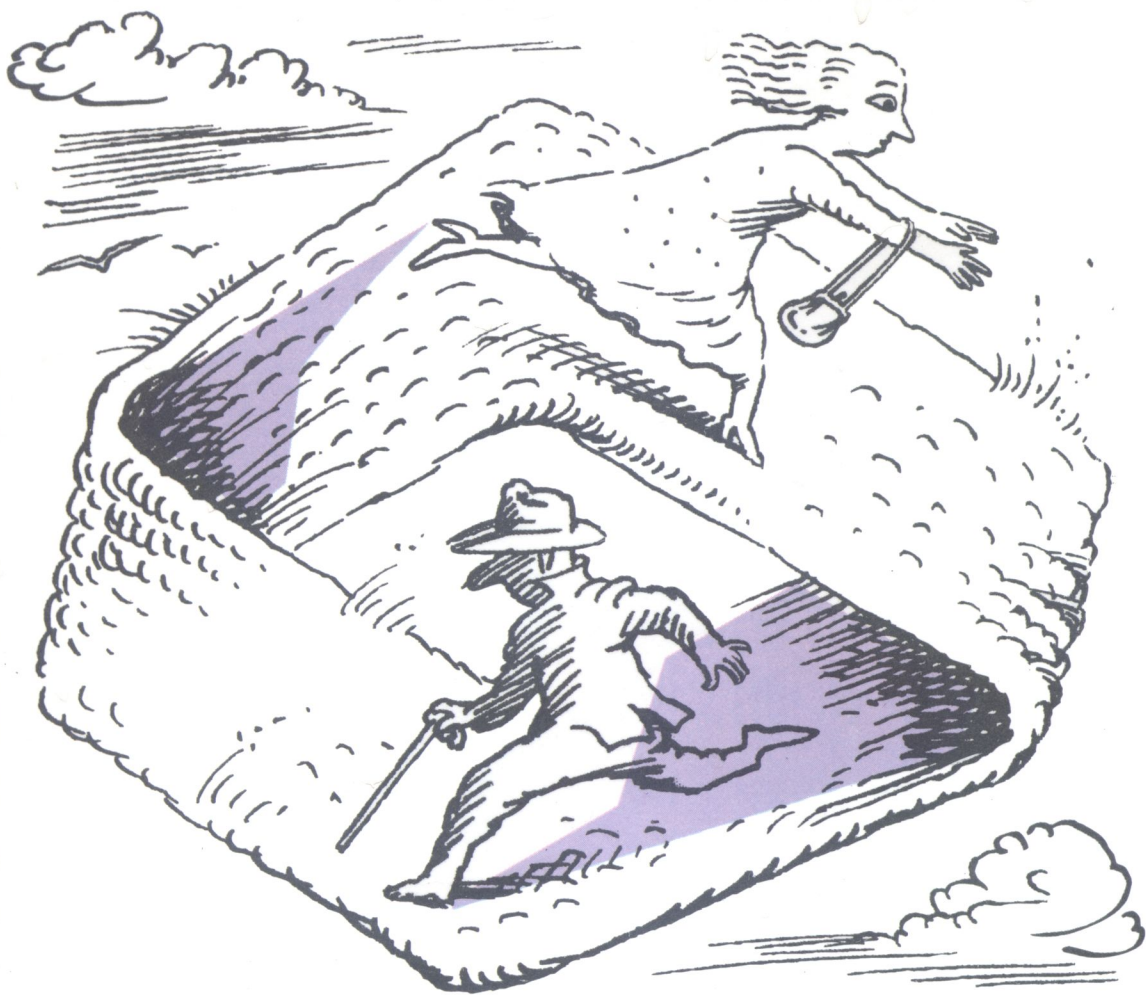




Т В О Й К Р У Г О З О Р

А. Б. Мигдал

# От догадки до истины



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПРОСВЕЩЕНИЕ»

От догадки до истины

А. Б. Мигдал





**ПРОСВЕЩЕНИЕ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО





---

Т В О Й      К Р У Г О З О Р

---

---

А. Б. Мигдал

---

ОТ ДОГАДКИ  
ДО ИСТИНЫ

---

Иллюстрации С. П. Тюнина

М О С К В А

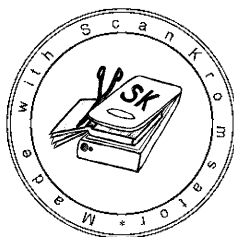
« П Р О С В Е Щ Е Н И Е »

2 0 0 8

УДК 087.5:53  
ББК 22.3  
М57

Серия «Твой кругозор» основана в 2007 году

Текст подготовлен Е. В. Нетесовой



Scan AAW

**Мигдал А. Б.**

М57 От догадки до истины : [для ст. шк. возраста] / А. Б. Мигдал; ил. С. П. Тюнина. — М.: Просвещение, 2008. — 175 с.: ил. — (Твой кругозор). — ISBN 978-5-09-016005-6.

Автор, крупнейший физик-теоретик, пишет о психологии научного творчества, о превращении смутной догадки в истину, отражающую тот или иной закон природы. Прочитав книгу, каждый любознательный читатель ощутит всю красоту логических построений и узнает, какими методами руководствуется наука на пути к познанию.

**УДК 087.5:53  
ББК 22.3**

**ISBN 978-5-09-016005-6**

© Издательство «Просвещение», 2008  
© Издательство «Просвещение»,  
оформление, дизайн серии, 2008

# СОДЕРЖАНИЕ

---

|   |     |
|---|-----|
| О ЧЕМ ЭТА КНИГА   | 7   |
| ЧУДЕСА МНИМЫЕ И ПОДЛИННЫЕ   | 9   |
| ЧТО МЕШАЕТ ВЗАИМОПОНИМАНИЮ?                                       | 10  |
| О ПСЕВДОНАУКЕ   | 26  |
| ПРИБЛИЖЕНИЕ К ИСТИНЕ  | 30  |
| ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАУЧНОГО ТВОРЧЕСТВА                   | 40  |
| ПОБУЖДЕНИЯ К НАУЧНОМУ ТВОРЧЕСТВУ                                  | 41  |
| ИНСТРУМЕНТЫ ПОЗНАНИЯ  | 47  |
| СЕКРЕТЫ РЕМЕСЛА   | 53  |
| О КРАСОТЕ НАУКИ   | 69  |
| ПОИСКИ КРАСОТЫ  | 69  |
| СИММЕТРИЧНО ЛИ ПРОСТРАНСТВО?                                      | 83  |
| ВНУТРЕННЯЯ СИММЕТРИЯ  | 88  |
| ИСТОРИЯ ОДНОЙ СИММЕТРИИ   | 93  |
| КАК РАБОТАЮТ ФИЗИКИ   | 102 |
| ЗАДАЧИ ФИЗИКИ   | 102 |
| КАК СОЗДАВАЛАСЬ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ                                  | 106 |
| ВЫЧИСЛЕНИЯ БЕЗ ВЫЧИСЛЕНИЙ   | 126 |
| КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ЧАСТИЦ И ПОЛЕЙ                                   | 132 |
| ПУСТОТА, ЯДРА, ЗВЕЗДЫ   | 140 |
| КАК УСТРОЕНА ПУСТОТА  | 140 |
| НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВАКУУМА И НЕОБЫЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЯДЕРНОГО<br>ВЕЩЕСТВА | 150 |
| СУДЬБА НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД   | 157 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ  | 165 |
| СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ  | 167 |

Эта книга выходит почти через два десятилетия после того, как смерть автора оборвала работу над ней. Аркадий Бенедиктович Мигдал (11.03.1911 – 9.02.1991) был уникальным человеком и прожил уникальную жизнь. Его основные научные работы посвящены теории атомного ядра. За вклад в ядерную физику он был избран членом-корреспондентом АН СССР в 1953 г. и действительным членом (академиком) – в 1966 г. Он был великолепным Учителем, воспитавшим несколько десятков первокурсников физиков, среди которых А.М. Будкер – основатель ядерной физики в Сибири, В.М. Галицкий, А.И. Ларкин.

Вместе с тем А.Б. Мигдал был разносторонним человеком. Он снял первый советский подводный фильм «Над нами Японское море» и получил удостоверение инструктора подводного спорта №1. Страстно любил горы и провел много счастливых часов и дней на ледниках Кавказа и Памира. На рубеже своего сорокалетия А.Б. занялся скульптурой и резьбой по дереву. Поистине безграничным был круг интересов этого человека, и все, что бы он ни делал, было талантливо.

Последнее десятилетие своей жизни А.Б. увлеченно работал над пропагандой науки. Написал книги «Поиски истины» (1983), «Квантовая физика для больших и маленьких» (1989). Стал главным редактором «Энциклопедического словаря юного физика». Книга, которую вы держите в руках, представляет собой новое переработанное издание «Поисков истины», подготовленное Е.В. Нетесовой по материалам А.Б.

*Академик  
Л.Б. Окунь*

## О ЧЕМ ЭТА КНИГА

Речь пойдет о методе познания, красоте науки, психологии научного творчества, возникновении и развитии физических теорий... Эта книга написана физиком, однако обсуждается в ней не только физическая наука, но и особенности научного творчества вообще. Обычно об этом пишут не ученые, а науковеды, изучающие структуру науки, подобно тому, как статьи об искусстве пишут искусствоведы, а не художники. Рассказанное здесь возникло из размышлений и споров людей, занимающихся не «наукой о науке», а самой наукой.

Это результат переработки и развития «Поисков истины»<sup>1</sup>. За годы, прошедшие после ее издания, обнаружились неудачно написанные разделы, упущенные проблемы. Я получил множество писем с замечаниями и пожеланиями и не меньшее количество трактатов с фантастическими проектами перестройки существующей науки. Оказалось, что многие читатели с интересом вникают в сложные рассуждения, но бросают книгу, столкнувшись с самой простой математической формулой...

Чтобы сделать рассказ о науке более убедительным и привлекательным для всех любознательных читателей, даже тех, кто забыл школьную физику и математику, пришлось и упростить изложение по сравнению с «Поисками истины», и включить много нового. Страницы, которые кажутся мне удачными, остались без изменения.

Вот слова из предисловия к «Поискам истины», которые в равной мере относятся и к этой книге:

«Я хочу, чтобы вы увидели путь от догадки до истины не со стороны, а изнутри, двигаясь рядом с проводником. Возможно, я не всегда поведу вас самой простой дорогой, но это не означает, что в путь могут отправиться только избранные. Я приглашаю следовать за мной каждого, кто решится сделать усилие.

Не смущайтесь, если не все будет понятно — ведь слово «понимать» имеет все оттенки от полной ясности, которая не всегда бывает и у автора, до смутного ощущения. Но даже и оно постепенно неведомыми путями приводит к более глубокому пониманию. Не бойтесь пропустить при первом чтении сложное рассуждение — читайте дальше. Если вы не

<sup>1</sup> Мигдал А.Б. Поиски истины. М., 1983.



в ладах с математикой, пропускайте даже те простые формулы, которые я решился написать. Утратится многое, но не главное...

...Я постарался отбросить несущественные трудности, а те, что остались, отражают существо дела — ведь нам придется проследить, как возникли и развивались самые сложные построения современной физики: теория относительности, квантовая теория, физика элементарных частиц...»

В начале каждой главы кратко пересказано ее содержание. Специальные термины разъясняются в конце книги в словаре. Его можно использовать и как предметный указатель.

Я писал эту книгу, мысленно беседуя с авторами присланных мне писем. Надеюсь, они найдут здесь некоторые ответы.

Если что-то вызовет возражения, я, повторяя мысль Нильса Бора, прошу понимать мои суждения не как утверждения, а как вопросы.

# ЧУДЕСА МНИМЫЕ И ПОДЛИННЫЕ

---



С началом информационного взрыва на наши головы ежедневно обрушивается поток непроверенных фактов и слухов — верить в сверхъестественное стало модой и даже признаком утонченности. Летающие тарелки, управляемые гуманоидами, снежный человек и «лохнесское чудовище», Бермудский треугольник и филиппинские врачеватели, экстрасенсы и ясновидцы, передвижение предметов силой духа — все может «напредставить себе покладливый ум человеческий», по выражению Достоевского.

Как отличить истину от заблуждения? Постараемся ответить на несколько вопросов.

Что затрудняет понимание научных открытий? В чем разница между научной и житейской оценкой достоверности? Вправе ли мы доверять своим глазам? Как рождаются легенды и заблуждения? Каковы те малые ошибки в рассуждениях, которые приводят к антинаучным заключениям?

