_8\text{O}^{17}$, что можно сделать на основании длин их путей, обнаружим, что она меньше, чем первоначальная энергия альфа-частицы, на величину 1,26 мэв. Для совокупных масс правой и левой части приведенного выше уравнения реакции имеем:

$$\begin{array}{r} \text{N}^{14} = 14,00755 \\ \text{He}^4 = 4,00388 \\ \hline 18,01143 \end{array} \qquad \begin{array}{r} \text{O}^{17} = 1,00813 \\ \text{H}^1 = 17,00453 \\ \hline 18,01266 \end{array}$$

Таким образом, баланс энергии в данном случае отрицательный и равняется $-0,00125$ единицы, что эквивалентно -116 мэв. Эта цифра с точностью до погрешности эксперимента соответствует приведенному выше значению потери энергии в ходе реакции. Измерения подобного рода стали первым прямым экспериментальным доказательством закона Эйнштейна об эквивалентности энергии и массы. Таким образом, в данной реакции ядерная энергия не высвобождается, а теряется. Однако в других случаях, таких как альфа-бомбардировка алюминия, существенное количество ядерной энергии высвобождается.

Поскольку альфа-частицы являются единственными тяжелыми снарядами, излучаемыми природными радиоактивными элементами, ранние работы по искусственным ядерным превращениям были ограничены только этим типом реакции. В 1939 году автор этой книги, работавший в Кембридже с лордом Резерфордом, рассчитал на основании теории потенциального барьера, что протоны были бы гораздо лучшими снарядами и благодаря их меньшему электрическому заряду, и благодаря их меньшей массе. На самом деле расчеты показали, что протоны, ускоренные электрическим потенциалом в один миллион вольт и движущиеся с энер-

гией в несколько раз меньшей, чем у альфа-частиц из RaC', должны производить заметное расщепление легких элементов. Резерфорд попросил своих учеников Дж. Кокрофта (теперь сэра Джона) и Э.Т.С. Уолтона сконструировать прибор высокого напряжения, который мог бы создавать потоки протонов с такой энергией, и в 1931 году первый ускоритель заработал. Направляя поток протонов на литиевую мишень, Кокрофт и Уолтон доказали, что при каждом успешном ударе от точки столкновения в противоположных направлениях летели две свежеполученные альфа-частицы. Реакция была следующей: ${}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{H}^1 \rightarrow 2{}_2\text{He}^4$. Заменяв литий бором, они увидели тройные вилки (вкладка V, *снизу*), которые указывали, что после удара протоном ядро бора расщепилось на три равных фрагмента: ${}_5\text{B}^{11} + {}_1\text{H}^1 \rightarrow 3{}_2\text{He}^4$.

За пионерской работой Кокрофта и Уолтона последовало создание все новых и новых ускорителей, основанных на разнообразных остроумных идеях. Один из них, названный по имени своего создателя ускорителем Ван де Граафа, базировался на простом принципе электростатики, согласно которому электрический заряд, проникший через отверстие внутрь полой металлической сферы, распределяется вдоль ее внешней поверхности. Действительно, сила взаимного отталкивания между электронами, загнанными внутрь, будет двигать их как можно дальше друг от друга. Генератор Ван де Граафа состоит из большой изолированной металлической сферы и подвижной ленты, которая непрерывно заряжается снаружи и разряжается после входа внутрь сферы. Несмотря на то что напряжение, которое можно было получить с помощью генератора Ван де Граафа, ограничено несколькими миллионами вольт, он представлял собой прочное компактное устройство, очень удобное для проведения многих видов лабораторных работ.

Другой, гораздо более оригинальный прибор для ускорения ядерных частиц был разработан Эрнестом Орландо Лоренцом, имя которого носит теперь Радиационная лаборатория Калифорнийского университета. Он основан на совершенно другом принципе и использует многократное ускорение заряженных частиц, движущихся по кругу в магнитном поле. Принцип этого циклотрона показан на рис. 8.8. Он

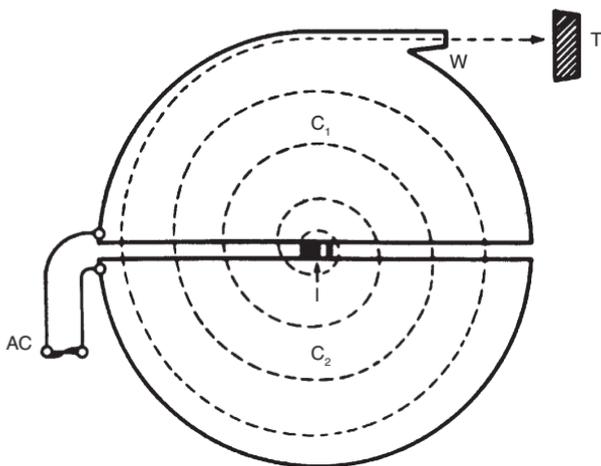


Рис. 8.8. Принцип циклотрона

состоит в основном из круглой металлической камеры, разрезанной на две половины C_1 и C_2 , помещенные между полюсами очень сильного электромагнита. Половинные камеры C_1 и C_2 соединены с источником высокого переменного электрического напряжения AC , так что электрическое поле вдоль разделяющей их щели периодически меняет свое направление. Ионы элемента, которые будут использованы в качестве снарядов, впрыскиваются в центр конструкции I на сравнительно низкой скорости, и их траектории с помощью магнитного поля изгибаются в виде маленьких кругов. Хитрость этого циклотрона в том, что для заданного магнитного поля период вращения электрически заряженной частицы по ее круговой траектории не зависит от скорости, с которой движется эта частица. Поскольку увеличение радиуса пути и длины круговой траектории пропорциональны увеличению скорости, время, необходимое для одного цикла вращения, остается неизменным.

Если все организовано таким образом, что период вращения ионов, впрыснутых в поле магнита, равен периоду изменения напряжения, подаваемого от источника AC , то частицы, доходящие до границы между двумя половинны-

ми камерами C_1 и C_2 , будут каждый раз подвергаться воздействию силы, действующей в том же направлении, в котором движутся частицы. Таким образом, каждый раз, когда ион проходит через эту границу, он будет получать дополнительное ускорение и его скорость будет постепенно расти. Набрав скорость, тоны будут двигаться по траектории раскручивающейся спирали и в конце концов будут выброшены в окно W в направлении мишени T .

На верхней фотографии вкладки VI показан циклотрон, созданный в Университете Колорадо, чтобы производить потоки протонов с энергией около 30 мэв. Можно ясно разглядеть верхнюю часть большого электромагнита и опорную балку. Беватрон Калифорнийского университета (нижняя фотография вкладки VI) и лонг-айлендовский космотрон представляют собой дальнейшее развитие принципа циклотрона.

Описывая результаты своих экспериментов по ядерным трансформациям, полученным с помощью бомбардировки различных материалов быстро движущимися ядерными снарядами, физики всегда говорят об эффективных поперечных сечениях, или просто эффективных сечениях. Чтобы понять смысл этого понятия, рассмотрим случай зенитной батареи, пытающейся сбить приближающееся воздушное судно врага. Если враг был настолько глуп, чтобы послать дирижабль (рис. 8.9, *a*), любое попадание в него будет фатальным, и эффективное поперечное сечение будет эквивалентно геометрическому поперечному сечению судна.

Однако в случае самолета (рис. 8.9, *б*) осколки снаряда могут попадать во многие места его корпуса, но так и не собьют его. Есть только несколько зон, как, например, голова и тело пилота, а также жизненно важные части двигателя и рулевого управления, куда необходимо попасть, чтобы сбить самолет. Совокупный профиль этих мест называется эффективным сечением, и по сравнению с самим объектом оно может быть маленьким. Так, например, эффективным сечением Ахиллеса была область всего несколько квадратных дюймов, расположенная на его левой пятке.

При рассмотрении вероятности разрушительного исхода для вражеского воздушного судна или для атомного ядра

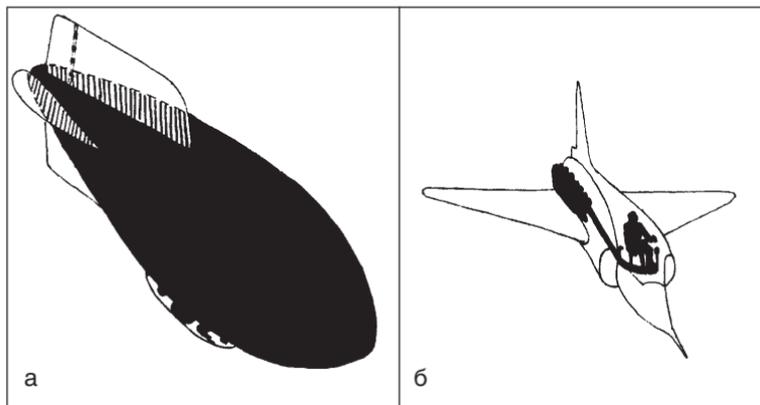


Рис. 8.9. «Убийственное сечение» (черная область) дирижабля (а) и самолета (б), в котором предположительно установлены бензобаки, самоустраивающиеся течь

интерес представляют только те части корпуса, в которые нужно попасть, и это не обязательно точное попадание в чувствительные места. Это похоже на ситуацию с двумя дуэлянтами, один из которых очень худой, а другой очень толстый. Толстый возражает, что ситуация несправедлива, поскольку он представляет собой гораздо более крупную мишень для пулевой пули, чем его противник. «Ладно, — говорит худой, — попросите своего секунданта нарисовать мелом мой силуэт на вашем пальто, и, если я попаду за границы этой линии, выстрел не считается».

Радиус атомного ядра — это величина порядка 10^{-12} см, так что его геометрическое поперечное сечение составляет около 10^{-24} см². Поперечное сечение, в точности равное 10^{-24} см², называется барн. Барн является стандартной единицей измерения поперечного сечения ядра. Если ядро расщепляется каждый раз, когда в него попадают, то его эффективное сечение равно 1 барн или около того. Однако если по той или иной причине для этого нужно, скажем, сто попаданий, то эффективное сечение равно 0,01 барн, или 10^{-26} см². Далее при описании процессов бомбардировки читатель встретит примеры эффективного сечения еще меньших размеров.

Строение ядра и стабильность

В то время как электроны свободно летают в пространстве, покрывая расстояния, которые в несколько тысяч раз больше их диаметра, протоны и нейтроны, составляющие ядро атома, набиты в него так плотно, что сидят как селедки в бочке (рис. 8.10).