Мы подробно обсудим проблему профессионалов и дилетантов, имеющую самое прямое отношение к теме этой главы.

Надеюсь, что все, о чем дальше пойдет речь, хоть немного поможет отличать разумное от неразумного, ловкий трюк от научной истины, чудо мнимое от подлинного чуда гармонии Вселенной.

Прежде всего попробуем понять, что затрудняет общение людей, далеких от науки, с представителями точных наук.

## ЧТО МЕШАЕТ ВЗАИМОПОНИМАНИЮ?

На первый взгляд ясно, что общение специалистов с людьми других профессий затрудняет терминология. Но это препятствие легко преодолеть — отбросить лишние термины, а необходимые перевести на русский язык. Вот пример из медицинского справочника: «Реноваскулярная гипертензия резистентна к гипотензивной терапии». Это значит, что повышение давления, вызванное сужением почечных артерий, трудно лечить средствами, понижающими кровяное давление. Впрочем, применение сложной специальной терминологии в медицине часто вызвано побочными соображениями — иному больному не следует знать, о чем говорят врачи. Но чем хуже научно осмыслена область знаний, тем пышнее и непонятнее терминология, прикрывающая пустоту. Вот такую фразу перевести на русский язык уже невозможно (да и не нужно): «Пространство может быть понято, как внезапно явленная внесубстанциональная протяженность, порожденная выходом трансцендента из состояния самодовления или процессом его поляризации внутри себя»...

Более серьезные трудности взаимопонимания вызваны непривычными представлениями, для понимания которых требуется психологическая перестройка. Как трудно было в XV веке осознать, что Земля круглая, а позже — что она движется вокруг Солнца! В XX веке положение усложнилось. Наука стала иметь дело с понятиями, которые выходят за рамки повседневного опыта: атомы, электроны, ядра нельзя увидеть даже в микроскоп, их свойства выясняются только по косвенным следствиям; изучаются явления, происходящие при скоростях, сравнимых со скоростью света. Возникли понятия, противоречащие привычным представлениям — скачкообразность энергии, относительность одновременности, невозможность одновременно измерить координаты и скорости... Мы будем позже говорить о них подробнее.

Означает ли это, что некоторые научные выводы вообще нельзя разъяснить непосвященному? К счастью, это не так. Я убежден, что можно дать представление даже о самых сложных понятиях современной физики. Для этого требуется выделить суть явлений, отбросив несущественные трудности.

Выделение сути полезно и для самой научной работы: оно углубляет понимание. Существует замечательное явление — глубокая научная мысль выигрывает от упрощения. В искусстве, наоборот, законченное произведение нельзя упростить, это уничтожит образ. Слова Пушкина о переводе «Илиады» на русский язык: «Слышу умолкнувший звук божественной эллинской речи, старца великого тень чую смущенной душой», — после упрощения превратятся в замечание: «Гнедич перевел Гомера довольно близко к оригиналу».

Можно анализировать элементы, из которых складывается произведение искусства, но его очарование нельзя разложить на части. Пушкин очень точно выразил это в знаменитых словах Сальери: «...музыку я разъял, как труп...». Научное открытие не умирает от такого «разъятия», здесь сведение к элементам возможно. Поэтому и существует такое замечательное явление, как популяризация науки, почти невозможная в области искусства. Для то-

го, чтобы понять творчество Пушкина, Достоевского, Пикассо или Стравинского, нужно обладать тем тонким и неуловимым свойством, которое называют «художественным вкусом», а чтобы выработать его, необходимо долгое систематическое воспитание. До понимания значительных явлений в искусстве нужно подняться, дорасти, а достижения науки можно «опустить», представить в форме, доступной любому, кто обладает простым здравым смыслом. Как это сделать?

Существуют два вида популяризации. Первый — несущий легкий успех, простой, эффектный и наиболее часто встречающийся, — разговоры по поводу науки, рассказ о ее практических применениях. Гораздо более трудная и благородная цель — показать красоту науки и скрытую за ней красоту и гармонию внешнего мира, создать «физическую картину» явления, упростить научные результаты, сохранив смысл. Для этого нужна серьезная научная работа, и выполнить ее могут только сами ученые.

Многие популярные книги выдающихся ученых дают не меньший толчок развитию науки, чем их оригинальные работы. Чтение таких книг иногда требует больших усилий, но зато в них не опущены серьезные проблемы и упрощение не переходит в вульгаризацию.

Популяризация науки — хоть и трудная, но разрешимая задача, и не в этом главная сложность взаимопонимания. Набольшие препятствия, как ни странно, возникают не при обсуждении сути явлений, а при попытках объяснить, что такое научный подход к явлениям природы. Почему ученые так педантичны в отборе фактов? Почему они часто отрицают то, о чем свидетельствуют очевидцы? Почему требуют обязательной экспериментальной проверки истин, которые кажутся очевидными?

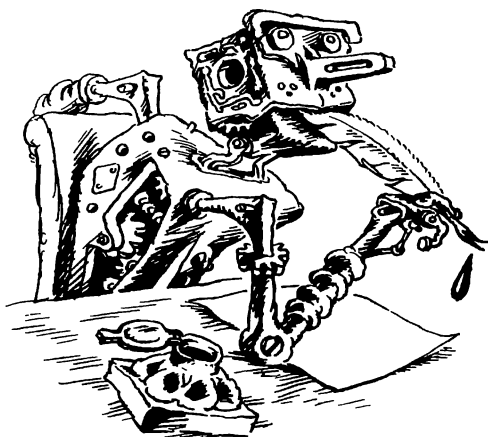
Поэтому прежде чем говорить о самой науке, мы подробно и на многих примерах обсудим, что такое научный метод познания, каким путем наука постепенно приближается к истине.

### Границы возможного

Научный подход начинается с определения границ области, которая включает достижения науки, не вызывающие сомнений, и границ области невозможного, того, что противоречит многократно проверенным и прочно установленным научным фактам. Вне этих областей лежит необозримое пространство явлений неизученных, но возможных. Например, можно уверенно сказать, что дальнейшее развитие науки никогда не заставит нас усомниться в том, что Земля круглая, или поверить в существование вечного двигателя, то есть, в возможность грубого нарушения закона сохранения энергии. Но изучение точной формы Земли или проверка закона сохранения энергии во взаимодействиях элементарных частиц остаются задачами науки.

При проведении границ достоверного и невозможного сразу же проявляется различие научного и житейского подходов.

Стало реальностью многое из того, что еще недавно казалось чудом. Разве не удивительно, сидя дома, видеть и слышать происходящее за тысячи километров, общаться с людьми, находящимися на другом краю Земли? Разве не чудо, что человеку удалось посмотреть на нашу планету со сторо-



ны? Разве можно было несколько десятилетий назад предвидеть, что будут созданы машины, уместающиеся на столе и даже в кармане, которые играют в шахматы, переводят на другие языки, редактируют и печатают газеты, пишут стихи и музыку, а главное — за несколько минут выполняют вычисления, на которые без них потребовались бы усилия целого поколения математиков? Надо ли удивляться, что в представлении людей, далеких от науки, границы стираются, все кажется возможным?

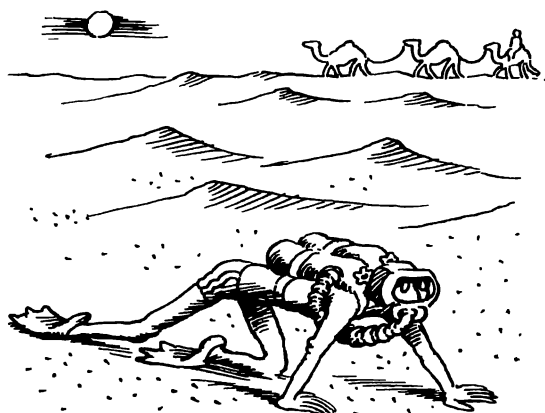
Естественно, возникают вопросы: «А знает ли сама наука, где эти границы? Не может ли произойти такая научная революция, которая перевернет все наши представления?»

Из истории и логики развития науки следует, что такой переворот невозможен.

Даже ошеломляющие идеи теории относительности не были внезапным и всеобъемлющим переворотом, а возникли как следствие развития науки и опирались на прочный фундамент завоеваний прошлого. Эти идеи коснулись сравнительно узкого круга вопросов и практически не изменили установленных прежде законов механики и электродинамики тел, движущихся с обычными скоростями. Просто наши знания распространились на неизученную до того область скоростей, сравнимых со скоростью света.

До теории относительности было естественно предполагать, что законы механики и электродинамики справедливы и при скоростях больших, чем те, при которых они были экспериментально установлены. Сомнения начались лишь с появлением теоретических и экспериментальных доводов, противоречащих этому предположению. Таков обычный путь развития науки. Без подобных обобщений мы не могли бы наткнуться на противоречие и установить, что скорость света играет какую-то роль в классической механике.

Мы не знаем заранее, при каком изменении экспериментальных условий перестанет подтверждаться найденный нами закон природы. Чтобы обнаружить нарушение, следует сначала предположить самое простое: закон можно распространить и за пределы условий, при которых он был установлен. И проверять, не противоречит ли это новым экспериментам.



Мы твердо знаем, что дальнейшее развитие науки не отменит установленных соотношений, а только выяснит область их применимости. Именно стабильность достижений науки позволяет разграничить области достоверного и невозможного.

### Искать и сомневаться

Однако не всегда границы достоверного и невозможного устанавливались достаточно обоснованно. История знает случаи, когда в оценке возможного ошибались и сами ученые.

В начале XIX века Французская академия вынесла постановление не рассматривать работы, содержащие описания камней, падающих с неба. Казалось, что все описания метеоритов — «небесных камней», — плод фантазии, поскольку камням неоткуда падать. Это очень опасный путь — отрицать и отметать все, что еще не нашло объяснения.

Предвзятые мнения не раз тормозили развитие науки. Когда в 1930-х годах готовился эксперимент по проверке закона зеркальной симметрии при  $\beta$ -распаде, физики-теоретики были настолько уверены в его незыблемости, что высмеяли экспериментаторов, и эксперимент не был поставлен. Только через двадцать лет теоретики пришли к заключению, что закон этот может нарушаться именно при  $\beta$ -распаде, и опыт это подтвердил.

Один из самых выдающихся физиков XX века Вольфганг Паули считал непреодолимым недостатком теории электронов Дирака то, что она предсказывала существование позитронов, которые тогда еще не были обнаружены.

Даже Альберт Эйнштейн не избежал подобной ошибки. Создав общую теорию относительности (теорию тяготения) и показав, что вблизи массивных тел евклидова геометрия нарушается, Эйнштейн сделал следующий, неслыханный по смелости шаг. Он применил свою теорию тяготения к миру в целом, заменив, как это делается при изучении газа, истинное распределение масс во Вселенной на равномерное с некоторой средней плотностью материи.

Оказалось, что уравнения тяготения для такого мира не допускают стационарного — независящего от времени — решения. Между тем Эйнштейну хотелось получить решение, описывающее мир, замкнутый сам на себя, с независящим от времени радиусом кривизны. В этом и состояла предвзятость. Ему пришлось искусственно ввести в свои уравнения дополнительное слагаемое, нарушившее красоту теории.

Примерно в то же время замечательный петроградский математик А.А. Фридман исследовал возможные решения уравнений Эйнштейна и пришел к заключению, что Вселенная расширяется, и что наряду с замкнутой моделью Вселенной может — в зависимости от средней плотности материи — существовать открытая модель, в которой масштабы мира неограниченно возрастают. Эйнштейн согласился с работой Фридмана и отказался от дополнительного члена в уравнениях тяготения. Решение Фридмана получило экспериментальное подтверждение в 1929 году, когда американский астроном Эдвин Хаббл установил, что Вселенная расширяется.

В наше время все случаи подобных ошибок тщательно анализируются, из них делаются методологические выводы. Обсуждение спорных научных вопросов стало формой международного сотрудничества, в нем принимают участие ученые всех стран мира. Поэтому сейчас научные заблуждения если и возникают, то живут очень недолго.

Гораздо более живучи заблуждения, которые возникают вне науки или вопреки ей. Что же их питает? Один из самых распространенных аргументов: «мой знакомый» или «я сам» видел собственными глазами...

### Очевидное, но неверное

Что, если вы увидите собственными глазами, как экстрасенс летает по комнате? Прежде всего постарайтесь исключить наиболее правдоподобные объяснения: ловкий фокус, галлюцинация, гипноз, обман зрения... Все это несравненно более вероятно, чем нарушение хорошо проверенных законов тяготения.

Стакан может подпрыгнуть на метр под действием ударов молекул стола, которые случайно задвигались в одном направлении. Вероятность этого ничтожно мала. Когда замечательного польского физика Мариана Смолуховского спросили, как бы он отреагировал на подпрыгнувший стакан, он ответил: «Гораздо вероятнее, что я ошибся».

Удивительная доверчивость, с какой люди относятся к рассказам о мнимых чудесах, основана на свойственном человеку стремлении столкнуться с необычным. Мы применяем разные критерии здравого смысла в практической жизни и в оценке правдоподобности чуда. Все удивляются тому, что демонстрирует знаменитый фокусник в цирке, но никто не считает это чудом. Тот же фокус, проделанный экстрасенсом в полутемной комнате, объявляется сверхъестественным событием. Мы ни за что не поверим заверению маленького ребенка, будто чашка разбилась «сама», но готовы поверить, что можно согнуть вилку «силой духа». Дети, кстати, не столь легковверны, и Карлсону, который живет на крыше, пришлось обзавестись мотором с пропеллером. Взрослые не верят в Карлсо-



на, но с восторгом выслушивают, как в фешенебельный бразильский ресторан вошла трехметровая инопланетянка, прилетевшая на НЛО, и потребовала воды.

В спорах о летающих тарелках, управляемых гуманоидами, существует постоянная передержка: адепты инопланетян обвиняют ученых в том, что они будто бы отрицают само существование НЛО. Но специалисты и не думают с этим спорить, они лишь утверждают, что это явление атмосферной оптики, и нет ни малейших оснований считать их космическими кораблями.

Как же быть с показаниями очевидцев?

Нужно относиться к ним очень осторожно. История сохранила нам протоколы допросов Жанны д'Арк, в которых она отвечала своим судьям, что ясно слышала голоса святых, говоривших по-французски, видела их собственными глазами, разговаривала с ними, прикасалась к ним. И чаще всего в поразительной истории Орлеанской девы наше внимание привлекают именно эти чудеса, отодвигая на второй план подлинное чудо — семнадцатилетняя крестьянская девушка встала во главе королевской армии и выиграла несколько сражений, положив начало освобождению Франции. Но что говорить о средневековье, когда и в XIX веке, пользуясь показаниями очевидцев, можно было бы составить точные словесные портреты нечистой силы разного ранга, которые удовлетворили бы самого требовательного сотрудника уголовного розыска. Старец Зосима в «Братьях Карамазовых» Достоевского, в согласии с научным методом, посоветовал монашку, видевшему по ночам чертей, принять слабительное.

Есть случаи, когда без очевидцев нельзя обойтись. Шаровая молния не получена в лаборатории, и пока нет научных экспериментов, изучающих ее свойства. Но мы верим, что шаровая молния существует: свидетельства сходятся. Что касается ее свойств, то они выяснятся только после научно поставленных экспериментов.

Итак, свидетельства очевидцев нужно принимать так, как они того за-



служивают — как источник информации, требующий научной проверки и исследования. Но кто вправе оценить степень достоверности факта, еще не проверенного наукой? Тут мы подходим к проблеме профессионализма, которую вполне можно считать вечной, возникшей еще в мифологические времена, когда дилетант-сатир Марсий вызвал на состязание в игре на флейте самого Аполлона и был жестоко наказан легко победившим его богом-профессионалом.

## Профессионалы и дилетанты

Разбирая письма, которые приходят в ответ на мои книги, статьи, выступления по телевидению, я всегда поражаюсь тому, сколько любознательных, интересующихся серьезными проблемами людей не жалеют времени и сил на длинные (иногда на десятках страниц) письма, стремясь высказать то, что их волнует. В подавляющем большинстве таких писем обсуждается проблема профессионалов и дилетантов, причем их авторы горячо отстаивают свое право на любительское научное творчество. «Разве вправе кто-нибудь запретить человеку мыслить, размышлять, скажем, над проблемой мироздания?» — спрашивают они. Разве не заслуга дилетанта — свежий взгляд на вещи без оглядки на авторитеты? Разве мы не можем гордиться замечательными учеными-самоучками?

Известно, что Ампер и Фарадей не получили специального образования, Вольта учился в школе иезуитского ордена, Джоуль был пивоваром, Коперник, Гельмгольц и Майер — врачами, Авогадро, Лавуазье и Ферма — юристами... Даже в наше время, когда каждая область науки чрезвычайно специализирована и для занятий наукой недостаточно общего образования, можно найти множество подобных примеров. О литературе, например, и говорить нечего — писателей, получивших специальное образование, можно перечесать по пальцам, а рядом с ними, вернее, высоко над ними стоят инженер Достоевский, артиллерийский офицер Толстой, врач Чехов!

Но именно здесь кроется заблуждение. Люди, ссылающиеся на исторические примеры, забывают, что все перечисленные «дилетанты» достигали успеха, только став образованнейшими в новой области специалистами, овладев секретами нового ремесла, переучившись заново.

Открытие древней Трои — редчайший случай успеха непрофессионального археолога. Но замечательный энтузиаст Генрих Шлиман, торопясь сделать открытие, пренебрегая азбучными истинами и непреложными правилами науки, допустил уничтожение верхних слоев раскопок, которые навсегда погибли. Археологи в досаде называли его «человеком, который закопал Трою»...

Для того, чтобы стать профессионалом, не обязательно иметь диплом об окончании университета. Единственное неукоснительное требование, единственный входной билет — профессиональная грамотность, независимо от способа ее приобретения. Все обвинения в кастовости, элитарности научной среды, которая будто бы не желает допускать посторонних, не имеют под собой ни малейшего основания. Трудно представить себе среду более демократичную. На наших научных семинарах нередко

можно услышать, как толковый студент обрывает профессора и высказывает свою точку зрения, которая может противоречить мнению академика, но обсуждается наравне.

Есть области человеческой деятельности, где главную роль играют здравый смысл и свежий взгляд — здесь посторонний человек иногда может поспорить с профессионалом, скажем, изобрести хороший консервный нож или усовершенствовать кресло самолета. Но создать самолет новой конструкции он сможет только изучив в процессе работы все тонкости аэродинамики, физики, техники, технологии, после чего, сам того не замечая, станет специалистом.

Профессионального подхода и профессионального обучения требует любая специальность. Неопытный человек никогда не сумеет так ловко и аккуратно подмести двор, как настоящий дворник. Никто не захочет, чтобы его оперировал хирург-любитель. Чтобы стать певцом, надо не только иметь голос, но и долго учиться. Без специального образования, пользуясь лишь одним здравым смыслом, нельзя анализировать произведение искусства, хотя, к сожалению, это часто делается; нельзя даже судить, «хорошо» оно или «плохо», не понимая задач, который ставил перед собой автор, средств, которые он использовал. Можно сказать только «мне нравится» или «мне не нравится». В науке даже такое заявление требует определенного уровня знаний. Чтобы сказать «мне не нравится теория относительности», надо хотя бы понимать смысл утверждений этой теории.

Профессионал — это тот, кто в совершенстве владеет методами своей специальности, знает все подводные камни, опасности и секреты ремесла. Профессионализм — здравый смысл научной работы, ее необходимое, но не единственное условие. Еще важнее внезапные скачки мысли, озарение, интуиция... Однако неожиданные идеи, выживающие после проверки, рождаются только на основе профессионализма. Научная интуиция рождается лишь в результате долгой серьезной научной работы.

Вероятность того, что неосведомленный человек подскажет глубокую научную мысль, так же мала, как вероятность попасть в сапоги, прыгнув с колокольни. Что может посоветовать специалистам, работающим на переднем крае науки, инженер, продавец или бухгалтер, знакомящиеся с современной физикой по популярным книгам, которые отстают от последних достижений науки на пятнадцать-двадцать лет? Естественные науки и особенно современная физика, где все области взаимосвязаны, требуют длительной и напряженной подготовки, развития способности гибко и широко мыслить, изменять систему взглядов с каждым новым открытием, пересматривать привычные представления. Без этой способности ничего серьезного сделать в науке нельзя. Естественно, что профессионал с горьким чувством слушает человека, который занимается наукой «в свободное время». Ей нужно посвятить всю жизнь.

Те, кто стоит на переднем крае науки, не могут допустить предвзятости. На любую серьезную научную работу десятки специалистов смотрят под разными углами зрения, обсуждая ее с автором при зарождении, после докладов на семинарах, после публикации в научном журнале. По-

этому любимый довод дилетанта «со стороны виднее» звучит смехотворно. Специалистов действительно ограничивают их знания, но в разумных пределах: ученый отказывается от привычных представлений только тогда, когда новые взгляды не противоречат установленным фактам. А дилетантам с фактами считаться не приходится, хотя бы потому, что они их не знают. Они лишены предвзятости, как младенец, не знающий всей сложности окружающего мира.

Дорогу к научной истине можно облегчить, обращаясь за разрешением спорных вопросов к специалистам. Специалисты по атмосферной оптике, как мы уже говорили, хорошо знают о существовании неопознанных летающих объектов и утверждают, что это не что иное, как оптические явления, многие из которых удастся воспроизвести в лаборатории. Поведение НЛО — сверхсветовые скорости, чудовищные ускорения, которых не выдержит ни один материал во Вселенной, — доказывает, что это не материальный предмет, а разновидность светового зайчика. Океанологи говорят, что в Бермудском треугольнике не происходит никаких таинственных явлений, которые не могли бы произойти в другом месте океана...

Специалистов охотно обвиняют в том, что они боятся новых идей, разоблачения своей профессиональной непригодности. Но это относится только к плохим специалистам, которых научная среда не терпит и быстро выталкивает в окружающее пространство. Говоря о научной среде, мы имеем в виду совокупность людей, активно участвующих в создании научных ценностей. К сожалению, под это понятие не всегда подходят люди, имеющие высокие научные звания и занимающие высокие административные посты. Постороннему трудно их распознать, но тем, кто делает науку, хорошо известно, кто есть кто. Впрочем, псевдоученых легко распознать по косвенному признаку: они надеются прославиться, пытаясь опровергнуть созданное великими учеными, поскольку сами ничего нового создать не могут. Настоящие крупные организаторы науки никогда не претендуют на соавторство.

Имеется много профессиональных приемов, общих для всех точных наук. Есть методы, позволяющие проверить ошибочность идеи еще до начала работы. Существуют способы разбить задачу на более легкие, которые сравнительно просто решать. После решения упрощенной задачи несравненно легче решать сложную. И очень важно обсуждать работу со специалистами на всех стадиях, от первой догадки до полного завершения.

Огорчительно, а порой и опасно, когда люди, не имеющие к науке прямого отношения, не только берутся судить о вещах, требующих профессиональных навыков мышления, но и надеются, минуя стадию обучения, совершить переворот в науке. Есть еще одно важное правило, о котором забывают дилетанты: когда речь идет о науке, мы не вправе доверяться ощущениям. В отличие от старого девиза первых христианских богословов «верю, потому что абсурдно», смысл которого заключается в том, что вера вступает в свои права там, где разум отказывается понимать, в науке прежде чем поверить, нужно спросить себя, есть ли для этого разумные основания.

### **«Хочется верить, но нет оснований»**

Наука не только устанавливает границы возможного, но и безжалостно отделяет догадки, пусть даже правдоподобные, от доказанных утверждений. Если бы не это ограничительное правило, наука потонула бы в море суеверий и шатких предположений. Отделяя правдоподобное от доказанного, наука выясняет, какие утверждения требуют дальнейших исследований.

Для возникновения жизни во Вселенной должно совпасть так много условий, что это крайне маловероятно. Даже возникнув, живые организмы легко погибают под воздействием неблагоприятных мутаций и различных катаклизмов.

Сейчас доказано, что четырнадцать миллиардов лет назад Вселенная была настолько горячей, что в ней не существовало не только живых организмов, но и атомов, молекул, ядер, даже нейтронов, протонов и прочих известных нам ныне элементарных частиц. Была некая «праматерия».

Многочисленные оценки ученых хотя и сильно отличаются друг от друга в количественном отношении, но сходятся на том, что появление во Вселенной разумных существ за такой короткий по масштабам эволюции период почти невероятно. Мы представляем собой редчайшее исключение, чему надо радоваться и удивляться.

И все же, несмотря на малую вероятность, предположение о существовании внеземных цивилизаций не относится к области невозможного. Пришельцы из других миров могли бы посетить Землю. Но нет никаких оснований утверждать, что они здесь действительно побывали.