Таким образом, если в случае атома можно говорить об электронной атмосфере, обладающей многими свойствами обычного газа, вещество ядра больше похоже на каплю жидкости, в которой молекулы удерживаются вместе силами сцепления. Такая «капельная модель» ядра, предложенная автором этой книги около тридцати лет тому назад, позволяет нам понять многие свойства ядра. Прежде всего, в то время как газы могут легко сжиматься, благодаря большому объему свободного пространства между частицами, жидкости меняют свой объем очень мало, каким бы ни было оказанное на них давление. И правда, мы уже видели, что по ходу таблицы Менделеева объем атомов остается практически неизменным, хотя на квантовых орбитах все меньших и меньших диаметров размещается все больше и больше электронов. Вместе с тем измерения показывают, что радиус атомного ядра возрастает как корень кубический его массы, так что объем возрастает, как масса, а плотность остается постоянной. Плотность этой ядерной жидкости — капель, составляющих ядро атома, — превышает плотность воды в 10^{14} раз, и стаканчик, наполненный такой жидкостью, весил бы пять миллиардов тонн! Как любая другая жидкость, ядерная жидкость обладает свойством поверхностного натяжения, поскольку нуклоны, расположенные на поверхности, притягиваются силой сцепления к нуклонам, находящимся внутри, и, таким образом, стремятся уменьшить площадь поверхности до минимума. Но, как и в случае с плотностью, поверхностное натяжение ядерной жидкости во много раз больше, чем у обычных жидкостей. Если нанести мыльную пленку на проволоку, изогнутую в форме буквы U, и прямой кусок проволоки, проложенный поперек нее, сила поверхностного натяжения, действующая на подвижный кусок проволоки, сможет

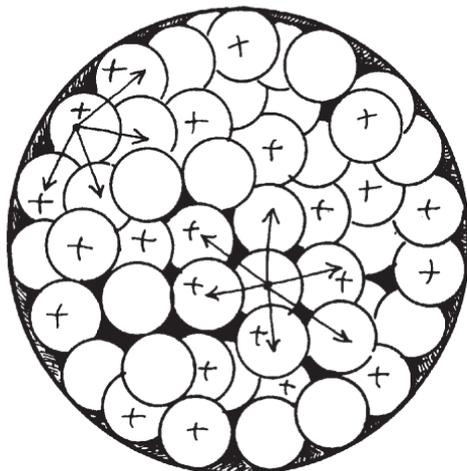


Рис. 8.10. Атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов. Те, что находятся внутри, не испытывают действия каких-либо сил, тогда как на те, что находятся на поверхности, тянет внутрь

выдержать вес около 70 мг/см его длины. Если бы мы проделали то же самое с ядерной жидкостью, эта сила была бы десять миллиардов тонн. Благодаря поверхностному натяжению, атомные ядра имеют почти идеально круглую форму, как капли дождя, а вибрация и вращение этих крошечных капелек, вероятно, являются причиной эмиссии гамма-лучей возбужденными ядрами.

Однако физик из Принстона Джон Уилер показал, что капли ядерной жидкости существуют не только в форме маленьких шариков, но в принципе могут иметь и другие формы. Дело в том, что помимо сил ядерного сцепления между положительно заряженными протонами существуют кулоновские силы отталкивания. В одной неопубликованной статье Уилер показал, что существование этих сил отталкивания позволяет атомной жидкости принимать форму баранки. В действительности в этом случае силам поверхностного натяжения, стремящимся стянуть баранку в шар, противостоят электрические силы отталкивания между противоположными сторонами баранки и конфигурация в целом будет совершенно стабильной. Такое ядро-баранка,

которое может быть существенно больше, чем ядро урана, и иметь многотысячную атомную массу, будет окружено электронами, движущимися близко к его поверхности по траекториям, похожим на обмотку круглого электромагнита. Такие ядра-баранки не существуют в природе, и трудно поверить, что даже самые искусные физики смогут получить их в будущем. Но если бы это удалось сделать, замечает Уилер, их можно было бы использовать, как звенья длинных цепочек. Нить, сделанная из таких ядерных звеньев, была бы исключительно прочной, и, будучи тонкой, как паутина, она смогла бы выдержать вес военного корабля. Но в то же время она была бы очень тяжелой, и 1 ярд весил бы около 1000 тонн.

Не похоже, чтобы ядра-баранки Уилера когда-нибудь нашли практическое применение, но более простые формы ядра, созданные теми же двумя силами, открыли для нас эру атомной энергии. Давайте рассмотрим баланс между поверхностным натяжением и электрической энергией атомного ядра. Совокупная поверхностная энергия, естественно, пропорциональна его поверхности и возрастает с увеличением размеров ядер. Поскольку плотность ядерной жидкости остается постоянной, ее объем пропорционален массе (атомной массе), а радиус — кубическому корню массы. Таким образом, общая энергия поверхности, будучи пропорциональна поверхности, возрастает, как квадрат кубического корня массы, или, иными словами, как масса в степени две третьих. Чтобы вычислить кулоновскую энергию, мы должны использовать закон электростатики, который гласит, что энергия заряженного сферического тела прямо пропорциональна квадрату его заряда и обратно пропорциональна его радиусу. Электрический заряд ядра дает его атомный номер, который примерно пропорционален его атомной массе. Вспомнив, что радиус меняется, как кубический корень атомной массы, получаем, что кулоновская энергия возрастает примерно как атомная масса в степени $1^{2/3}$. Это гораздо более быстрый рост, чем рост поверхностной энергии, и мы приходим к выводу, что, в то время как в легком ядре силы электрического отталкивания могут играть небольшую роль, в тяжелых ядрах они

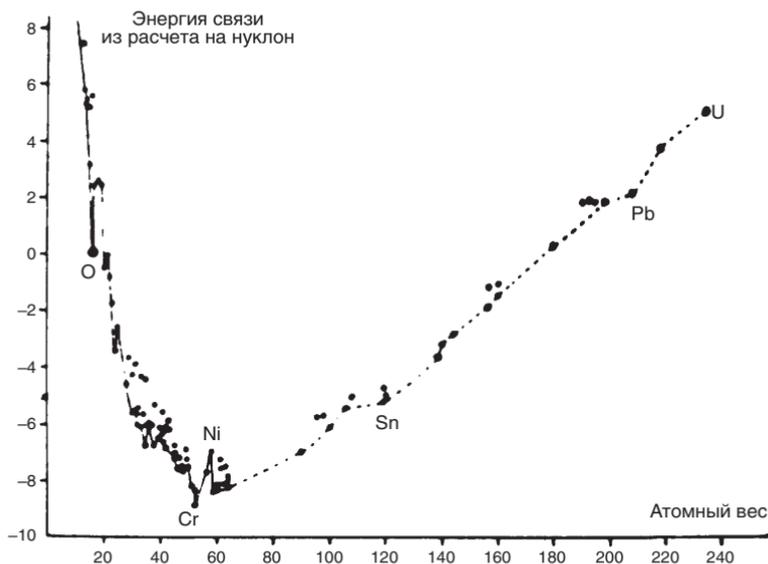


Рис. 8.11. Энергия связи из расчета на нуклон как функция атомного веса

могут стать очень существенными. Поскольку силы поверхностного натяжения стремятся удержать капли жидкости вместе и слить две соприкоснувшиеся капли в одну большую, следует ожидать, что в случае легких элементов энергия будет высвобождаться в процессах ядерного слияния. С другой стороны, в случае тяжелого ядра верх возьмут разрушительные силы, и энергия будет высвобождаться в процессе расщепления. Расчеты показывают, что «область слияния» охватывает около одной трети пути по таблице Менделеева, и по мере приближения к ее границе высвобождающаяся энергия будет все меньше и меньше. «Область расщепления», которая начинается в этой точке, сначала соответствует высвобождению сравнительно небольшой энергии, которая быстро растет, достигая наибольших значений для тяжелых элементов. Таким образом, каждый химический элемент представляет собой потенциальный источник ядерной энергии, и вопрос только в том, как запустить ядерную реакцию и обеспечить ее ход.

Жидкостно-капельная модель атомного ядра является очень хорошим приближением к реальности, но не следует забывать, что протоны и нейтроны внутри ядра подчиняются тем же квантовым законам, что и электроны в атоме, и это непременно вызовет некоторое отклонение от упрощенной картины, описанной выше. И в самом деле, при более детальном изучении свойств ядер такие отклонения были обнаружены. На рисунке 8.11 показано изменение энергии связи на один нуклон для всего спектра от самых легких до самых тяжелых ядер. Видно, что в первой части последовательности энергия связи постоянно снижается, а во второй медленно растет, что соответствует областям слияния и расщепления.

Но видно также, что эта кривая не совсем гладкая и существует некоторое число отскоков, указывающих на необычно сильную связь между нуклонами. Эти места соответствуют заполненным нуклонным оболочкам ядер и являются аналогами заполненных электронных оболочек атомов. В случае атомов элементы с заполненными электронными оболочками (благородные газы) являются химически инертными, поскольку они «полностью» насыщены своими наборами электронов.

Похожий эффект для случая ядра показан на рисунке 8.12, где представлены относительные вероятности того, что подлетевший нейтрон будет захвачен ядрами различных элементов. Для определенного числа нейтронов (50, 82, 126), уже присутствующих в ядре, вероятность захвата еще одного нейтрона резко падает, указывая на то, что эти ядра содержат заполненные нейтронные оболочки.

Изучение этих и многих других неравномерностей в свойствах ядер приводит к выводу, что сильно связанные внутренние оболочки формируются в ядре, когда число нейтронов либо протонов одно из следующих: 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126. Однако нужно заметить, что, если в атоме каждый новый электрон оболочки размещается исключительно снаружи по отношению к предыдущему, нейтронная и протонная оболочки в ядре взаимопроникают друг друга, занимая ядерный объем. Это отсутствие геометрического разделения между нуклонными оболочками ядер де-

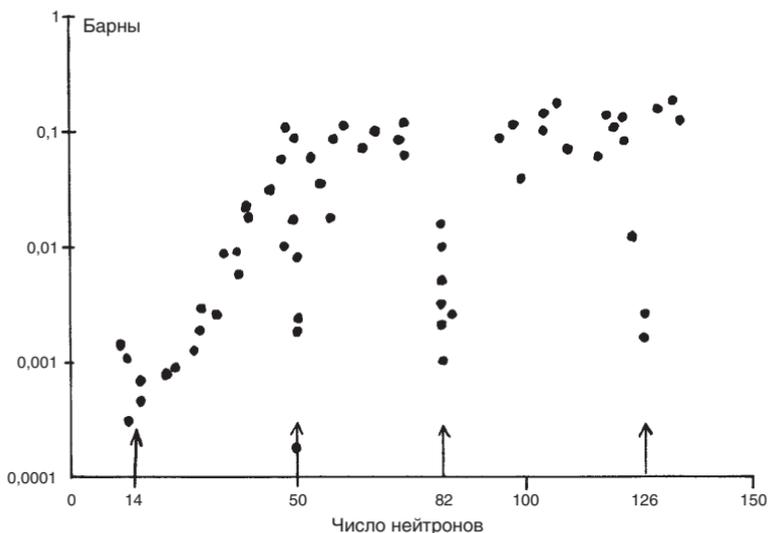


Рис. 8.12. «Сечение захвата» нейтронов, как функция числа нейтронов в ядрах

дает их воздействие менее выраженным и более труднообъяснимым. Тем не менее эта трудность была преодолена одновременно и независимо Марией Гёпперт Майер в Чикаго и Хансом Йенсенем в Гейдельберге, которые смогли построить заполненную оболочечную систему ядра, полностью соответствовавшую экспериментальным фактам. Когда они встретились, чтобы сравнить свои результаты, обнаружили, что родились в один и тот же день одного и того же года, и после этого стали добрыми друзьями.

Цепная реакция расщепления

27 января 1939 года в Вашингтоне состоялась небольшая конференция по теоретической физике, организованная совместно Университетом Джорджа Вашингтона (где в то время преподавал автор) и вашингтонским Институтом Карнеги. В тот день Нильс Бор, который был одним из почетных гостей, получил письмо от немецкого физика Лизы

Мейтнер, тогда (из-за Гитлера) работавшей в Стокгольме. Она писала, что получила письмо от своего бывшего коллеги Отто Гана из Берлина, сообщавшего ей, что его ассистент Фриц Штрассман, бомбардируя уран нейтронами, обнаружил присутствие бария, элемента, находящегося в середине таблицы Менделеева. Мейтнер и ее племянник Отто Фирш, который уехал в Стокгольм вместе с ней, полагали, что это могло быть результатом расщепления, то есть деления ядра урана на две части после удара нейтроном. Как только Бор прочитал эту телеграмму участникам, обсуждение немедленно отошло от не слишком увлекательной темы конференции и разгорелся жаркий спор о том, может ли расщепление ядра урана привести к масштабному высвобождению ядерной энергии. Энрико Ферми, который тоже принимал участие в конференции, вышел к доске и написал несколько формул, относящихся к процессу расщепления. Корреспондент вашингтонской газеты, благополучно дремавший во время предыдущей части встречи, проснулся и стал записывать, но Мерле Туве — физик-ядерщик из Института Карнеги — быстро указал ему на дверь, говоря, что обсуждаемая тема слишком узко профессиональна. Это был первый шаг по обеспечению безопасности, которая очень быстро распространилась на все, что касалось разработок в области атомной энергии. Но то, что этот репортер успел услышать, пока его не выставили за дверь, попало в газеты, и на следующее утро автора этой книги разбудил междугородный звонок из Калифорнии от Роберта Оппенгеймера, желавшего узнать, в чем дело. И началось.

Статья по теории ядерного расщепления, написанная Нильсом Бором и Джоном Уилером, которую опубликовали в сентябрьском номере 1939 года журнала *The Physical Review*, была первой и последней публикацией на эту тему, после чего занавес секретности опустился. В этой статье за основу была взята капельная модель ядра, описанная выше. Когда в ядро попадает летящий нейтрон, оно начинает вибрировать, последовательно принимая ряд вытянутых форм; равновесие между силой поверхностного натяжения и электрическими силами нарушается, причем первая пытается

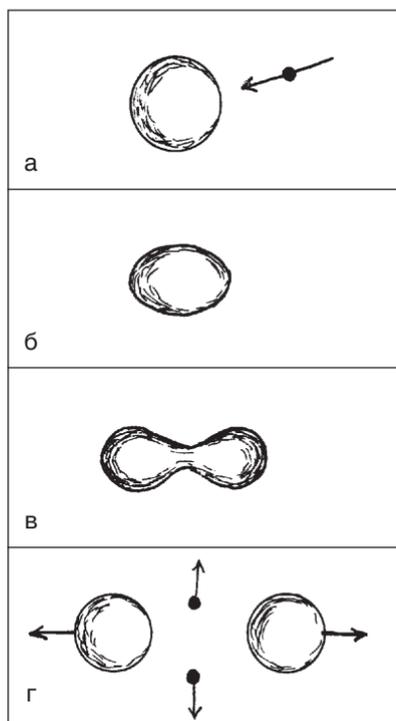


Рис. 8.13. Расщепление тяжелых ядер в результате нейтронного удара

ся вернуть ядро в его первоначальную форму, а вторые пытаются растянуть его еще сильнее. Если отношение большой и малой осей эллипсоида превышает определенный предел, в экваториальной плоскости появляется сужение и ядро аккуратно раскалывается на две половинки (рис. 8.13).

Вскоре было обнаружено, что расщепление ядра урана сопровождается выбросом пары (более точно 2,5) нейтронов, которые, в свою очередь, могут попасть в находящиеся рядом ядра и расщепить их. Это порождает четыре новых нейтрона, раскалывающие четыре других ядра... Таким образом может развиваться цепная реакция, которая быстро охватывает весь кусок урана и сопровождается высвобождением огромного количества ядерной энергии.

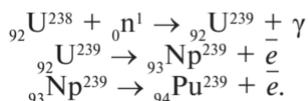
Трудно писать о том, что обычно называется «атомная энергия». В первое время, когда большая часть фактов и данных была скрыта под плотной завесой секретности, оставалось мало того, о чем можно открыто сказать. Однако теперь, когда огромное количество информации можно найти в журнальных и газетных статьях и многочисленных книгах, эта тема стала в каком-то смысле скучной и тривиальной. Кроме того, хотя расщепление уранового ядра можно считать очень интересным параграфом (но только параграфом) в истории физики, создание атомных бомб и реакторов перешло в разряд технологий. Таким образом, если не считать перепечатки (на вкладке VII) двух фотографий: атомной бомбы и реактора (типа плавательного бассейна), в этом разделе будут обсуждаться только самые существенные этапы.

Сначала физикам пришлось столкнуться с неприятным фактом, который обнаружился примерно в то же время, когда проходила конференция, о которой говорилось выше, а именно что явление расщепления демонстрирует не основной изотоп урана, а очень редкий изотоп U^{235} , составляющий всего 0,7%. Кроме того, основной изотоп U^{238} , составляющий оставшиеся 99,3% природного урана, не такая безобидная примесь, поскольку у него очень хороший аппетит в отношении нейтронов, которые он захватывает с такой скоростью, что гасит любую цепную реакцию, способную начаться в U^{235} . Существовало только два способа справиться с этой ситуацией: либо отделять U^{235} от вредоносного U^{238} , либо так или иначе попытаться запустить реакцию в природном уране, стараясь не позволять U^{238} хватать его добычу.

Оба способа были опробованы. На сверхсекретном заводе в Оак-Ридж, штат Теннесси, исследовали различные методы разделения изотопов урана и в конце концов остановились на методе диффузии, основанном на том, что соединения, содержащие легкий изотоп, проходят через протонные мембраны несколько быстрее, чем те, которые содержат тяжелый изотоп.

Всевозможные детали, необходимые для запуска реакции в природном уране, были в основном разработаны Эн-

рико Ферми и основывались на принципе модерации. Выяснилось, что аппетит тяжелого изотопа урана направлен в основном на быстродвижущиеся нейтроны, тогда как легкий изотоп предпочитает более медленные. Поскольку нейтроны, излучаемые при делении ядра урана, имеют очень большие скорости, нужно замедлить их настолько, чтобы они стали удовлетворять потребностям U^{235} и сделать это достаточно быстро, пока U^{238} не успел их поглотить. Этого можно добиться, смешав природный уран с большим количеством так называемого модератора, то есть вещества, атомы которого, совсем не захватывая нейтроны, снижают их кинетическую энергию в процессе столкновений. Двумя наилучшими модераторами оказались атомы дейтерия (тяжелого изотопа водорода) и атомы углерода, что определило создание двух типов реакторов, использующихся в настоящее время (углеродный и водяной). Первый атомный реактор, использующий углеродный модератор (графитовые стержни) и построенный под руководством Ферми под трибунами стадиона Чикагского университета, начал работать 2 декабря 1941 года. Конечно, цепная реакция в модулируемых реакторах идет очень медленно, и производимая энергия не может быть использована ни в военных, ни в мирных целях. Но есть одна штука! В то время как цепная реакция деления проходит в ядрах U^{235} , некоторые нейтроны заглатывают прожорливые ядра U^{238} , который, благодаря модератору, не допущен на этот Лукуллов пир. То, что происходит, когда ядро U^{238} заглатывает нейтрон, описывается следующими алхимическими уравнениями:



Np и Pu обозначают *нептуний* и *плутоний*, два трансурановых элемента, получаемых в атомном реакторе. Если нептуний — это всего лишь промежуточная стадия процесса, то плутоний — это действительно кое-что! Он обладает теми же свойствами, что и U^{235} , только намного более сильными. Под ударом нейтрона он раскалывается намного

легче, и его деление сопровождается большим количеством вторичных нейтронов. И что, конечно, самое главное, плутоний, имеющий отличные от урана химические свойства, можно с легкостью (как говорят) отделить от остатков урана, когда процесс в реакторе завершен.

Атомные бомбы и атомные реакторы

Самым важным понятием во всех обсуждениях, касающихся цепной реакции деления, является понятие *критического размера*. Когда внутри заданного образца происходит единичный процесс деления чистого U^{235} или Pu^{239} , из точки, где произошло деление, выбрасывается несколько нейтронов (в среднем 2,5 для урана и 2,9 для плутония). Среднее расстояние, которое нейтрон должен пройти в веществе, чтобы попасть в другое ядро, составляет около 10 см, так что, если размер образца меньше этого, большинство нейтронов пройдут сквозь поверхность образца и улетят, прежде чем у них будет шанс вызвать еще одно деление и породить еще больше нейтронов. Таким образом, если образец слишком мал, то никакой цепной реакции не произойдет. Переходя к все более и более крупным образцам, обнаруживаем, что все больше и больше нейтронов, появившихся внутри, получают шанс столкнуться с другим ядром, прежде чем они выйдут за пределы поверхности образца, и для образцов определенного размера число нейтронов, которые вызывают очередное деление ядра внутри образца, становится достаточно большим, чтобы быстро увеличить скорость реакции. Для заданного вещества размер образца, для которого процент нейтронов, вызывающих процесс деления, становится достаточно большим, чтобы обеспечить развитие цепной реакции, называется *критическим размером*. Поскольку число нейтронов на одно деление в случае плутония больше, чем в случае U^{235} , критический размер образцов плутония меньше, чем образцов U^{235} , ведь для первого допустима потеря большего числа нейтронов, выходящих за пределы его поверхности.

Для того чтобы произвести ядерный взрыв, нужно создать сверхкритический образец делящегося вещества в течение временного периода, достаточно короткого, чтобы не допустить в нем развития цепной реакции сколь-нибудь значительной силы. Это можно сделать, например, выстрелив в одну субкритическую массу другой субкритической массой с достаточно высокой скоростью, чтобы цепная реакция не успела заметно развиться до того, как будет достигнуто их полное «слияние». Существуют и более искусные методы добиться того же результата.

Если кто-то хочет запустить цепную реакцию в контролируемых условиях, чтобы использовать ее для получения электроэнергии, размер образца следует все время поддерживать как можно ближе к критическому. Необходимо помнить, что ядерная цепная реакция по природе своей является взрывной реакцией, и любая попытка провести ее с неизменной скоростью сравнима с попыткой обеспечить ровное горение печи, используя в качестве топлива тротил. Но на самом деле это можно сделать с очень хорошими шансами на удачу. Добиться этого можно, используя управляющие стержни, содержащие вещества, поглощающие нейтроны (например, бор), которые автоматически опускаются внутрь или поднимаются наружу из узких каналов, проделанных в делящемся веществе, как только скорость реакции уменьшается или возрастает выше желаемого уровня.

Сегодня атомные реакторы успешно используются для получения электроэнергии, а также в атомных подводных лодках и ледоколах.