Разумеется, неприятно сомневаться во всем необычном и таинственном. Но зато в результате такого отбора, как в случае с Жанной д'Арк, яснее выступает не мнимое, а подлинное чудо.

Возьмем известный «парадокс близнецов». Если один из них отправится путешествовать на корабле, движущемся со скоростью, сравнимой со скоростью света, то, вернувшись, окажется моложе брата, не совершившего путешествие. Это удивительное утверждение доказано не только теоретически, но и экспериментально. Сверхточные атомные часы, отправленные на самолете, показали после возвращения меньшее время, чем часы, оставшиеся на земле. Конечно, скорость самолета много меньше скорости света, поэтому запаздывание было небольшим, порядка  $10^{-8}$  секунды. Тем не менее запаздывание не только было установлено, но и совпало в пределах ошибок эксперимента с предсказанием теории относительности.

Еще один пример. Всегда считалось, что морские фауна и флора существуют только на небольших глубинах, куда проникают солнечные лучи и возможен фотосинтез. Но в недавнее время на дне океана на глубине нескольких километров, где нет и следа солнечных лучей, были обнаружены области повышенной температуры вулканической природы, где возникла своя флора и фауна. Докладывал об этом известный океанолог. Когда зашла речь о «лохнесском чудовище» и снежном человеке, он сказал: «Очень хочется верить, но нет оснований... Для подобных существ нет биологической ниши». Это означает, что вопрос изучался, исследо-



вание показало, что нет оснований доверять первоначальным утверждениям. Это и есть формула научного подхода: хочется верить, но, раз нет оснований, от веры надо отказаться.

Под эту формулу подпадает и такое явление, как телепатия, о которой можно поговорить подробнее.

### Можно ли верить в телепатию?

Критический отбор информации — один из важнейших элементов научного познания. Разница между научной и житейской оценкой достоверности отчетливо проявилась в спорах о телепатии. Под телепатией понимается передача информации на расстояние, когда полностью исключена возможность светового, звукового, любого другого контакта между передающим и принимающим. Гипноза без контакта не существует, поэтому он не подходит под это определение и не доказывает существования телепатии.

Есть множество интереснейших и неизученных явлений, связанных с повышенной нервной чувствительностью. Если вы держите за руку человека, обладающего такой повышенной чувствительностью, или даже просто стоите с ним рядом, то, сами того не сознавая, можете передавать ему информацию незаметными неконтролируемыми движениями или звуками, подсознательно корректируя его действия сигналами типа «да» или «нет». Эти так называемые идеомоторные явления легко спутать с телепатией, хотя они, как и гипноз, вовсе ее не подтверждают.

Не вызывает сомнений способность чувствовать настроение и даже угадывать мысли близких. В жизни каждого из нас бывают события, которые, казалось бы, ничем другим, кроме телепатии, не объяснить. Близкие люди узнают мысли друг друга по едва заметным признакам, не отдавая себе отчета в источниках догадки.

Когда специалисты, посвятившие себя исследованию подобных явлений, утверждают, что пока нет научных доказательств существования те-

телепатии, это означает, что, несмотря на многочисленные попытки, не было надежных экспериментов, которые исключали бы все другие возможные объяснения и давали бы повторяющиеся результаты с убедительной статистикой. Естественно, что большинство ученых скептически относятся к телепатии.

Но научная добросовестность не позволяет утверждать, что телепатии нет. Можно только сказать, что в процессе тщательных поисков явление не было обнаружено и поэтому его существование маловероятно.

Много лет назад, когда я был моложе и легковвернее, мне захотелось проверить, нет ли у меня способности передавать мысли. Бросая монету, я ставил на бумаге случайно чередующиеся плюсы и минусы, смотря по тому, что выпадало — орел или решка. Мой друг, не видевший записи, сел на другом конце стола с завязанными глазами, и я начал «телепатировать» ему свой список. Глядя на плюс, думал о чем-то волнующем, глядя на минус, представлял себе что-то нейтральное, спокойное. Второй участник должен был ставить плюс, чуя мое волнение, и минус, чувствуя спокойствие. Когда два листка сверили, я был потрясен — расположение плюсов и минусов совпало без единой ошибки! Увидев, что я отношусь к этому слишком серьезно, друг пожалел меня: «Когда ты думал о волнующем, то сопел, и я ставил плюс, а когда дышал тихо — минус».

Неубедительность экспериментов такого рода состоит в том, что очень трудно исключить все простые объяснения. Циклотрон не заинтересован в том, чтобы обмануть экспериментатора, но в экспериментах по телепатии роль приборов играют люди, часто заинтересованные в обмане.

Эксперимент по проверке способностей к телепатии должен ставить целый консилиум специалистов с участием физиков, биологов, физиологов, психологов, наконец, иллюзионистов, которые помогут исключить простые объяснения.

Не меньшие споры вызывает и телекинез — способность перемещать легкие предметы усилием воли без физического воздействия с помощью так называемого «биополя».

### Существует ли «биополе»?

Вокруг живых существ существуют физические поля — электрическое, световое, звуковое, тепловое. Измеряя, например, электрическое поле, изменяющееся в ритме сердца, можно снимать кардиограмму, не касаясь тела. Часто «биополем» называют именно эти поля, вызывая немалую путаницу. Электроны, атомы, молекулы живого организма ничем не отличаются от таких же частиц неживой природы, и создаваемые ими поля — это обычные физические поля, которые можно измерить физическими приборами. Неразумно давать им особое название.

В лаборатории по изучению физических полей живых объектов Института радиотехники и электроники была поставлена задача с помощью современных приборов всесторонне исследовать поля, окружающие человека. Эти работы с участием биологов, физиологов, медиков дали интереснейшие результаты, касающиеся некоторых явлений, которые можно было бы называть «экстрасенсорными».

Полученные результаты сняли покров мистики с действий врачей-терапевтов, которые нередко ставят верный диагноз, проводя руками вдоль тела пациента. С помощью современного тепловизора можно измерить разность температур с точностью до сотых долей градуса. Оказалось, что больной орган остро реагирует на слабый тепловой поток. Кровь энергично приливает к участку кожи, слегка разогретому рукой врача-терапевта, после чего температура в том месте заметно повышается. Сигнал легко воспринять и поставить правильный диагноз.

Физические поля, излучаемые человеком, быстро убывают с расстоянием и уже в нескольких метрах неотличимы от случайных «шумовых» полей. Они не могут объяснить таких явлений, как передача мыслей или изображений на большие расстояния. Но, может быть, кроме известных, есть еще не обнаруженные физические поля?

На тех размерах и энергиях, которые существенны для биологических явлений, даже вплоть до размеров атомов и ядер, все сколько-нибудь заметные поля, действующие на физические объекты, исчерпывающе изучены. Если бы, скажем, на электрон, движущийся в ускорителе, действовало еще какое-то даже ничтожное поле, его движение отличалось бы от расчетного, и это немедленно проявилось бы на опыте. Вероятность обнаружить в макроскопической области физическое поле новой, еще неизвестной природы настолько мала, что с ней вряд ли следует считаться.

Но, может быть, существует какое-то нефизическое взаимодействие биологических объектов?

В науке давно уже принято очень простое и убедительное предположение, что процессы, происходящие в живой природе, определяются в конечном счете законами взаимодействия электронов, атомов и молекул, установленными в физических экспериментах. До сих пор эта гипотеза подтверждалась. Больше того, она оказалась настолько плодотворной, что помогла объяснить даже такое таинственное явление, как наследственность.

Но нам придется от этой гипотезы отказаться, если убедительные эксперименты докажут, что в живой природе есть процессы, не сводящиеся к физическим законам. Например, если будет обнаружено поле, не проявляющееся в физическом эксперименте, действующее не на физические приборы, а непосредственно на биологические объекты. Нет ли каких-нибудь нефизических полей, которые принимаются и испускаются живыми существами и дают право на существование такому чудесному явлению, как телепатия? Однако прежде чем прийти к такому важному заключению, как существование нефизических полей, передающих воздействие или информацию, следует со всей возможной убедительностью установить само явление, исключив все более простые объяснения.

Конечно, такое поле не могло бы перемещать неодушевленные предметы или уменьшать силу тяжести — это прямо противоречит хорошо установленным физическим законам. Ведь ни в одном добросовестном физическом эксперименте желание экспериментатора не влияет на результат измерений, хотя физикам приходится иметь дело с необычайно легкими и легко перемещающимися предметами. Даже самые слабые воз-

возможности изменять вес сделали бы невозможным такое простое измерение, как взвешивание на аналитических весах — при равном весе одна из чашек становилась бы тяжелее по желанию экспериментатора. Как может случиться, что физики, измеряя силу тяжести до миллиардной доли грамма, не обнаружили грубого нарушения законов тяготения? Тщательный анализ выигрышей в рулетку не показывает отклонений от теории вероятности. А ведь стоило бы экстрасенсу заняться перемещением шарика, как все расчеты вероятности выигрыша были бы нарушены.

Мы оставляем в стороне возможные чисто физические причины перемещения легких предметов, которые всегда учитываются в физических экспериментах — например, электризация или давление ультразвука, испускаемого живым объектом. Такие явления относятся к биофизике и не имеют ничего общего с миром сверхъестественного, который так волнует людей, далеких от науки.

Итак, особое «биополе» пока ни в каких убедительных экспериментах не проявляется. Но доказывает ли это, что его не существует?

### Презумпция здравого смысла

Юристы еще в Древнем Риме при решении дел исходили из презумпции невиновности: обвиняемый считается невиновным, пока его вина не доказана. Наука, сталкиваясь со спорными вопросами, исходит из презумпции отсутствия чуда. Нельзя требовать от ученых объяснения странных и непонятных явлений, пока любители романтики не докажут, что такие явления существуют.

Это, конечно, не означает, что следует запретить попытки обнаружить неправдоподобные явления. По словам замечательного американского физика Ричарда Фейнмана, один из верных способов остановить прогресс науки — разрешить эксперименты лишь в тех областях, где законы уже открыты.

Серьезные экспериментаторы, непредвзято исследующие явления такого рода, как телепатия, могут прийти к интереснейшим результатам. Можно сомневаться в том, что они обнаружат саму телепатию, но то, что по пути откроют много других удивительных явлений — несомненно. Единственное требование — эксперименты должны быть научными, подчиняться правилам, принятым в науке со времен Фрэнсиса Бэкона. Толчок для рождения идеи могут дать и рассказы очевидцев, и предположения фантастов, и поверья, и слухи, и неожиданные ассоциации, но от догадки до истины так далеко, что из сотен гипотез едва выживает одна.

Задача науки — отбирать наиболее правдоподобные объяснения и придерживаться их до тех пор, пока опыт не заставит от них отказаться.

Одного только желания доказать невероятное недостаточно. Сначала нужно сформулировать исследовательскую задачу, найти и разработать достаточно убедительный метод исследования, который позволил бы установить явление. Экспериментатор не должен ставить перед собой задачу доказать или опровергнуть существование, скажем, той же телепатии. Задача состоит в том, чтобы всесторонне изучить все способы возможного взаимодействия между людьми. Стремление непременно доказать или опроверг-



нуть часто приводит к недобросовестности в постановке эксперимента. Открытие возникает только как побочный продукт глубокого исследования.

Теперь мы вполне готовы к обсуждению вопроса о том, как возникают легенды и поверья и почему они так живучи.

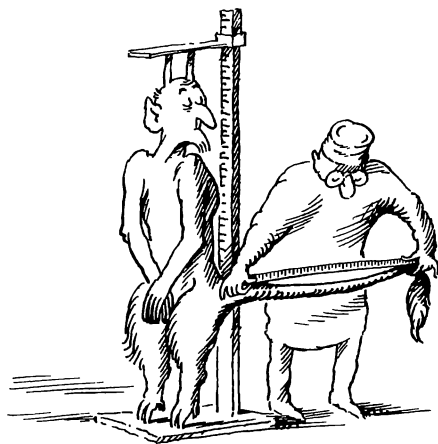
### Как рождаются легенды

Стремление к таинственному, необъяснимому, жажда чуда заложены в природе человека так же, как и тяга к прекрасному.

Эйнштейн говорил, что самое прекрасное и глубокое переживание, выпадающее на долю человека, — ощущение таинственности. Оно, по мнению Эйнштейна, лежит в основе всех глубоких тенденций в науке и в искусстве. Ощущение таинственности питало мифологию, архитектуру, музыку. Восторженное ощущение чуда пронизывает средневековую философию, из него возникли каменные кружева грандиозных европейских соборов, улыбка Джоконды... Но пока Коперник, Кеплер, Галилей открывали тайны мироздания, люди вызывали и заклинали демонов, занимались магией, физиогномикой, хиромантией, верили в привидения и в дурной глаз, устраивали охоту на ведьм и так далее.