Термоядерные реакции

Многие века астрономов и физиков интересовало, что заставляет Солнце (и все другие звезда) сиять. Очевидно, что обычного «горения» здесь недостаточно, поскольку, даже если бы солнечное вещество было самым лучшим авиационным керосином, его бы не хватило на весь период от египетских пирамид до наших дней. Более ста лет

назад Герман фон Гельмгольц в Германии и лорд Кельвин в Англии предположили, что Солнцу удается поддерживать излучение света и тепла благодаря медленному сжатию своего тела. Расчеты показали, что при сжатии Солнца от его первоначального очень большого размера до нынешнего состояния высвободившейся энергии хватило бы, чтобы поддерживать излучение на протяжении ста миллионов лет. Но более новые оценки возраста Солнечной системы ясно показали, что даже этой огромной цифры недостаточно и что Солнце должно было светить, как минимум, несколько миллиардов лет. Единственным способом объяснить такое долгое существование Солнца было предположить, что свою энергию оно получает от каких-то ядерных трансформаций, и в 1929 году британский астроном Роберт Аткинсон и австрийский физик Фриц Хоутерманс объединили усилия, чтобы проверить, так ли это. Их идея состояла в том, что термальные столкновения между атомами внутри горячего Солнца могут вызывать какие-то ядерные реакции, проходящие достаточно быстро, чтобы давать необходимое количество энергии. Исследования британского астронома сэра Артура Эддингтона показали, что температура внутри Солнца должна быть порядка 20 миллионов градусов, что соответствует энергии теплового движения около 4×10^{-9} эрг на одну частицу. Эта энергия в несколько сот раз меньше, чем энергия атомных снарядов, используемых в обычных экспериментах по искусственной трансформации элементов. Но нужно иметь в виду, что если искусственно ускоренные ядерные снаряды быстро теряют свою первоначальную энергию и имеют мало шансов попасть в ядро мишени прежде, чем выйдут из игры, то тепловое движение длится бесконечно и участвующие в нем частицы сталкиваются друг с другом в течение неограниченного времени. Пользуясь теорией механически-волнового проникновения через ядерные потенциальные барьеры, которая была разработана всего год назад, Хоутерманс и Аткинсон смогли показать, что при температурах и расстояниях, имеющихся внутри Солнца, *термоядерные реакции* между ядрами (протонами) водорода и ядрами других легких элементов могут высвобождают до-

статочное количество энергии, чтобы обеспечить солнечное излучение. Эта теория была предложена до проведения экспериментов Кокрофта и Уолтона по искусственной трансформации элементов с помощью бомбардировки протонами, и было очень мало информации о том, что происходит, когда протоны попадают в различные легкие ядра. В то время Хоутерманс и Аткинсон предположили, что должны существовать легкие ядра, обладающие способностью захватывать протоны и удерживать их на определенный период времени. После того как захвачен четвертый протон, внутри протонной ловушки появляется альфа-частица, и при ее выбрасывании высвобождается большое количество ядерной энергии. Свою статью, опубликованную в 1929 году в немецком журнале *Zeitschrift für Physik*, они предварительно назвали «Как приготовить ядра гелия в потенциальном горшке?», но редактор журнала, у которого отсутствовало чувство юмора, изменил название на более традиционное.

Лет через десять, когда было собрано достаточно информации относительно трансформации легких ядер после удара протоном, «ядро, улавливающее протоны» Хоутерманса и Аткинсона было идентифицировано как углерод. Ханс Бете в Соединенных Штатах и Карл фон Вейцзекер в Германии независимо предложили гипотезу так называемого *углеродного цикла*, изображенного на рис. 8.14. В этой серии ядерных реакций четыре протона последовательно захватываются ядром атома углерода, и после трансформации двух из них в нейтроны выбрасывается альфа-частица. Общее время цикла составляет 6 млн лет, и высвобождаемая энергия составляет 4×10^{-5} эрг. Поскольку согласно имеющейся информации относительно химического состава Солнца каждый грамм солнечного вещества содержит 0,0001 г углерода (5×10^{18} атомов углерода), общая скорость высвобождения энергии во время углеродного цикла равна 1 эрг на грамм в секунду, что составляет всего 0,1% от скорости, с которой должна рождаться энергия внутри Солнца.

Одновременно с этой выпускник университета Джорджа Вашингтона Чарльз Кричфилд выдвинул другую гипотезу.

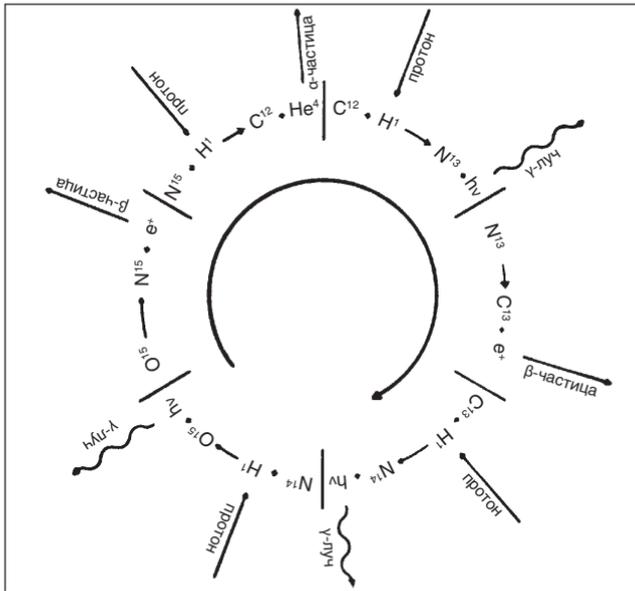
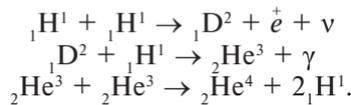


Рис. 8.14. Углеродный цикл, порождающий термоядерную реакцию в звездах

Его идея состояла в том, что если при столкновении между двумя протонами один из протонов превращается в нейтрон с эмиссией положительного электрона, то может возникнуть ядро дейтерия (тяжелого изотопа водорода). В результате последовательности реакций дейтерий превратился бы в гелий, что означало бы тот же результат, что и для углеродного цикла, но полученный гораздо быстрее. Реакции, входящие в этот так называемый водородный цикл, выглядят следующим образом:



При температуре 20 млн градусов эта реакция занимает 3×10^9 лет и высвобождает 4×10^{-5} эрг на протон. Поскольку водород составляет около половины солнечного вещества (2×10^{23} атомов на грамм), общая скорость вы-

свобождения энергии составляет около 100 эрг/г в секунду, что хорошо согласуется с результатами наблюдений.

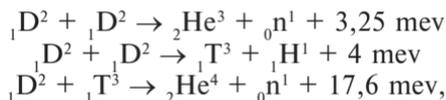
Однако преобладание водородного цикла над углеродным, имеющее место на Солнце, не является общим правилом, и на многих звездах все наоборот. Дело в том, что эти две последовательности термоядерных реакций обладают разной чувствительностью к температуре, и если скорость углеродного цикла пропорциональна T^{17} , то водородный цикл проходит, как T^4 . Таким образом, в случае звезд более ярких, чем Солнце (например, Сириуса), у которых температура в центре выше, углеродный цикл имеет преимущество над водородным. С другой стороны, на менее ярких, чем Солнце, звездах — а большая часть звезд принадлежит к этому классу — энергия возникает именно за счет водородного цикла.

Читатель был бы очень удивлен, если бы попытался сравнить скорость возникновения энергии внутри Солнца со скоростью получения тепла в обычных электроприборах, например в электрической кофеварке. Сто эрг на грамм в секунду эквивалентно примерно 2×10^{-5} калориям на грамм в секунду, и при такой скорости подачи энергии, чтобы нагреть 1 грамм воды до кипения, потребуется 5×10^7 с, или полтора года! Таким образом, используя электрическую кофеварку, в которой нагревательный элемент работает с той же эффективностью, что и термоядерная реакция внутри Солнца, нам пришлось бы ждать годы, пока вода закипит, при условии, конечно, что кофеварка идеально заизолирована и нет никаких потерь тепла. Причина, по которой Солнце такое горячее, несмотря на удивительно низкую скорость нагрева, в том, что оно большое. На самом деле, поскольку общее производство тепла пропорционально объему (то есть R^3), тогда как потери тепла пропорциональны площади поверхности (то есть R^2), очень большие тела становятся очень горячими, даже если скорость получения тепла на единицу объема у них внутри очень низка.

Из сказанного выше ясно, что ни С-цикл, ни Н-цикл, которые обеспечивают энергией звезды, освещающие нашу Вселенную, не удовлетворяют амбициозного Homo sapiens (латынь для умных), который хочет использовать ядерную энергию в своих целях. Ключ к решению этой проблемы

дают тяжелые изотопы водорода, дейтерий D^2 , открытый американским химиком Гарольдом Юри, и еще более тяжелый изотоп, тритий T^3 . Дейтерий присутствует в природе, хотя и в довольно малых количествах. Так, в одной из трех тысяч молекул воды содержится один атом дейтерия. Благодаря развитию методов разделения изотопов стоимость дейтерия упала от стоимости французских духов до стоимости дешевого виски, а воды в океане достаточно много. Тритий, будучи нестабильным изотопом, не существует в природе (за исключением пренебрежимо малых количеств, создаваемых в атмосфере космическими лучами), и его нужно производить в атомных реакторах, что обходится очень дорого. Он слишком дорог, чтобы использоваться как основное топливо, но полезен в качестве «ядерной растопки» для запуска термоядерной реакции в дейтерии.

Возможные реакции между тяжелыми изотопами водорода выглядят следующим образом:



и их эффективные сечения, рассчитанные на основании теории туннельного эффекта, показаны графически на рисунке 8.15.

Таким образом, все, что надо сделать, чтобы осуществить термоядерную реакцию между тяжелыми изотопами водорода, — это нагреть их до температуры в сотни миллионов градусов. Это и было сделано учеными из Лос-Аламоса 1 ноября 1952 года, когда они взорвали первую термоядерную бомбу на коралловом острове Элугелаб в Тихом океане, превратив остров в бассейн с водой шириной 1 миля и глубиной около 200 футов. Этот результат был достигнут путем сжатия и нагрева необходимого количества тяжелого водорода с помощью мощного взрыва атомной бомбы.

Однако ситуация становится гораздо более сложной, если хочется провести контролируруемую термоядерную реакцию при соблюдении определенных условий и использовать высвобождаемую энергию не в деструктивных, а в конструктивных целях. Очевидно, что в этом случае физи-

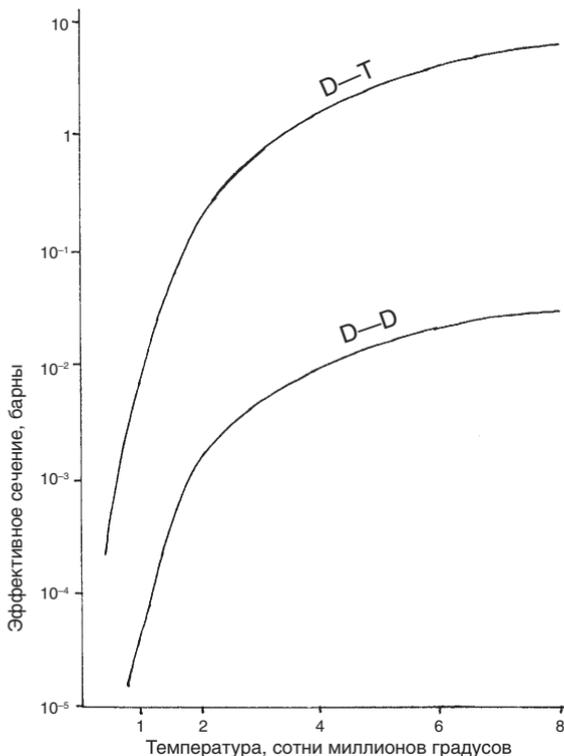


Рис. 8.15. Сечения для D—D и D—T реакций как функция от их тепловой энергии, выраженной в абсолютных температурах

ческие условия, при которых происходит термоядерная реакция, должны быть коренным образом изменены. Прежде всего, реакция должна проходить при исключительно низких плотностях, чтобы избежать неуправляемого роста давления в газе, которое появляется при температурах несколько сот миллионов градусов. На самом деле при такой температуре и плотности атмосферного воздуха в дейтерии развивается давление около 100 миллионов фунтов на квадратный дюйм, и ни один контейнер не сможет его удержать. График на рисунке 8.16 показывает скорость термоядерной энергии из чистого дейтерия и смеси дейтерий—тритий при различных плотностях.

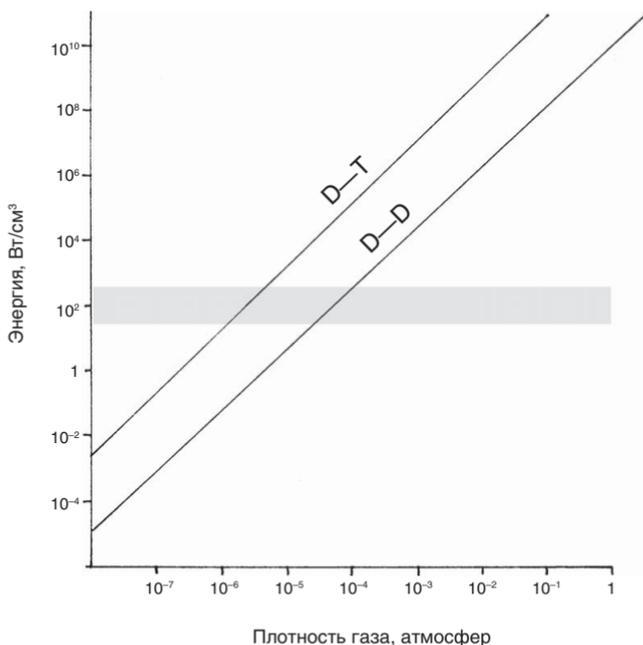


Рис. 8.16. Скорость высвобождения ядерной энергии при различной плотности и температуре 7×10^9 градусов Кельвина (примерно вдвое выше, чем температура внутри Солнца). Затемненная полоса обозначает получение энергии в существующих урановых и плутониевых реакторах

Как мы видим, для того чтобы обеспечить скорость получения энергии около 100 Вт/см^3 , что сравнимо с современными атомными реакторами, плотность дейтерия должна быть порядка одной десяти тысячной от плотности атмосферного воздуха, что примерно соответствует наилучшему вакууму, который можно получить в наших лабораториях. Вторая проблема заключается в том, чтобы удержать этот горячий газ в стороне от стенки контейнера, поскольку иначе процесс поглощения тепла стенками быстро снизит температуру дейтерия ниже минимального значения, необходимого для термоядерной реакции.

Этого можно добиться несколькими разными способами, которые в основном базируются на использовании

сильных магнитных полей. При очень высоких температурах, требуемых в этом случае, дейтерий в трубке полностью ионизируется и будет состоять исключительно из отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных дейтронов. (Такое состояние материи сегодня называют термином «плазма».) Мы знаем, что при движении электрически заряженной частицы в магнитном поле на нее действует сила, перпендикулярная направлению ее движения и силовым линиям магнитного поля. Эта сила вынуждает частицы двигаться по спирали вдоль линий магнитного поля, как показано на рис. 8.17, *а*. Таким образом, за счет формирования сильного осевого магнитного поля в трубе мы можем эффективно предотвращать приближение свободных дейтронов и тритонов к стенкам. Если добиться этого, то можно ожидать, что столкновения между движущимися в трубе по спирали частицами приведут к реакциям $D-D$ или $D-T$ с высвобождением атомной энергии и большого количества нейтронов. Конечно, чтобы запустить такой процесс, газ в трубе должен быть сначала нагрет до очень высокой температуры каким-то внешним агентом.

Вторая возможность состоит в использовании магнитных сил, вызванных кратковременными, но сильными электрическими разрядами в трубе. Известно, что на два параллельно текущих в одном направлении электрических тока действует сила магнитного притяжения, так что в случае достаточно сильного тока газ (вернее, плазма) внутри трубы будет иметь тенденцию отойти от стенок и сжаться вдоль оси в узкую струю. Как действует этот так называемый пинч-эффект, можно понять из рис. 8.17, *б*. В противоположность описанным выше методам устройство для пинч-эффекта работает толчками, как автомобильный двигатель, но у него есть то преимущество, что газ в трубе автоматически нагревается электрическим разрядом и никакого внешнего нагрева не требуется. Было рассчитано, что ток в несколько сот тысяч ампер, длящийся несколько микросекунд, производит достаточно сильный эффект, чтобы вызвать термоядерную реакцию в дейтерии. В настоящее время работа в описанных выше направлениях

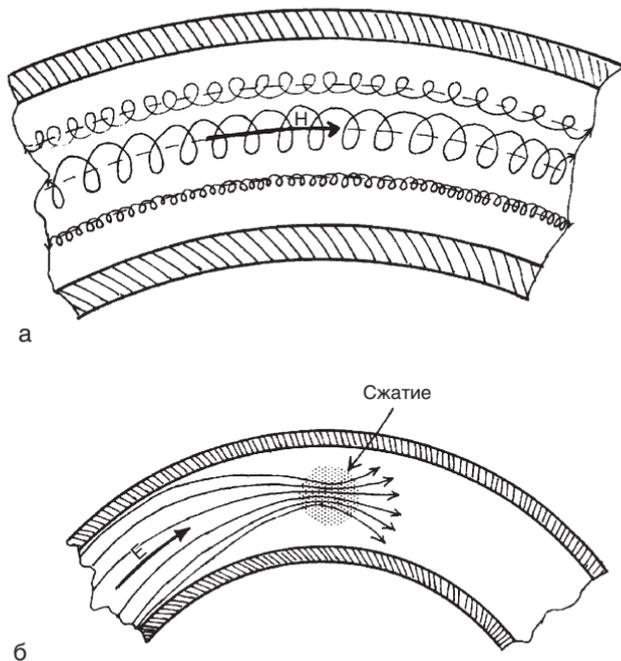


Рис. 8.17. Два основных метода, которые разрабатываются в наше время для контроля термоядерных реакций, используемые в Принстоне и Лос-Аламосе

ведется во многих лабораториях мира, и вполне возможно, что задача обеспечения контроля над термоядерными реакциями будет в скором времени решена.

Мезоны и гипероны

В начале 1930-х годов физики довольствовались всего несколькими частицами, из которых состоит материя. Протоны и нейтроны — ядро, электроны — оболочка и — ну да — еще нейтрино, этот проблемный ребенок того периода. Но в 1932 году появилась статья японского физика Хидеки Юкавы, ставшая головной болью для всех, кто занимался природой сил ядерного сцепления. Юкава предположил, что эти

силы существуют благодаря новой частице, которая постоянно переходит то к протону, то к нейтрону. Очень сложно, если вообще возможно, описать простыми словами сложное понятие «обменное взаимодействие». Возможно, самый лучший способ — это представить себе двух голодных собак, раздобывших лакомую косточку, которую они теперь пытаются отнять друг у друга. Это сокровище постоянно переходит из пасти одной собаки в пасть другой, и в результате такой борьбы собаки становятся неразрывно связанными друг с другом. Идея Юкавы состояла в том, что силы притяжения между нуклонами возникают благодаря похожей борьбе за обладание новой лакомой частицей. Эта частица могла бы быть электрически нейтральной, а могла нести положительный или отрицательный заряд, и процесс обмена в этих случаях выглядел бы, как показано на рисунке 8.18.

Как считал Юкава, для того чтобы свойства ядерных сил соответствовали наблюдениям, следует предположить, что новая частица обладает массой, средней между массой протона и массой электрона, будучи в 10 раз легче первого и в 200 раз тяжелее второго. Никто не верил в существование таких частиц, которые предварительно называли юконами, пока через пару лет физик Карл Андерсон из Калифорнийского технологического института не обнаружил присутствие положительно и отрицательно заряженных частиц такой массы в космических лучах, падающих на Землю из верхних слоев атмосферы.

Благодаря этому открытию, название новых частиц претерпело ряд изменений. Их называли то «тяжелыми электронами», то «легкими протонами». А потом один финский физик предложил название «мезотрон» от греческого «мезос», то есть «между». Однако отец Вернера Гейзенберга, который был профессором классических языков, возразил, что буквам «тр» в этом слове не место. Действительно, в отличие от слова «электрон», произошедшего от греческого «электра», в слове «мезос» нет букв «тр». Таким образом, несмотря на протесты финского физика, которому не хотелось, чтобы название новой частиц путали с словом *maison* (по-французски «дом»), за частицей Юкавы в конце концов закрепилось название «мезон».

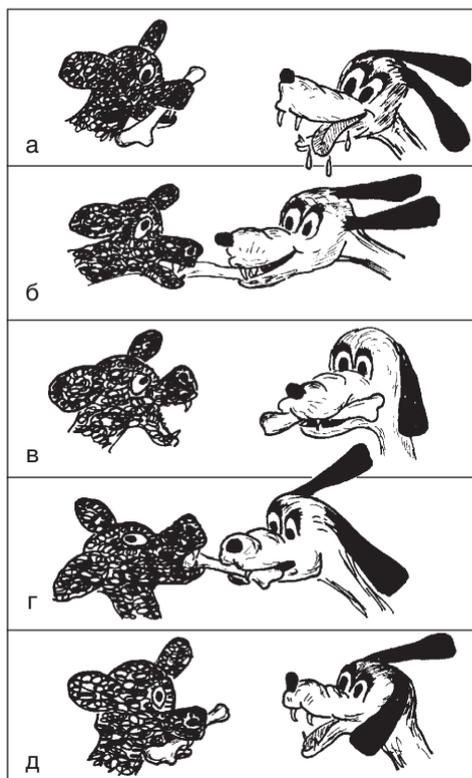


Рис. 8.18. Обмен мезонами (костью) между двумя нуклонами

С самого начала мезоны стали настоящей головной болью для физиков, поскольку казалось, что с их поглощением атмосферным воздухом было что-то не так. Для частиц с такой большой энергией (много миллиардов электронвольт) абсорбция различными веществами зависит только от общего количества (массы) вещества, через которое они проходят. В самом деле, поскольку при таких энергиях все электроны атома, с которыми сталкиваются эти быстрые частицы, можно считать свободными (см. обсуждение эффекта Комптона), важно лишь количество электронов, а не способ их привязки к ядрам различных атомов. Таким образом, если мы измерим интенсивность

потока космических лучей на вершине большой горы и у ее подножия, то падение интенсивности должно определяться только *весом* воздушного столба, восходящего вертикально от подножия к вершине. Если барометрическая разница давления между этими точками равна, скажем, 100 мм ртутного столба, то вес воздушного столба равен весу столбика ртути высотой 100 мм и, следовательно, поглощение космических лучей слоем ртути толщиной 100 мм должно быть таким же, как их поглощение воздушным столбом между вершиной и подножием горы. Это правило работает очень хорошо в случае электронов космических лучей, но не похоже, чтобы оно работало для вновь открытых частиц.