И в наше время сосуществуют два мира — большой и малый. В большом создают искусственное сердце и межпланетные станции, в малом по-прежнему вертятся спиритические столы, по рукам ходят снимки пришельцев и прочих непостижимых существ.

Можно ли поверить в магические свойства прибитой над дверью подковы? Разумеется, сама вера в примету способна так изменить поведение человека, что ее смысл начнет оправдываться. Очень вероятно, что тот, кто ждет неприятностей в понедельник тринадцатого, оступится именно в этот день. Но можно ли допустить существование логической связи между подковой и нашей судьбой? Можно ли найти связь между радиусами орбит планет Солнечной системы и отношениями звуковых частот музыкальных аккордов? Такая связь если бы и обнаружилась, то была бы чисто случайной, поскольку явления несопоставимы — они определяются разными законами природы.



Романтики, к примеру, любят утверждать, будто движение электронов в атоме аналогично движению планет вокруг Солнца. Между тем поведение электронов в атоме управляется законами квантовой механики, совершенно непохожими на законы классической механики, определяющие движение планет. Электрические силы взаимодействия электронов с ядром в  $10^{39}$  раз сильнее, чем силы тяготения. Наконец, электроны отталкиваются друг от друга, а планеты притягиваются. Никаких оснований для аналогии не существует. Внешнее сходство явлений исчерпывается тем, что сила взаимодействия между ионизированным атомом и электроном на больших расстояниях падает по тому же закону, что и сила тяготения. Заблуждение поддерживается еще и тем, что во многих описаниях таблицы Менделеева для простоты рисуют электронные орбиты вместо того, чтобы в соответствии с законами квантовой механики изображать электронные облака различной формы. Все совпадения такого рода при проверке оказываются сознательной или бессознательной подтасовкой фактов. Но легенды, связывающие несопоставимое, все возникают, меняясь в зависимости от моды, случайного поветрия.

Как рождается вера в сверхъестественное? К сожалению, нужно сказать, что основная, самая главная причина этого — невежество. Вдобавок все случаи удачных предсказаний, таинственных совпадений, вещих снов, сохраняются в памяти и приукрашиваются, тогда как неудачные забываются. Кому интересно услышать, что слова гадалки не сбылись? А если она хоть что-то угадала, догадка обрастает живописнейшими подробностями. Создается ощущение, что странных явлений гораздо больше, чем должно быть в силу случайного совпадения. Поверить в чудеса помогают и необыкновенные резервные возможности человека, проявляющиеся иногда в виде удивительных способностей.

Человеческая природа мало меняется со временем — еще в XV веке Монтень объяснял, как рождаются легенды:

«Те, кто первыми прослышали о некоем удивительном явлении и начинают повсюду трезвонить о нем, отлично чувствуют, где в их утверждениях слабое место, и всячески стараются заделать прореху, приводя ложные свидетельства. Мы, естественно, считаем долгом совести вернуть то, что нам ссудили, и не без добавлений со своей стороны. Сначала чье-то личное заблуждение становится общим, а затем уже общее заблуждение становится личным».

Подобным же образом возникают и антинаучные утверждения, питающие лженауку, о которой теперь пойдет речь.

Надеюсь, что критические рассуждения, которые вы только что прочли, не заденут чувств тех, кому дорога поэтическая сторона легенд и поверий, не ослабят естественного интереса к таинственному и непознанному.

## О ПСЕВДОНАУКЕ

Когда заблуждения оформляются в некую систему и эта система преподносится под видом научной теории, ее называют лженаукой. Это явление обычно имеет не научную, а социальную природу. Лженаучные теории возникают и отстаиваются по различным — политическим, идеологичес-

ким, конъюнктурным — соображениям, все разновидности которых одинаково неблагоприятны.

Сторонники лженаучных теорий порочат подлинные научные достижения, пытаясь именно на них повесить ярлык лженауки, как было с генетикой, кибернетикой, молекулярной биологией, квантовой механикой, теорией относительности.

Попробуем определить понятие лженауки.

Часто словом «лженаука» обозначают либо заблуждения, либо поиски неожиданного. Но заблуждения неизбежны в науке. Их, так же, как и неудавшиеся поиски неожиданного, нельзя считать лженаукой, если они возникают и устраняются научными методами в процессе познания.

Как же установить, где наука и где лженаука, особенно если речь идет об истинах, еще не установленных окончательно?

Может быть, лженаука это то, что противоречит научным представлениям сегодняшнего дня? Ни в коем случае! Именно работы, убедительно доказывающие противоречивость принятых моделей, могут привести к научной революции. Даже незаконченные работы подобного рода вызывают дискуссии и побуждают к дальнейшим исследованиям.

Так, закон зеркальной симметрии явлений природы подтверждался многими опытами и прочно вошел в представления физиков. Но опыты по проверке этого, казалось бы, точного закона, разумеется, никто не считал лженаучными, и результатом проверки стало важнейшее открытие — оказалось, что закон зеркальной симметрии нарушается при радиоактивном распаде.

Нужно ли считать лженаучными работы, основанные на предположениях, которые, как выясняется потом, в результате исследований, оказываются неверными? Разумеется, не нужно. Подтверждение предположений не единственный критерий научной ценности работы. И отрицательный результат дает важную информацию — исключается одна из возможностей.

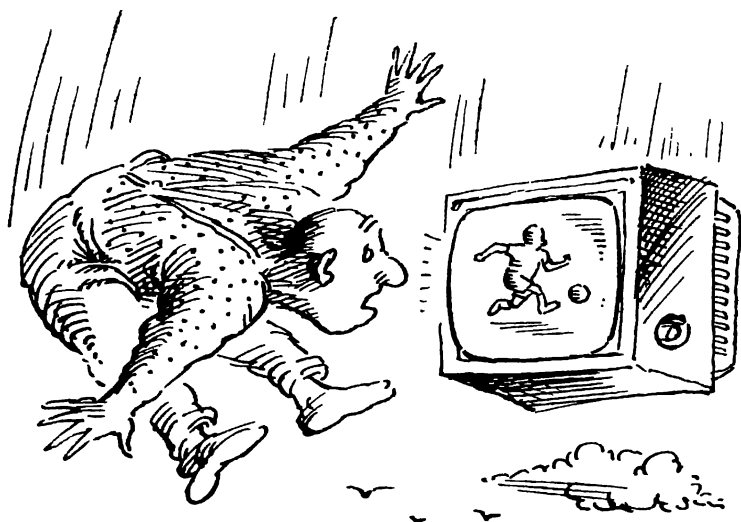
Лженаука — это попытка доказать утверждение, пользуясь ненаучными методами, прежде всего, выводя заключение из неповторяемого, неоднозначного эксперимента или делая предположения, противоречащие хорошо установленным фактам.

Непонимание того, какой мучительный творческий процесс отделяет научный результат от первоначальной идеи, преувеличение ценности незаконченных работ, стремление заменить недоделанное догадками — все это в конечном счете приводит к лженауке.

Незаконченные научные работы, не устанавливающие истину, а только намекающие на ее существование, требуют дальнейшей проверки научными методами. Если такой проверки не сделано и работа без основания объявлена законченной, она может перейти в разряд лженауки.

Один из распространенных источников заблуждений — навязывание природе умозрительных идей.

Аристотель считал очевидным и не требующим проверки утверждение, что тяжелые тела падают быстрее, чем легкие. Лишь через пятнадцать столетий после Аристотеля Галилей проанализировал свои опыты по движению тел по наклонной плоскости и пришел к заключению, что все тела на поверхности Земли должны падать с одинаковым ускорением. Его опыты были актом не только научного, но и гражданского мужества —



одобренная церковью официальная наука строго охраняла авторитет Аристотеля.

Только в редких случаях наука соприкасается с псевдонаукой. Обычно дело обстоит грубее и проще — смутная идея объявляется достоверной истиной; то, что ей противоречит, замалчивается, а то, что подтверждает, громко рекламируется.

У лженауки есть устойчивые, почти непеременные черты. Она всегда агрессивна и нетерпима к опровергающим доводам, громогласна и претенциозна. Псевдочученый решает исключительно «глобальные» проблемы, стараясь не оставить камня на камне от всей современной ему науки. Как правило, работ меньшего значения у него не бывает. Он никогда ни в чем не сомневается, его задача — убедить тупых специалистов в своей очевидной правоте. Почти всегда он обещает громадный немедленный практический выход там, где его быть не может...

Время от времени у лженауки появляются идеологи, пытающиеся опровергнуть научный метод познания. В их статьях можно найти все виды логических ошибок, известных еще древним грекам. Здесь и смешение существенного со случайным; и утверждения о справедливости по отношению к части того, что справедливо только по отношению к целому, и утверждения о целом того, что справедливо только по отношению к части; и подтверждение тезисов доводами, из которых не вытекает истинность тезиса; и сами по себе неправильные умозаключения, и поспешные обобщения, и смешение нескольких вопросов в одном, и ошибочные допущения, и, наконец, простое неумение грамотно выражаться...

Критикуя научную работу, можно вырвать из нее фразу, которая лишается смысла или приобретает прямо противоположный смысл, становясь удобным объектом для критики. Можно вместо сомнительного утверждения подставить близкое ему, но несомненное, и создать впечатление, будто речь идет о бесспорном. Доказывая равноправие науки и лженауки, можно заметить, что в белом квадрате есть черные точки,



а в черном — белые, поэтому нужно отказаться от противопоставления черного белому и признать, что это одно и то же.

Доказывая, что повторяемость эксперимента необязательна, можно подменить требование повторяемости результатов требованием повторяемости объектов исследования. Вращение орбиты Меркурия исследовалось только на Меркурии, следовательно, опыт неповторяем, заявляет идеолог, не желая и слушать о том, что нужен не десяток Меркуриев, а десятки научных наблюдений одного-единственного неповторимого Меркурия. Живые организмы настолько разнообразны, утверждают критики научного метода, что в биологии нельзя требовать повторяемого эксперимента. Но именно сходство разнообразных биологических объектов позволяет ставить воспроизводимые эксперименты и делает биологию наукой, а не совокупностью фактов...

Попытки лжеученых перетолковать науку, дать собственные конкретные методические указания о том, как следует заниматься наукой, внушить недоверие к специалистам, рисуя их тупыми приверженцами научных представлений сегодняшнего дня — все это таит в себе серьезную опасность для читателей псевдонаучных статей, особенно для молодых людей, отношение которых к науке только формируется.

Но зачем же, спросите вы, публиковать такие статьи? Не лучше ли запретить их и разом со всем этим покончить?

### Надо ли бороться с лженаукой?

Можно и нужно протестовать против отрицательной оценки той или иной научной работы, но стремиться изменить общественное мнение следует принятыми в науке способами. Лженаука же пытается доказать свою правоту, не гнушаясь никакими приемами.

Она может причинить серьезный вред обществу, если ей удастся повлиять на экономику, культуру, подействовать на воображение молодых людей, начинающих свой путь к науке. Но этого не произойдет, если научную ценность работ определяет не приказ администратора, а общест-

венное мнение больших коллективов — в таком случае вероятность ошибки минимальна.

Поэтому, мне кажется, не следует бороться с лженаукой, запрещая ее или используя ее же приемы. С лженаучными рассуждениями можно бороться с помощью популяризации настоящей науки.

Иногда очередной «модный» слух распространяется, как вирус гриппа, и публикуемые на эту тему статьи должны непременно сопровождаться статьей серьезного специалиста. Лженаука питается не наукой, а ее недоброкачественными популярными изложениями. Она не знает подлинной науки, и это упрек в адрес специалистов, которые так редко пишут о методах своей науки и так часто огорчаются, читая недобросовестные статьи. Этот недостаток надо терпеливо исправлять, относясь к лженауке внимательно и снисходительно, как к больному ребенку.

Научно-популярная литература должна обеспечивать преемственность научного знания, как части общей культуры. И ответственность за это лежит на ученых.

### Воздайте гениям по заслугам!

Любовь к науке немыслима без глубокого уважения к духовным подвигам предшественников.

Как же объяснить распространенное желание обнаружить недостатки гения — выискивать ошибки, приписывать заимствования, умалять значение работ?