Важный эксперимент в этом направлении был проведен в 1940 году Бруно Росси и другими на озере Эхо (высота 3240 м) вблизи вершины горы Эванс, расположенной рядом с Денвером (высота 1616 м) (рис. 8.19). Разница давления между этими точками составила 14,5 мм ртутного столба, или, что то же самое, 2 м воды. Росси использовал два одинаковых счетчика мезонов: один в Денвере, другой на горе, причем последний был погружен в озеро на 2 м*.

Поскольку в этом случае озерная вода должна поглощать частицы так же, как слой воздуха между горным озером и улицами Денвера, ожидалось, что оба счетчика покажут одинаковые результаты. Однако эксперимент не оправдал этих ожиданий, и счетчик в Денвере неизменно показывал гораздо меньшее число мезонов. Единственно возможное объяснение состояло в том, что существует другая причина, отличная от поглощения атмосферным воздухом, которая снижает количество мезонов, падающих на землю. Энрико Ферми предположил, что это может быть нестабильность, присущая мезонам. Действительно, если мезоны разрушаются в полете, то часть, дошедшая до земли, будет зависеть от времени полета. Поскольку мезоны, долетевшие до Денвера, должны были пройти дополни-

* На самом деле использовалась железная плита, эквивалентная 2 м воды, но гораздо поэтичнее было бы использовать воду красивого озера.

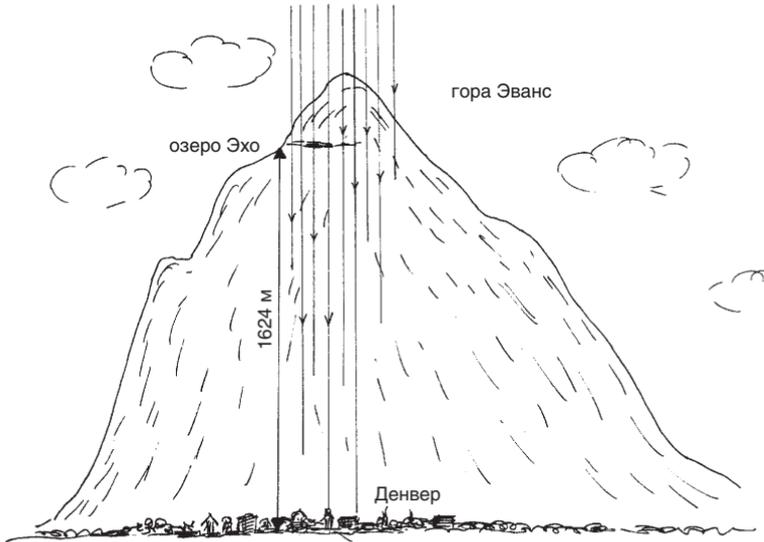


Рис. 8.19. Распад мезонов на пути от озера Эхо до Денвера

тельно 1624 м, а летят они практически со скоростью света, дополнительное время составляет $(1,6 \times 10^5)/(3 \times 10^{10}) = 5 \times 10^{-6}$ с. Из этой цифры и наблюдавшегося падения интенсивности на уровне земли можно было рассчитать время полураспада мезонов, которое оказалось зависящим от их скорости. Согласно наблюдениям для очень быстрых мезонов с энергией 250 мэв период полураспада составляет около 2×10^{-3} с, тогда как для более медленных с энергией всего 100 мэв период полураспада равен всего 5×10^{-4} с. Эти наблюдения дали первое экспериментальное подтверждение эйнштейновскому замедлению времени, и результаты эксперимента очень хорошо совпали с формулой

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \text{ В последующих экспериментах удалось изме-}$$

рить также период полураспада мезонов после того, как они остановились в поглотившем их веществе, и он оказался равным $2,5 \times 10^{-6}$ с. Если бы быстрые мезоны в космических лучах имели такой период полураспада, они бы

все распались еще высоко в атмосфере и мы бы никогда не обнаружили их на Земле.

Что происходит с мезоном, когда он умирает? Ответить на этот вопрос можно, только сфотографировав следы мезона и продукты его распада. В случае частиц с такой большой проникающей способностью, как мезоны космических лучей, нет необходимости в использовании облачных камер, которые в любом случае слишком громоздки, чтобы помещать их на воздушных шарах или в ракетах. Стандартный способ проведения таких исследований основан на использовании фотографических пластин с толстым эмульсионным слоем. Множество таких пластин помещают в атомный реактор, и, когда высокоэнергетическая частица проходит через него, она воздействует на чувствительные зерна фотоэмульсии, которые встречаются на ее пути. Изучая использованные пластины под микроскопом, можно увидеть длинные ряды потемневших зерен, обозначающие путь частицы. Составная фотография на вкладке VIII *сверху* показывает последовательность событий, из которой мы на данный момент выбираем только последние следы. Предпоследний след (идуший снизу вверх налево) принадлежит мезону, что можно установить, подсчитав число подвергшихся воздействию зерен на единицу длины пути. Последний след (идуший сверху вниз налево) принадлежит обычному электрону, появившемуся в том месте, где кончается след мезона. Тот факт, что электрон отброшен в противоположном направлении, подтверждает, что в процессе распада должна участвовать одна или более частица, отлетевшая влево. А тот факт, что никаких других следов не видно, доказывает электрическую нейтральность этих частиц, и детальное изучение задействованных направлений и энергий приводит нас к выводу, что имеются две другие частицы, и обе они наши старые друзья нейтрино. Таким образом, распад мезона может быть описан следующим уравнением:

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + 2\nu,$$

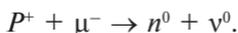
где + и – соответствуют положительно и отрицательно заряженным мезонам. Поскольку масса мезона равна 206 масс

электрона, а нейтрино практически совсем не имеет массы, масса, равная 205 масс электрона, остается неучтенной. Согласно эйнштейновскому принципу эквивалентности массы и энергии, эта избыточная масса будет преобразована в 100 мэв энергии, разделенной между частицами, возникающими при распаде.

Когда мезоны были открыты, их радостно встретили как частицы, которые, согласно теории обмена Юкавы, должны были являться источником сил сцепления между нуклонами. Но вскоре оказалось, что ситуация совсем не так проста. Сложности возникли в связи с вопросом о том, что делают мезоны, когда их движение замедляется толстым слоем поглощающего вещества. Ожидалось, что в этом случае судьбы у положительных и отрицательных мезонов совершенно разные. Положительные мезоны, которые отталкивают положительно заряженные ядра вещества, замедлившего их движение, будут блуждать поблизости и в течение нескольких микросекунд распадутся на быстрый положительный электрон и пару нейтрино. Высокоэнергетический положительный электрон будет выброшен из вещества, пройдет мимо нескольких счетчиков, которыми снабжены окружающие его улавливатели мезонов, и сообщит о гибели положительного мезона.

При этом замедленный отрицательный мезон будет захвачен и попадет на квантовую орбиту одного из ядер, войдя на время в состав атома. Расчеты, проведенные Энрико Ферми и Эдвардом Теллером, показали, что такой захват произойдет очень быстро, задолго до того, как у медленного мезона будет шанс распасться. Поскольку радиусы квантовых орбит Бора обратно пропорциональны массе частицы, орбита этого мезона будет в 200 раз меньше орбиты самого внутреннего электрона и захваченный мезон будет двигаться очень близко к поверхности ядра, подобно своего рода спутнику Земли. Оказавшись на этой орбите, мезон имеет две возможности: он может распасться на быстрый отрицательный электрон и два нейтрино, и тогда счетчики, окружающие вещество, зарегистрируют гибель отрицательного мезона; но из-за близости к ядру он может быть также поглощен им. В самом деле, если

силы между протонами и нейтронами возникают из-за постоянного обмена мезонами между ними, то должна иметь место реакция:



Учитывая силу ядерных сил, можно считать, что это реакция должна быть чрезвычайно быстрой, занимая всего около 10^{-22} с. Поскольку естественный распад мезона длится около 10^{-6} с, из этого следует, что практически все мезоны должны поглощаться ядрами задолго до того, как у них появится шанс распасться на электрон и два нейтрино. Таким образом, никакие отрицательные электроны не будут выброшены из замедляющего вещества. Экспериментальные данные резко расходились с таким выводом. Хотя количество отрицательных электронов, выброшенных из замедляющего вещества, было меньше, чем количество положительных электронов, для одних веществ в 2 раза, для других в 10 раз, оно определенно было не меньше, чем в 10^{16} раз! Это означает, что аппетит ядер в отношении мезонов в несколько миллиардов раз меньше, чем нужно для возникновения достаточно мощных сил по теории Юкавы. И что теперь делать? Мезоны были предсказаны, мезоны были открыты, но, видимо, это были какие-то не те мезоны, и атомные ядра интересовались ими не больше, чем лвы соломой.

Помощь пришла от фотопластин с толстым эмульсионным слоем, которые британский физик С.Ф. Пауэлл отправил на воздушном шаре в верхние слои атмосферы. Фотографии показали два следа, концы которых соединялись. Один из них принадлежал обычному мезону с массой 206, другой, очевидно, оставила частица с таким же зарядом, но с массой 273. Более тяжелая частица была названа тяжелый мезон, но вскоре ее название поменяли на π -мезон (или пион), а открытый ранее легкий мезон переименовали в μ -мезон (или мюон).

Дальнейшие исследования показали, что положительный или отрицательный пион распадается на (положительный или отрицательный) мюон и одно нейтрино согласно уравнению:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu^0.$$

Пионы возникают на верхней границе атмосферы в результате воздействия первичных космических лучей (которые состоят в основном из высокоэнергетических протонов) на атомные ядра и имеют такой короткий период полураспада ($2,6 \times 10^{-8}$ с), что, даже несмотря на эйнштейновское замедление времени, ни один из них не достигает земной поверхности. В верхней части вкладки VIII показано возникновение пучка пионов при столкновении протонных космических лучей с неким ядром на фотопластинке, а также след одного из них, который успешно трансформировался в мюон и электрон. В то время как мюоны существуют только в двух видах: μ^+ и μ^- , пионы могут быть трех видов: π^+ , π^- и π^0 . Последний распадается на два высокоэнергетических кванта излучения:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

и имеет период полураспада всего 10^{-16} с.

В течение следующих лет на головы физиков сыпались все новые и новые частицы. Появился К-мезон с массой 965 масс электрона, несколько частиц более тяжелых, чем протоны, которые получили название гипероны. Их названия, схемы распада и периоды полураспада приведены в таблице, но нет гарантий, что в ближайшем будущем не будет открыто еще больше частиц.

Фотографии происходящего в мире элементарных частиц становились все более сложными, что показано на вкладке VIII *снизу*. Эта картина была получена с помощью нового устройства под названием пузырьковая камера, которое в каком-то смысле противоположно облачной камере. Вместо формирования капелек жидкости в газе здесь используются пузырьки газа, возникшие в жидкой среде, например в жидком водороде. Несмотря на то что наши фактические знания об элементарных частицах быстро растут, мы натываемся на стену при каждой попытке понять их, и все теории, разработанные в этом направлении, до сих пор имеют чисто феноменологическую природу.

Характеристики элементарных частиц

Наименование и символ	Масса (в электронных массах)	Время жизни, с	Схема распада	Масса в пересчете на 137 m_e
Кси-гиперон; Ξ^\pm	2585	10^{-10}	$\Lambda_0 + \pi^\pm$	18,88
Сигма-гиперон; Σ^\pm	2330	10^{-10}	$n + \pi^\pm$	17,02
Лямбда-гиперон; Λ^0	2182	$2,7 \times 10^{-10}$	$p^+ + \pi^-$ или $n + p^+$	15,92
Нейтрон; n	1838,6	10^3	$p^+ + e^- + \nu$	13,40
Протон; p	1836,1	Стабилен		
Таон; τ^\pm	966,5	10^{-8}	$\pi^\pm + \pi^0 + \pi^0$ и т. д.	7,05
Тета-мезон; θ^0	965	10^{-10}	$\pi^0 + \pi^0$ или $\pi^+ + \pi^-$	
Пион; π^\pm	273,2	$2,6 \times 10^{-8}$	$\mu^\pm + \nu$	1,995
Пион; π^0	264,2	10^{-16}	2γ	1,928
Мюон; μ^\pm	206,7	$2,2 \times 10^{-6}$	$e^\pm + 2\nu$	1,511
Электрон; e^\pm	1	Стабилен		
Нейтрино; ν	0	Стабилен		

По ту сторону зеркал

Если кто-то находит левый ботинок, он убежден, что правый валяется где-нибудь под кроватью или под диваном. То же самое верно для перчаток и многих других предметов. Но у всех мужчин и женщин сердце находится с левой стороны, а аппендикс — с правой. Более фундаментальный биологический факт состоит в том, что все живые существа, будь то амеба, человек, сельдь или розовый куст, состоят из молекул белка, а те, в свою очередь, из аминокислот. Соединяясь друг с другом в длинные цепи, они самопроизвольно закручиваются в сложные белковые молекулы. При этом практически все молекулы и другие органические соединения являются «левыми», а не «правыми». Это очень странно, поскольку, когда химик-органик синтезирует белки, он получает 50% левых и 50% правых молекул. Возможно, на ранних стадиях развития жизни на нашей планете существовало два мира: правый и левый. Будучи несъедобными или даже ядовитыми друг для друга, они могли сойтись в битве, в которой одна сторона была полностью уничтожена.

Но в обычной физике всегда соблюдается принцип зеркальной симметрии (известный как принцип паритета), и для любого процесса всегда может быть найден другой процесс, который выглядит в точности как зеркальное отражение первого. В 1956 году два молодых американских физика китайского происхождения Чжэньнин Янг и Чжендао Ли на основании теоретических соображений предположили, что в случае элементарных частиц это может быть неверно.

Как неоднократно упоминалось выше, элементарные частицы, и в частности нейтроны, можно рассматривать как маленькие волчки, вращающиеся вокруг своей оси. Это может быть вращение по часовой стрелке или в обратную сторону, и одно состояние может быть трансформировано в другое простой перестановкой с ног на голову. Электрон, выбрасываемый при распаде нейтрона, летит преимущественно вдоль оси вращения, при этом считалось, что электроны вылетают в обе стороны с равной вероятностью (то



Рис. 8.20. Зеркальное отражение распада нейтрона

есть, так сказать, из северного и южного полюсов). Если бы это было верно, то принцип паритета соблюдался бы и зеркальное отражение распада нейтрона было бы идентично исходному, поскольку для того, чтобы они совпали, требовалось бы всего лишь перевернуть один из них вверх ногами. Однако если электрон всегда выбрасывается только в одном направлении (рис. 8.20, а), ситуация становится совершенно иной. Действительно, глядя в зеркало на отражение распада нейтрона (рис. 8.20, б), можно прийти к выводу, что не существует способа повернуть его так, чтобы он совпал с исходным. Если в обоих случаях электрон выбрасывается вверх, как на рисунке 8.20, то нейтроны вращаются в противоположных направлениях. Если повернуть (мысленно) либо отражение, либо исходный вариант вверх ногами, электроны были бы выброшены в противоположных направлениях. Принцип паритета был бы нарушен, и поведение элементарных частиц по ту сторону зеркала не было бы идентично поведению частиц перед зеркалом.

Чтобы проверить гипотезу Янга и Ли, был проведен непосредственный эксперимент для определения, существу-

ет ли корреляция между направлением вращения нейтрона и направлением эмиссии электрона. Подверженное бета-распаду радиоактивное вещество охладили до очень низкой температуры и поместили в очень сильное магнитное поле. При таких условиях, когда тепловое возбуждение практически замирает, все атомы ориентируются в одном направлении вдоль силовых линий магнитного поля. Если бы электроны выбрасывались одинаково в обоих направлениях по отношению к оси вращения нейтрона, то наблюдалось бы равное количество электронов, летящих в сторону северного и южного полюсов электромагнита. Однако эксперимент продемонстрировал прямо противоположный результат, и, как предсказывали Янг и Ли, все электроны летели в одну сторону. Вскоре после этого такой же результат был получен для распада μ -мезона.

Это было нарушение принципа паритета: мир элементарных частиц оказался кривобоким. Но где же другая половина, которая соответствует физике зазеркалья? Мы не знаем и не узнаем, пока не будет понята базовая природа элементарных частиц.

Будущее физики

Из сказанного выше видно, что будущее физики — это дальнейшее исследование и изучение элементарных частиц. Но если экспериментальное продвижение в этом направлении идет хорошо, то теория практически стоит на месте. Двадцать пять веков назад Демокрит заявил, что материя состоит из дискретных минимальных порций, и сегодня мы все больше и больше убеждаемся в правильности этого постулата. Прошло всего около полувека с тех пор, как мы узнали, что энергия тоже имеет «атомную» структуру, и сейчас мы говорим о квантах энергии. За последние шестьдесят лет физики узнали, как квантуются различные виды энергии. В случае электромагнитного излучения энергия может принимать только те значения, которые описываются формулой $nh\nu$, где ν — частота колебаний, а n — целое число. В простом атоме водорода энергия

различных квантовых состояний меняется, как $1/n^2$, где n — целое число. В других более сложных случаях правильный ответ дают уравнения Шрёдингера и Дирака. Но в случае материальных частиц мы до сих пор пребываем в полном неведении. Мы не знаем, почему электрический заряд всегда имеет одинаковое значение: $4,77 \times 10^{-10}$ esu. Мы не имеем ни малейшего понятия, почему массы частиц квантуются, имея относительные значения, приведенные в таблице на с. 373. И мы не больше Демокрита знаем, почему материя должна состоять из частиц вместо того, чтобы быть действительно непрерывной.

Ответы на все эти вопросы дадут физики будущего. Но пока не было сделано ни одного успешного шага в сторону получения этих ответов, и никто не в состоянии предсказать, когда можно ожидать прорыва. Однако, хотя никто не знает правильного ответа, никого не следует осуждать за размышления о проблемах подобного рода. Возьмем в качестве примера элементарный заряд e . Известно, что e^2 , деленное на произведение скорости света c и квантовой постоянной h , — это чисто математическое число, *безразмерная константа*, то есть независимо от системы единиц, в которых выражены e , c и h (при условии, что они используются согласованно), отношение остается неизменным. Это отношение называется постоянной тонкой структуры, поскольку оно появилось при описании расщепления линий в сериях Балмера на несколько очень близких компонент, и его численное значение равно 1, деленное на 137. Почему 137, а не 75 или 533? В физических формулах числовые коэффициенты всегда имеют некий математический смысл. Например, отношение между периодом маятника T , его длиной l и ускорением силы тяжести g , независимо от используемых единиц, всегда определяется формулой:

$$T = 6,283 \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Что означает число 6,283? Если попытаться найти его связь с различными числами, известными в математике, обнаружится, что на самом деле это 2π . И действительно, используя для вывода этой формулы уравнения теоретиче-

ской механики, мы обнаружим, что коэффициент *должен быть* равен 2π . Аналогично, выводя выражение для элементарного заряда с использованием уравнений квантовой теории относительности, которые содержат константы c и h , можно прийти к выводу, что отношение hc/e^2 (обратное постоянной тонкой структуры) дает определенное математическое выражение, численно равное 137. Но в настоящее время никто не знает, *как* объяснить это теоретически, и если догадаться, что 6,283 — это $2 \times 3,141\dots$ несложно, то угадать, что за зверь число 137, гораздо сложнее!

Сэр Артур Эддингтон, который внес неопределимый вклад в теорию внутренней структуры звезд, уже довольно давно сделал смелую попытку найти объяснение числу 137. Грубо его аргументы были следующими. Мы живем в четырехмерном мире (x, y, z, ict), а $4 \times 4 = 16$. Тогда построим *матрицу*, то есть квадратную таблицу с 16 строками и 16 столбцами. Предположим, что эта матрица «симметрична» относительно своей диагонали, то есть содержимое квадрата между n -й строкой и m -м столбцом идентично содержимому квадрата между m -й строкой и n -м столбцом. Сколько независимых квадратов у нас получится? Что ж, нетрудно подсчитать. Всего в матрице будет $16 \times 16 = 256$ квадратов. Из них 16 лежат на диагонали, остается 240. Таким образом, каждая треугольная область по обе стороны диагонали содержит 120 независимых квадратов, а вместе с диагональными квадратами это 136. В то время когда Эддингтон впервые получил это отношение, эмпирическое значение, обратное постоянной тонкой структуры, считалось равным 136. Только несколько лет спустя более точные измерения показали, что это 137, и это заставило Эддингтона разработать «дополнение к теории», обосновывающее недостающую единицу.

Эта идея Эддингтона была осмеяна в короткой статье Г. Бека, Х. Бете и В. Ризлера, опубликованной в номере от 9 января 1931 года немецкого журнала *Naturwissenschaften*. В этой статье, где авторы пытались показать, как опасно жонглировать цифрами, написано следующее: «Некоторые замечания по поводу использования квантовой теории для определения температуры абсолютного нуля».

«Рассмотрим шестиугольную кристаллическую решетку. Для нее точка абсолютного нуля характеризуется вымерзанием всех степеней свободы, за исключением, конечно, движения электронов вдоль орбит Бора. Согласно Эддингтону, каждый электрон обладает $1/\alpha = 137$ степенями свободы. Помимо электронов в кристаллической решетке всегда имеется равное им количество протонов. Чтобы получить температуру абсолютного нуля, мы должны приписать каждому нейтрону (то есть протону плюс электрон) $2/\alpha - 1$ степеней свободы, поскольку одна степень свободы заморожена движением электрона по его орбите. Таким образом, для температуры абсолютного нуля получаем:

$$T_0 = -(2/\alpha - 1) \text{ градусов.}$$

Предполагая, что $1/\alpha = 137$, получаем температуру абсолютного нуля:

$$T_0 = -273 \text{ градуса,}$$

что хорошо согласуется с экспериментальным значением. Заметим, что наш результат никак не зависит от выбора кристаллической решетки».