Разумеется, иногда гениальные творения и их авторы критикуются по политическим или националистическим соображениям — вспомним критику теории относительности фашистами и их последователями. Речь идет не об этом — этому нет оправдания, но есть хотя бы объяснение.

Гораздо труднее объяснить психологическое явление — стремление принизить гения, распространенное не только в широкой публике, но и в кругу людей, считающих себя специалистами.

Сколько мучительных переживаний доставалось при жизни Галилею, Пушкину, Вагнеру, Больцману, Лобачевскому, сколько душевных сил пришлось потратить Эйнштейну на защиту от нелепых придилок и обвинений! Казалось бы, современники должны радоваться, что рядом с ними кто-то пишет роман, делает открытие, создает симфонию, но именно это вызывает раздражение людей, зараженных подобной болезнью. Глядя однажды со стороны на оживленный разговор двух писателей, известных своими критическими взглядами на мировую литературу, Юрий Олеша заметил: «Наверняка выясняют, кто глупее, Байрон или Гете. У них ведь свой счет, с другой стороны»...

«Знатоки» не оставляют в покое великих творцов и после их смерти. Кому только не приписывается авторство шекспировских сонетов и трагедий — от Фрэнсиса Бэкона до королевы Елизаветы I; «музыковеды» заявляют, что «Реквием» написал не Моцарт, а его ученик; бесконечным нападкам подвергались и, к сожалению, до сих пор подвергаются работы Эйнштейна по частной и общей теории относительности (теории тяготения)...

Почти все историки науки видят в теории тяготения редчайший при-

мер великого открытия, сделанного одним человеком. Когда все физические идеи были до конца сформулированы Эйнштейном, великий немецкий математик Давид Гильберт уточнил его уравнения. Ту же поправку одновременно сделал и сам Эйнштейн. Гильберт ясно понимал, как скромна его роль в создании теории относительности, но находится «историк науки», который утверждает обратное. Занимаясь историей науки, «знаток», принижающий гениев, говорит о великих открытиях как о чем-то обычном, обыденном, пытаясь внушить впечатление, что открытия возникают не в результате мучительных усилий и озарений, а «носятся в воздухе», становясь известными сразу всем. Сохраняя факты, он, в сущности, искажает историю, стараясь принизить величие и поэзию научного подвига.

Но достаточно просто напомнить, что Эйнштейн в одном и том же году сделал три гениальные работы: теорию броуновского движения, окончательно утвердившую атомистическую гипотезу, устранив все сомнения на этот счет; гипотезу световых квантов, которая была по-настоящему признана только через двадцать лет; и, наконец, частную теорию относительности. Причем двадцатипятилетний инженер Бернского патентного бюро создал все это в свободное от работы время, катая детскую коляску...

Конечно, можно возразить, что досужие домыслы проживут недолго, Моцарт останется Моцартом, Эйнштейн — Эйнштейном, но неуважение к высоким подвигам человеческого духа может заразить молодых людей, начинающих свой творческий путь, губительным ядом цинизма.

Не нужно слепо преклоняться перед авторитетом, но необходимо чтить память о людях, пришедших к великим свершениям, чтобы стали возможны свершения будущие.

## ПРИБЛИЖЕНИЕ К ИСТИНЕ

Получив некоторое представление о научном методе, обсудим его немного глубже.

Как наука в своем развитии использует достижения прошлого? Как догадка превращается в прочно установленную научную истину? Как выбирают направление научных поисков? Что такое научный эксперимент? Как из разрозненных фактов создаются теории?

### Факты и представления

Задачи науки лежат на границе между известным и неожиданным. Отсюда одна из главных ее черт — открытость новому, способность пересмотреть привычные представления и, если надо, отказаться от них.

Науку образуют факты, соотношения между ними и толкование этих соотношений. Хорошо установленные факты неизменны. Соотношения только уточняются с развитием науки. Но толкования фактов и соотношений, то есть, представления, основанные на сознательно упрощенной картине явления, нельзя абсолютизировать. Представления — или модели — развиваются и видоизменяются с каждым новым открытием.

Путь к истине лежит между Сциллой и Харибдой — верхоглядством и догматизмом. Верхогляды строят свои концепции, не считаясь с фактами и соотношениями, основываясь на непроверенных догадках. Догматики абсолютизируют представления сегодняшнего дня. Что опаснее — трудно сказать.

Часто ученые, неспособные отказаться от установившихся представлений, бывают широко образованными в науке, даже делают хорошие работы, хотя и не выходящие за рамки общепринятого. Покуда они ограничиваются такой деятельностью, то приносят пользу. Вред начинается, когда они пытаются делать прогнозы и влияют на выбор направления поисков.

К счастью, у науки есть свойство самоочищения — обратная связь, обеспечивающая устойчивость. После нескольких неудач и догматики и верхогляды перестают влиять на развитие науки.

XX век явил удивительные примеры отказа от привычных представлений в физике: теория относительности возникла в результате пересмотра интуитивного понятия одновременности, существовавшего сотни лет. Классическая механика исходит из предположения, что явления можно описывать, задавая координаты и скорости частиц. Квантовая механика потребовала отказа от этого предположения.

Но не свидетельствуют ли такие примеры о несостоятельности всей предшествующей науки?

### Стабильность науки

Существует заблуждение, будто ценность научного открытия измеряется тем, насколько оно ниспровергает науку.

Значительность научной революции в ее созидательных, а не разрушительных возможностях, в том, какой толчок она дает развитию науки, какие новые области открывает.

Очень часто при этом основные представления предшествующей на-





уки остаются неизменными. Бескровный переворот произошел в астрофизике с появлением радиоастрономии; в теоретической физике — с созданием «графиков Фейнмана»: способа получать соотношения между физическими величинами с помощью рисунков, которые расшифровываются в конце работы.

Физика элементарных частиц категорически изменилась за последнее время без смены основных принципов физического описания.

Но даже коренная научная революция не отменяет, а лишь пересматривает прежние соотношения и устанавливает границы их применимости. В науке существует принцип соответствия — новая теория должна переходить в старую в тех условиях, при которых старая была установлена.

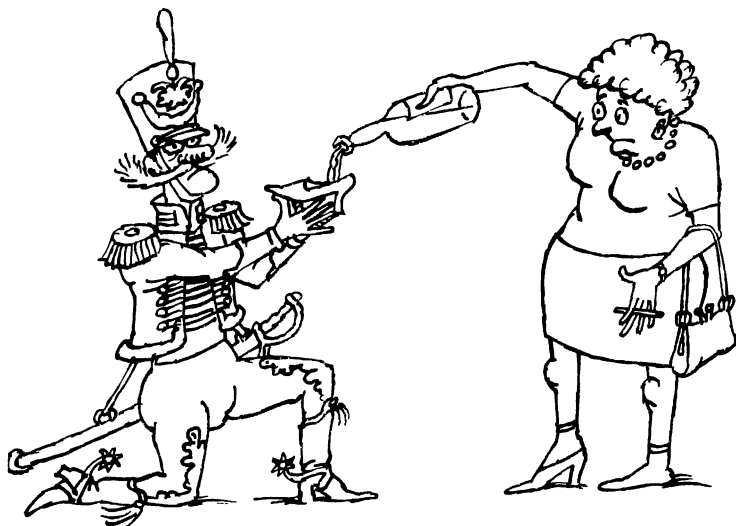
Стабильность науки — важнейшее ее свойство, иначе пришлось бы начинать все заново после каждого открытия.

Физики отказались от представления о тепле как о жидкости — теплороде, — перетекающей от нагретого тела к холодному, после того, как была установлена эквивалентность механической и тепловой энергии («механический эквивалент тепла»). Но законы теплопроводности, установленные во времена теплорода, не изменились.

В начале XX века атомистическая теория вещества стала доказанной и общепризнанной истиной, но все соотношения «макроскопических» наук — термодинамики, гидродинамики, теории упругости — остались без изменений. Эти науки продолжали предсказывать новые явления, выяснились только границы их применимости.

Тогда же, в начале века, произошел переворот в наших взглядах на пространство, время и тяготение, но наука «малых скоростей» сохранилась не только в смысле принципа соответствия. Она продолжала развиваться, и практически вся современная техника — компьютерная, телевизионная, космическая, — современная химия и биология обходятся ньютоновыми представлениями о пространстве и времени.

Романтика и поэзия науки не в разрушении старого, а в переплете-



нии и взаимопроникновении новых и прежних идей. В науке, как и в искусстве, новое не уничтожает красоты старого, а дополняет ее.

Хороший пример переплетения старых и новых идей дает история эфира, с которой вы подробно познакомитесь позже.

Наука оберегает свои завоевания. Но как устанавливаются научные истины? Единственный путь — проверка теоретических предсказаний опытом.

## Научный эксперимент

Однажды я прочел в популярном журнале следующее заявление: «Эксперимент есть эксперимент, даже если его поставили журналисты»... У экспериментатора это вызовет только смех или горькую улыбку. Самое тонкое и сложное — постановка недвусмысленного эксперимента, и здесь необходим строжайший профессионализм.

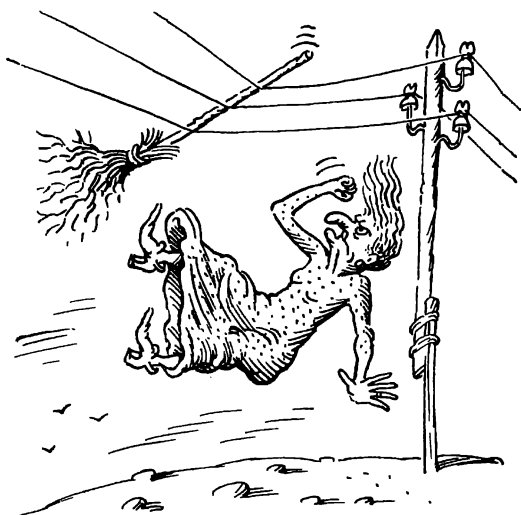
Научный эксперимент, устанавливающий истину, должен быть проведен специалистами, давать повторяющиеся результаты и подтверждаться независимыми опытами других исследователей.

Это в равной мере относится ко всем опытным наукам — физике, химии, астрономии, биологии, психологии... В астрономии вместо понятия «эксперимент» (словарь определяет его так: проба, опыт, проверка гипотезы) принято употреблять слово «наблюдение», подчеркивающее невозможность изменить ход событий по желанию экспериментатора, но суть остается — астрономический эксперимент состоит в том, что место, время и способ наблюдения выбираются так, чтобы получить ответ на поставленный вопрос. Впрочем, с помощью спутников стали возможными астрономические эксперименты и в обычном смысле слова.

Вот пример астрономического эксперимента-наблюдения. Согласно классической ньютоновой механике, планеты должны двигаться по эллипсам, причем оси эллипса неподвижны в пространстве. Предсказание теории Ньютона выполняется с колоссальной точностью: орбита Меркурия хотя и поворачивается, но крайне медленно — один оборот за двадцать три тысячи лет. Однако если учесть влияние притяжения других планет, то и это вращение почти целиком объясняется теорией Ньютона. Наблюдаемое вращение орбиты составляет примерно 1,6 градуса за столетие, а необъясненными остаются всего 43 секунды в сто лет — 0,7%.

Одновременно с блестящим подтверждением предсказаний классической механики возник и парадокс — надо было объяснить это малое, но принципиально важное отклонение от ньютоновой теории, согласно которой орбита строго неподвижна. Объяснение появилось только после создания теории тяготения Эйнштейна (общей теории относительности), которая позволила вычислить дополнительную угловую скорость вращения орбиты, выразив ее через постоянную тяготения, массу Солнца и скорость света. Это один из удивительных примеров красоты науки — теория связала воедино такие разнородные явления, как тяготение и распространение света.

Даже в математике в поисках доказательств делают правдоподобные предположения, которые предстоит проверить, то есть, ставят эксперимент.



В опытных науках процесс доказательства никогда не прекращается, поскольку постоянно расширяются границы, в которых проверяется правильность предположения.

Нужно сказать, что любой тонкий эксперимент, в какой бы области науки он ни проводился, плохо повторяем. В физике, например, когда изучаемый эффект сравним с фоном мешающих явлений, приходится делать многократные измерения и «набирать статистику», чтобы результат стал достаточно убедительным. Недостаточно строгая обработка статистических данных неизбежно приводит к ошибкам и возникновению научных суеверий.

Но даже если в физике, химии, астрономии не всегда удастся повторить условия эксперимента, как быть с биологией или психологией, где объекты отличаются друг от друга? Можно ли здесь требовать повторяемости и воспроизводимости результатов? Да, можно и нужно — без этого нет науки! Разумеется, там гораздо труднее поставить недвусмысленный эксперимент, но зато и не требуется той неслыханной точности, которая была необходима для обнаружения астрономических отклонений от классической механики. В биологии, психологии — по крайней мере, на их современной стадии развития — часто довольствуются не количественными, а качественными результатами.

Биологические объекты, конечно, не столь одинаковы, как молекулы, но общность биологических соотношений поразительна! Эта общность, сходство соотношений позволяет установить закономерности и представляет собой основу науки. Законы генетики были открыты Грегором Менделем на горохе, Томасом Морганом на мушке-дрозофиле, и оказались применимыми к множеству биологических объектов.

Даже разброс свойств может быть объектом научного, то есть, повторяемого эксперимента. Можно изучать статистические характеристики объектов, измеряя вероятность появления того или иного признака.

Подобно тому, как суд обязан устанавливать виновность, основываясь

не на показаниях свидетелей, не на признании обвиняемого, а на бесспорных доказательствах, наука должна выводить свои заключения из результатов научных экспериментов.

Но даже хороший эксперимент устанавливает только факты. Науку же, как мы уже говорили, составляют не только факты, но и соотношения между ними, а главное, систематизация этих соотношений с помощью сознательно упрощенной модели явления. Лишь после того, как возникнет стройная система представлений — теория, возможно предсказание новых явлений. Для создания теории необходим не меньший профессионализм, чем для постановки научного эксперимента.

### Как создаются теории

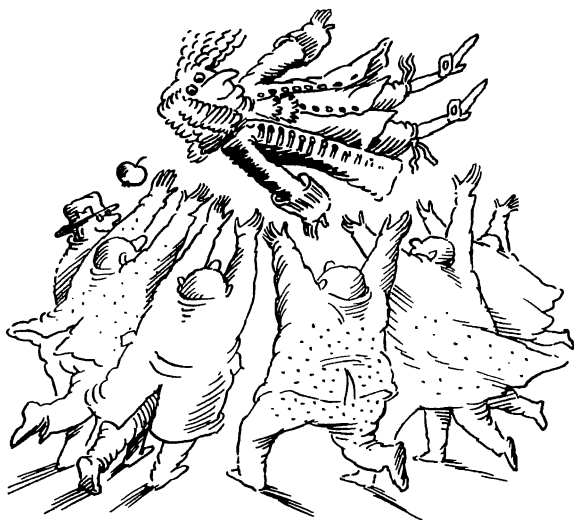
Опытные науки развиваются с помощью правдоподобных предположений, которые предстоит проверить.

Великий французский математик Анри Пуанкаре сравнивал собрание разрозненных фактов с грудой камней, из которых предстоит построить здание. Чтобы получить возможность предсказывать, из фактов нужно вывести упрощенную модель или теорию явления. Затем эту модель надо подвергнуть жестокой проверке, испытать на прочность. Когда модель, наконец, не выдержит проверки, нужно попытаться построить новую теорию, учитывая и те факты, которые были раньше, и те, которые появились в ходе проверки. Так слабые звенья постепенно заменяются более надежными, и теория приближается к истине.

Когда оказывается, что убедительно построенная теория противоречит вновь появившимся данным, происходит скачок в развитии науки.

Как рождаются и развиваются теории? Вот история одной из них — закона всемирного тяготения.

Идею о том, что сила, которая заставляет планеты двигаться вокруг Солнца, а яблоко падать с дерева, имеет одну и ту же природу, выска-



зывали многие ученые и философы XVI—XVII веков. Легенда об упавшем яблоке, которое будто бы навело Ньютона на мысль об универсальности тяготения, наивна — в то время ее повторяли на все лады. За много лет до Ньютона Иоганн Кеплер пытался доказать, что планеты движутся не по прямой, а по эллипсам под действием силы притяжения Солнца.

Почему же закон всемирного тяготения называют «законом Ньютона»? Справедливо ли это?

Любая общая идея приобретает ценность, только если она подтверждена научными доводами, и честь открытия по праву принадлежит тем, кто способствовал превращению этой идеи в доказанную истину. Как часто об этом забывают изобретатели общих идей!

В туманных поэтических образах древних сказаний можно усмотреть идею расширяющейся Вселенной, возникшую в науке в XX веке и блестяще подтвердившуюся с открытием реликтового излучения. Имел ли этот поэтический образ какую-нибудь научную ценность, повлиял ли на создание теории тяготения Эйнштейна? Разумеется, нет. В море смутных и случайных утверждений всегда можно выловить нечто, казалось бы, предвосхищающее развитие науки.

Ньютон был первым, кто превратил общую идею всемирного тяготения в физическую теорию, подтвержденную опытом.

В чем состояла задача? Надо было объяснить, почему планеты движутся по эллипсам с фокусом в месте нахождения Солнца, и почему кубы радиусов орбит пропорциональны квадратам периодов обращения. Эти соотношения — «законы Кеплера» — были найдены из анализа астрономических наблюдений и оставались без объяснения много лет. Ньютон доказал, что эти законы следуют из предположения, что между двумя массами действует сила, пропорциональная произведению масс и обратно пропорциональная квадрату расстояния между телами.

Но и после введения силы тяготения пришлось преодолеть колоссальные по тому времени математические трудности, чтобы получить количественное объяснение движения планет.

Помимо эллиптического движения планет, теория объяснила и слабые отклонения от этого закона, вызванные влиянием соседних небесных тел. Ньютон вычислил возмущения движения Луны под влиянием Солнца и построил теорию приливов, объяснив их лунным притяжением.

Ньютону пришлось предположить, что законы механики, найденные Галилеем для тел малой массы, движущихся с малыми скоростями, применимы и для небесных тел. Эта гипотеза с огромной точностью подтвердилась сравнением многочисленных предсказаний теории тяготения с опытом.

В 1687 году вышла книга Ньютона «Математические начала натуральной философии». Это событие можно считать началом теоретической физики.

Ньютон, как и многие другие ученые того времени, безуспешно пытался объяснить тяготение движением эфира. Но эти попытки были

обречены на неудачу — понадобилось более двухсот лет развития физики и математики, чтобы стало возможным создание теории Эйнштейна, связавшей тяготение с геометрическими свойствами пространства. Согласно этой теории, законы обычной механики нарушаются вблизи массивных тел и при больших скоростях. Одно из предсказаний новой теории тяготения мы уже обсуждали — поправка к угловой скорости вращения орбиты Меркурия. Были подтверждены на опыте и многие другие следствия теории.

### **Выбор направления**

Законы в опытных науках, в отличие от математики, справедливы с той или иной вероятностью, с той или иной точностью. Если соотношение хорошо проверено на опыте, вероятность заметного отклонения от него ничтожно мала, и мы можем считать закон достоверным, то есть, справедливым с вероятностью, близкой к единице.

Когда мы говорим, что хорошо установленная истина отличима от заблуждения, можно было бы добавить: «с подавляющей вероятностью». Но тогда приходилось бы оговариваться в каждом случае: завтра наступит день, если Солнце не погаснет, Земля не столкнется с небесным телом, не наступит конец света, Страшный суд, всемирный потоп... Мы не считаемся с вероятностью, что поезд подпрыгнет и сойдет с рельсов в результате согласованных ударов молекул, и если с опаской садимся в вагон, то по другим причинам.

Здравый смысл, которым мы пользуемся в практической жизни, руководствуется разумной оценкой вероятности того или иного события. Наш «психологический компьютер» — интуиция — способен мгновенно учитывать все возможные мотивы, условия и последствия действий. В одном случае он спасает нам жизнь, в другом — уберегает от невыгодных поступков.

Здравый смысл и интуиция определяют выбор направления поисков. Прежде чем рыться в навозной куче, надо оценить, сколько на это уйдет времени и какова вероятность найти жемчужину. Именно поэтому серьезные ученые редко занимаются поисками крайне неожиданных явлений. Неразумно прилагать большие усилия, если, согласно интуитивной оценке, вероятность удачи ничтожно мала. Зато после первого же научного результата в область неожиданного устремились бы громадные силы. Так и должна развиваться наука. Мы сознательно проходим мимо мест, где, может быть, и можно найти клад, направляясь туда, где, по нашей оценке, вероятность найти его наибольшая. Иначе не хватит сил на продвижение вперед.

Интуитивная оценка вероятности успеха всегда субъективна, и для того, чтобы сделать ее, нужен серьезный научный опыт. Пока не удалось придумать ничего лучшего для выбора разумного направления поисков, чем научные конференции, семинары, обсуждения со специалистами.

## Красота как критерий истины

Что такое красота в науке?

Иногда это внешние признаки. Если в формуле стоят большие или неправдоподобно малые числовые множители, выражение выглядит некрасиво. Увидев формулу с несуразными множителями, сразу можно заподозрить ошибку. И очень часто «некрасивые» выражения действительно оказываются ошибочными. Некрасиво, если в формуле много не определяемых теоретически коэффициентов, которые должны быть найдены из сравнения с экспериментом.

Ощущение «красоты» трудно передать, не приводя сложных примеров. Иногда оно сводится к тому, что выражение имеет простой вид и радует глаз.

Одним из признаков правильных выкладок служит сокращение сложных промежуточных выражений, что упрощает окончательный результат и придает ему красивый вид. Как сказал один физик: «Правильные выражения имеют тенденцию сокращаться».

Но гораздо важнее не внешние, а глубокие признаки красоты результатов. Красиво, если выражение связывает в простой форме разнородные явления, если устанавливаются неожиданные связи... Одна из красивейших формул теоретической физики — уравнение теории тяготения Эйнштейна — связывает радиус кривизны пространства с плотностью материи. В уравнениях Максвелла в компактной форме содержится информация обо всех электрических и магнитных явлениях...

Одно из важнейших проявлений красоты в физике — симметрия законов природы. Возьмем простой пример: как показывает опыт, законы физики не зависят от момента отсчета времени — время течет равномерно. Существующие сегодня атомы устроены точно так же, как атомы на звездах — спектральные линии совпадают, хотя свет далеких звезд был испущен миллионы лет назад.

Из однородности времени строго следует важнейший вывод: с той же точностью, с какой время однородно, должен выполняться закон сохранения энергии! Когда мы сталкиваемся с нарушением закона сохранения энергии в каком-нибудь теоретическом рассуждении, то считаем его неверным, потому что закон сохранения следует из такого общего и хорошо проверенного на опыте свойства природы, как однородность хода времени. Это дало право Французской академии принять решение не рассматривать никаких проектов «вечного двигателя». В главе «Секреты ремесла» мы увидим, как с помощью симметрии можно сразу обнаружить ошибку в рассуждениях.

О симметрии и законах сохранения речь пойдет в отдельной главе.

Вот краткое заключение наших рассуждений о научном методе исследования. Схема научного познания выглядит так: наблюдение, эксперимент, правдоподобные предположения, гипотезы, теория, эксперимент, уточнение, проверка границ применимости теории, возникновение парадоксов, теория, интуиция, озарение, скачок, новые гипотезы, новая теория и снова эксперимент...

Научный метод, в основе которого лежит объективность, воспроизводимость, открытость новому — великое завоевание человечества. Этот

---

метод развивался, совершенствовался и был отобран как самый рациональный, обеспечивающий минимальные потери времени и идей. Уже более трех веков наука им руководствуется, и при этом ничего не было загублено.

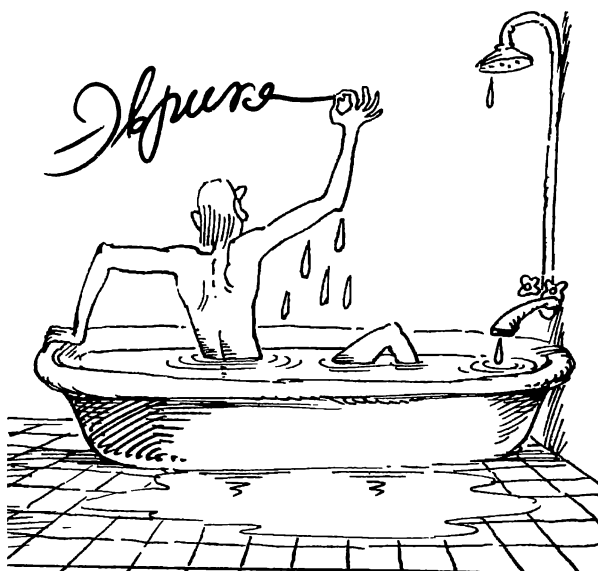
Неизбежный элемент любого развития — заблуждения, но научный метод придает науке устойчивость, и заблуждения быстро устраняются силами самой науки.