Конечно, полученное выше отношение между 137 и 273 — это чистое совпадение, поскольку, если 137 — это число математическая величина, то значение температуры абсолютного нуля зависит от температурной шкалы (Фаренгейта или Реомюра). После того как статья была опубликована, редактор журнала, будучи проинформирован одним берлинским физиком о том, что это мистификация, написал гневное письмо авторам, которые в то время работали в Кембриджском университете. Он получил смиренный ответ, в котором говорилось, что авторы очень сожалеют об этом недопонимании, но они были уверены, что статья будет воспринята как пародия на способ, которым *определенные* физики строят свои теории. В результате в следующем номере *Naturwissenschaften* появилась заметка от редактора, в которой выражалась надежда, что все читатели поняли пародийный характер статьи Бека, Бете и Ризлера. А затем сэр Артур Эддингтон не выдержал и взорвался!

Ниже приведено стихотворение, написанное в то время русским физиком-теоретиком Владимиром Александровичем Фоком:

Хотя, измучившись до бреда понапрасну,
мы можем говорить и думать, что придется,
137 загадкой остается.
Лишь Эддингтон, *он* видит это ясно.
И, обличая тех, кто насмехался,
он говорит, что это, несомненно,
Размерность мира. *Он не обознался?!
Размерность мира, что нас окружает?
В котором сам сэр Артур пребывает?
Который все мы чувствуем и знаем?
Он, верно, шутит? Мы не понимаем!*

Раз так, сэр Артур, вот мое число
(плачу монетой той же, всем назло).
Один—четыре—восемь—ноль, и вот,
считаю я, что это подойдет.
А ваше жалкое 137 ничуть не краше,
Оно отныне и до века только ваше,
А на моем гербе, хоть я и не король,
Пускай горят 1—4—8—0.
Итак, вперед и вверх, а там
Кто не со мной, тот пусть идет к чертям!

Сегодня мы все еще не знаем, почему это число 137, а не какое-то другое и является ли «объяснение» Эддингтона чистым совпадением, или в нем есть зерно правды. Конечно, можно назвать попытку Эддингтона «нумерологией», что имеет отрицательную коннотацию, но есть очень близкие к ней слова «теория чисел», за которыми стоит обширная и уважаемая область чистой математики. В своих попытках разгадать загадки природы физики часто обращаются за помощью к математике и во многих случаях получают ее. Когда Эйнштейн захотел интерпретировать гравитацию как искривление четырехмерного пространственно-временного континуума, он обнаружил поджидавшую его римановскую теорию искривленного многомерного пространства. Когда Гейзенберг искал какую-нибудь необычную область математики, чтобы объяснить движение электронов внутри атома, к его услугам была неком-

мутативная алгебра. И только теория чисел и топология (*analysis situs*) до сих пор остаются чисто математическими дисциплинами, не имеющими применения в физике. Возможно, в будущем именно они будут призваны помочь нам в понимании загадок природы.

Но, возвращаясь к проблемам завтрашней физики, мы, вероятно, встретим больше трудностей в объяснении массы элементарных частиц, чем их зарядов.

Действительно, любая формула, в которой масса выражается через скорость, импульс и числовую константу, должна включать в себя еще и *длину*. Можно написать:

$$\text{Масса} = A \times \frac{\text{импульс}}{(\text{скорость} \times \text{длина})},$$

где A рациональное число, например, 1 , $\sqrt{2}$, $3/5\pi$, $1/2\pi^2$ и т. д. Если мы возьмем A около 1 , импульс h , равный ($6,55 \times 10^{-27}$), скорость c , равную (3×10^{10}), и захотим получить среднюю массу материальной частицы, то есть массу мезона (2×10^{-25}), то нам следует взять длину, равную около 10^{-12} см. Конечно, если A не 1 , а, скажем, 2π (≈ 6) или π^2 (≈ 10), длины могут быть всего 10^{-13} см. Длины такого порядка очень часто встречаются в физике элементарных частиц. Так, «радиус электрона», рассчитанный на основании классической теории электродинамики, равен $2,8 \times 10^{-13}$, а расстояние, на котором начинают действовать ядерные силы между двумя частицами, равно $1,4 \times 10^{-13}$ см. Таким образом, похоже, что длина, равная произведению 10^{-13} на какое-нибудь число, имеет фундаментальное значение в задачах, связанных с элементарными частицами.

В течение нескольких десятилетий физики-теоретики утешались надеждой, что длина порядка 10^{-13} , которую обычно обозначают λ , сыграет роль *элементарной длины* в будущем развитии теории. Так же как c — *самая большая из возможных скоростей* в теории относительности, а h — *самый маленький из возможных импульсов* в квантовой теории, λ предназначена на роль *самого маленького из возможных расстояний* в будущей теории материи. Это будет, так сказать, «диаметр математической точки», и разговор о расстояниях меньше этого не будет иметь смысла. Возможно,

это очень интересная и волнующая мечта, которая может сбыться, но сейчас никто не знает когда.

Желая написать яркое заключение этой книги, которая в любом случае уже слишком разрослась, приведем еще одно «нумерологическое» соотношение, соблюдающееся в мире элементарных частиц. Мы не можем понять, что означает число 137, поэтому давайте будем выражать массу всех элементарных частиц в терминах 137 масс электрона. Результат показан в приведенной выше таблице, и мы видим, что все цифры очень близки к целым числам, за исключением двух, которые близки к целому числу с половиной. Это может быть совпадением, но шанс такого совпадения — это одна многомиллиардная! А если это не совпадение, то что это значит? Можно ли объяснить последовательность «сакральных чисел»:

$$19; 17; 16; 13\frac{1}{2}; 7; 2; 1\frac{1}{2}$$

на основании какой-нибудь разумной теории? Может ли она иметь отношение, например, к теории чисел и быть как-то связана с последовательностью простых чисел или с более сложной последовательностью чисел? Или она имеет отношение к топологии и связана с числом вершин, ребер, граней и пространственных границ четырехмерного многогранника? Мы не знаем. Но давайте надеяться, что работа физиков будущих поколений приведет к победоносному решению этих задач.

Оглавление

Предисловие	7
<i>Глава 1.</i> Зарождение физики	9
<i>Глава 2.</i> Темные века и Возрождение	37
<i>Глава 3.</i> И сказал Господь: «Да будет Ньютон!»	68
<i>Глава 4.</i> Тепло как энергия	112
<i>Глава 5.</i> Эра электричества	152
<i>Глава 6.</i> Революция относительности	190
<i>Глава 7.</i> Квантовые законы	248
<i>Глава 8.</i> Атомное ядро и элементарные частицы	317

Для возрастной категории 16+

Гамов Георгий
ВЕЛИКИЕ ФИЗИКИ
ОТ ГАЛИЛЕО ДО ЭЙНШТЕЙНА

**Как были сделаны самые
значимые научные открытия**

Ответственный редактор *Л.И. Глебовская*
Художественный редактор *Е.Ю. Шурлапова*
Технический редактор *Н.В. Травкина*
Корректоры *А.В. Максименко, Т.В. Соловьева*

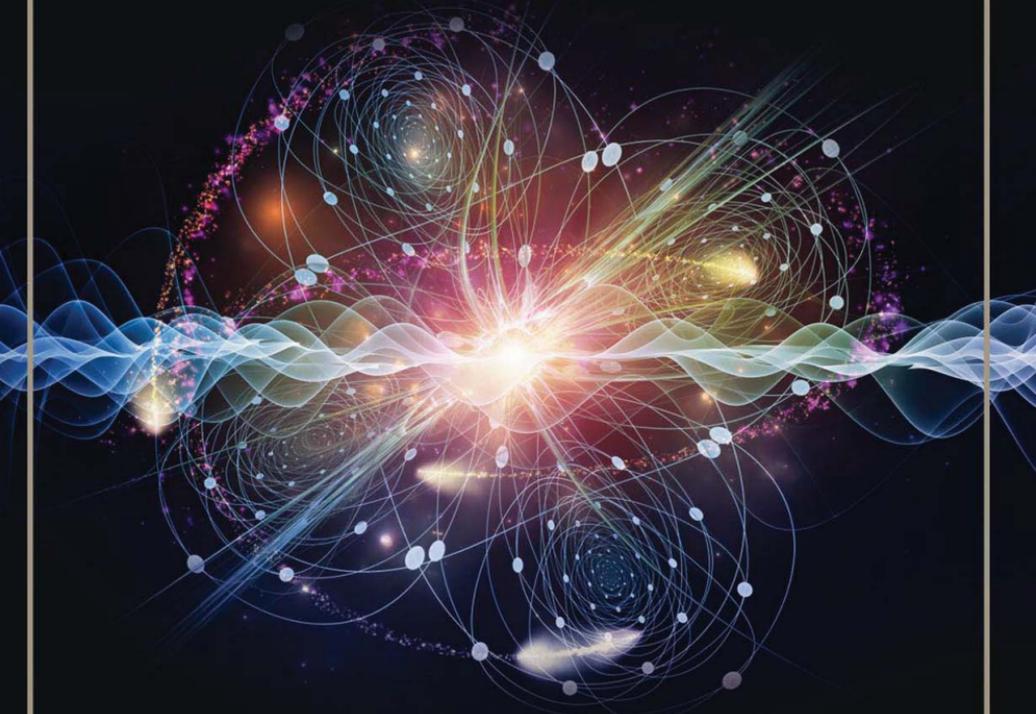
Подписано в печать 03.06.2021.
Формат 84×108^{1/32}. Бумага типографская. Гарнитура «Ньютон».
Печать офсетная. Усл.печ. л. 20,16.
Уч.-изд. л. 19,29 + вклейка = 19,73.
Тираж 2 000 экз. Заказ №

ЗАО «Центрполиграф»
121471, Москва, Можайское ш., дом 29/2

WWW.CENTROPOLIGRAF.RU

Отпечатано в ОАО «Рыбинский дом печати»
152901, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Чкалова, 8
e-mail: printing@yareoslavl.ru www.printing.yareoslavl.ru

Георгий Гамов — физик с мировым именем, блестящий популяризатор науки, на страницах своей книги освещает эволюцию научных представлений от Античности до середины XX века. Автор знакомит читателя с открытиями Архимеда, Кеплера, Галилея и других великих ученых прошлого, наглядно воспроизводит эксперименты Исаака Ньютона и Майкла Фарадея, живым и доступным языком объясняет явления квантовой механики, принципы атомной и ядерной физики, теорию элементарных частиц. Освещая научные открытия XX века, Георгий Гамов делится личными воспоминаниями об Эрнесте Резерфорде, Альберте Эйнштейне, Нильсе Боре и других гениальных физиках, с которыми ему довелось работать и совершать научные открытия. Книга проиллюстрирована чертежами и рисунками автора.



ЦЕНТРОЛИГРАФ®

ISBN: 978-5-9524-5582-5