Требование красоты, не будучи абсолютным и однозначным, помогает проверять правильность результатов, находить новые законы, поскольку отражает красоту и гармонию Вселенной.



# ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАУЧНОГО ТВОРЧЕСТВА

---



**И**нтерес к психологической стороне научного творчества возник вместе с самой наукой. В нашу задачу не входит обзор литературы — мысленно пропустим абзац, который мог бы начинаться словами: «Уже у Аристотеля в «Органоне»...», и перейдем к более позднему времени.

Нисколько не потеряли своей ценности глубокие замечания и наблюдения в книгах и статьях великого французского математика Анри Пуанкаре (1854—1912). Выдающийся немецкий химик Вильгельм Оствальд (1863—1912) в своей книге «Великие люди» попытался классифицировать психологические типы ученых. Анализируя характер и стиль работы различных ученых, он предложил деление на «классиков» и «романтиков». В увлекательнейшей книге «Математика и правдоподобные рассуждения» известного математика и выдающегося педагога Дьёрдя Пойа дается анализ приемов и методов, облегчающих процесс математического творчества.

Во второй половине XX века интерес к этим вопросам внезапно вырос — появилось множество статей о психологии и методологии науки. Возникла даже новая область знания — науковедение. Чем это объяснить? Ответ можно найти в упомянутых статьях: «сейчас нация, не спо-

собная ценить обученный интеллект, обречена», «в качестве показателя национального богатства выступают не запасы сырья или цифры производства, а количество способных к научному творчеству людей».

Характерная особенность большинства подобных работ заключается в том, что их обычно пишут не сами ученые, а люди, изучающие структуру науки.

Глава, которую вы перед собой видите, — исключение из правила. Она написана на основе размышлений и споров людей, занимающихся самой наукой. Это не науковедческое исследование, а попытка поделиться опытом, сформулировать соображения, накопленные в процессе работы.

## ПОБУЖДЕНИЯ К НАУЧНОМУ ТВОРЧЕСТВУ

Что толкает молодого человека к занятию наукой? Какими чертами характера надо для этого обладать? Как воспитать в себе нужные качества?

Не будем касаться такого стимула, как понимание полезности своей работы — это в равной мере относится ко всем областям человеческой деятельности. Обсудим лишь психологические побуждения, непосредственно связанные с научным творчеством. Они складываются из нескольких элементов.

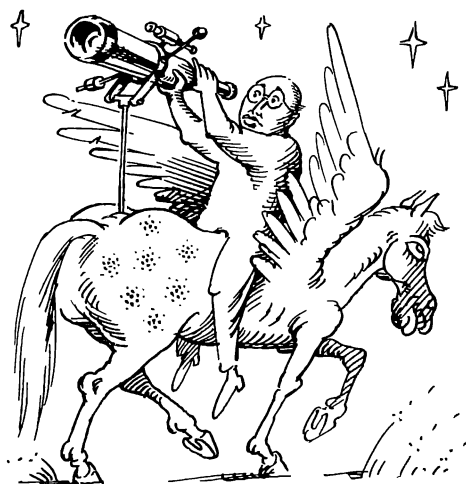
Наименее близко духу науки желание самоутверждения, стремление доказать себе или другим, что ты можешь довести задачу до конца. Разумеется, мы оставляем в стороне жажду сделать карьеру или извлечь выгоду. Другой мотив — стремление к самовыражению, к наиболее полному проявлению своей индивидуальности. Но самое благородное и отвечающее духу науки побуждение — любопытство, желание узнать, как устроена природа. В этом случае чужой успех радует не меньше, чем собственный. Именно такое отношение к науке было у нашего замечательного физика-теоретика И. Я. Померанчука — он даже перед смертью, приходя в сознание, расспрашивал о последних работах по теории элементарных частиц и радовался каждой новой идее.

Такой чистый случай встречается крайне редко, и это необязательное условие. Обычно смешиваются все три мотива.

Есть люди, для которых жажда самоутверждения — главный стимул творческой активности. Но если эту жажду не обуздывает безупречная добросовестность, она почти неизбежно приводит к погоне за эффектными результатами и к невольной подтасовке фактов. Сколько талантливых людей погибло для науки из-за этого недостатка!

Иногда стремление к самовыражению проявляется настолько сильно, что занятия одной только наукой оказывается недостаточно. Макс Планк был хорошим пианистом, Эйнштейн играл на скрипке, Ричард Фейнман играл на барабане бонго и прекрасно рисовал...

Среди людей, далеких от науки, широко распространено мнение, что ученый руководствуется в своей работе стремлением сделать открытие. Между тем задача научного работника — глубокое и всестороннее исследование интересующей его области науки. Открытие возникает только как побочный продукт исследования. Это не означает, что ученые так идеальны, что не хотят сделать открытие — желание, конечно, присутст-



вует, но на втором плане; оно не должно даже и в малой степени влиять на добросовестность исследования.

Под словом «открытие» я здесь подразумеваю существенный скачок в понимании природы. Небольшие, обычно невидимые миру открытия делаются непрерывно, и именно они составляют радость повседневной работы. Любопытство, умение радоваться каждому малому шагу, небольшому открытию — необходимые качества для человека, выбравшего научную профессию.

### Способность удивляться и ощущение красоты

Любопытство исследователя самым непосредственным образом связано со способностью удивляться. Это качество необходимо для творческой активности в любой области, без него нет ни поэта, ни художника, ни ученого. Но в отличие от искусства, где главное — живая непосредственная реакция на увиденное или услышанное, в науке нужно уметь удивляться тому, что возникает в результате размышлений, осмысления накопленных знаний. Ученый удивляется, обнаруживая противоречие каких-либо фактов с привычными представлениями, то есть, сталкиваясь с научным парадоксом. Словарь Даля определяет слово «парадокс» так: «мнение странное, на первый взгляд дикое, озадачивающее, противное общему». Это определение годится и для научного парадокса, надо только добавить, что это мнение должно быть убедительно обосновано. Парадоксы не раз приводили к научным революциям.

Когда первые мореплаватели, прокладывая курс по звездам, заметили, что картина неба меняется; когда люди задумались, почему, подъезжая к городу, они сначала видят верхушки башен, возник научный парадокс, а из него открытие, что Земля круглая.

Со времен Галилея известно, что все тела падают с одинаковой скоростью, если отвлечься от сопротивления воздуха. Это означает, что вес тела, то есть, сила, с которой тело притягивается к земле, строго пропор-

ционален его массе. Но массе пропорциональны и силы инерции. Из-за этой одинаковой зависимости сил от массы человек в свободно падающей камере находится в состоянии невесомости: в его системе координат сила тяжести строго компенсируется силами инерции. Мы так свыклись с этим, что не замечаем никакой странности.

Почему вес тел, независимо от их состава, независимо от состояния, пропорционален массе — мере инерции? Не следует ли из этого парадокса, что между инерцией и гравитацией (силами тяготения) есть глубокая внутренняя связь? С этой мысли началось построение одной из самых удивительных физических теорий — теории тяготения Эйнштейна.

Согласно теории тяготения, вблизи тяжелых масс геометрия пространства изменяется — она отличается от нашей привычной евклидовой. Из-за этого изменения геометрии свет распространяется не по прямой: искривление лучей света, проходящих мимо Солнца, было обнаружено при фотографировании далеких звезд.

Почему звезды дают так мало света? Предположим, что звезды заполняют Вселенную более или менее равномерно. Тогда число звезд, лежащих внутри сферы радиуса  $R$ , окружающей Землю, растет пропорционально  $R^3$ . Интенсивность же света от каждой отдельной звезды, как известно, падает пропорционально  $1/R^2$ . Следовательно, полная интенсивность света от звезд, лежащих внутри сферы, пропорциональна  $R$ , и в бесконечной Вселенной яркость неба лимитировалась бы только ничтожным поглощением света в межзвездном пространстве. Небо сияло бы «ярче тысячи солнц». Этот парадокс был известен очень давно, но оставался неразгаданным. Его объяснила космология Эйнштейна — неслыханное по смелости применение теории тяготения к миру в целом.

В первоначальном варианте теории Эйнштейн пытался найти решение своих уравнений, описывающее конечную Вселенную, замкнутую на себя, как поверхность шара. Тогда число звезд в ней конечно, и парадокс ночного неба сразу же объясняется. Однако, как мы уже говорили, согласно Фридману, уравнения космологии Эйнштейна не допускают решения, не зависящего от времени. Вселенная некогда состояла из сверхплотной материи и с тех пор расширяется. Астрономы нашли скорость, с которой звездные скопления удаляются друг от друга. По этой скорости можно подсчитать, что четырнадцать миллиардов лет назад Вселенная была сверхплотной. В расширяющейся Вселенной, независимо от того, конечна она или бесконечна, к нам приходит свет только тех звезд, которые находятся на достаточно близком расстоянии — менее четырнадцати миллиардов световых лет, когда звезд еще не было.

И в конечной, и в бесконечной Вселенной геометрия «кривая», отличающаяся от плоской евклидовой. Вопрос о том, в какой именно Вселенной мы живем, нельзя решить умозрительно. Это вопрос опыта.

Скачок в понимании Вселенной, связанный с переходом от плоского пространства евклидовой геометрии к пространству, имеющему кривизну, подобен скачку, который сделало человечество, обнаружив, что Земля не плоская, а имеет форму шара.

## Научные парадоксы

Очень глубокий парадокс возник в начале XX века, когда законы статистической физики применили к необычному объекту — стоячим электромагнитным волнам, которые могут возникать в ящике с отражающими стенками. Согласно этим законам, каждое независимое колебание в тепловом равновесии должно из-за многократных излучений и поглощений стенками приобрести энергию  $kT$ , где  $T$  — абсолютная температура стенок, а  $k$  — число, которое называется «постоянной Больцмана». Но число возможных стоячих электромагнитных волн в ящике бесконечно. Действительно, стоячие волны могут образоваться в ящике, если от стенки до стенки укладывается целое число полуволн. Чем короче длина волны, тем больше возможных направлений, для которых это условие выполняется. Значит, чем короче длина волны, тем больше число возможных колебаний. Следовательно, электромагнитное поле должно забрать на себя всю тепловую энергию стенок, сколько бы тепла мы к ним ни подвели. Если бы на каждое колебание действительно приходилась энергия  $kT$ , то, сделав дырку в ящике, мы получили бы источник ни с чем не сравнимой яркости. Все тела немедленно охлаждались бы до абсолютного нуля температуры — энергия переходила бы в излучение. Этому парадоксу дали драматическое название «катастрофа Рэлея—Джинса», хотя на самом деле никакой катастрофы не происходит.

Пытаясь найти выход из противоречия, Макс Планк предположил, что частицы стенок, излучающие и поглощающие электромагнитные колебания, изменяют свою энергию порциями  $\Delta E = h\omega$ , где  $h$  — коэффициент пропорциональности, а  $\omega$  — частота колебаний. Если минимальная возможная энергия колебания  $h\omega$  много больше  $kT$ , колебание будет иметь малую интенсивность. Согласно законам статистической физики, интенсивность такого колебания падает с увеличением частоты по экспоненциальному закону, высокочастотные колебания вносят малый вклад в тепловую энергию, закон равнораспределения по энергии для высоких частот нарушается, и парадокс разрешается. Этот закон с колоссальной точностью выполняется на опыте, что позволяет определить величину  $h$ . Так в физику впервые вошла величина  $h$  — «постоянная Планка», характеризующая возможные дискретные значения излучателей электромагнитных колебаний; так возникло представление о скачкообразных процессах. (Здесь и в дальнейшем точнее:  $h = \text{постоянная Планка} / 2\pi$ ).

В работе 1905 года по теории фотоэффекта Эйнштейн применил идею скачкообразности не только к излучателям, как Планк, а к самим электромагнитным волнам. Энергия электромагнитной волны частоты  $\omega$  может изменяться только скачкообразно, порциями  $h\omega$ . Минимальная порция энергии электромагнитного колебания была названа «квантом». Если энергия колебания содержит  $n$  порций  $h\omega$ , то говорят, что в ящике имеется  $n$  квантов или  $n$  фотонов, частоты  $h\omega$ .

Почему атомы испускают свет только дискретных, точно определенных частот? Если бы электроны в атоме двигались по законам классической механики, то по законам классической электродинамики они испу-

скали бы свет всех частот. Может быть, электроны в атоме, как и электромагнитные колебания, могут иметь не любые энергии, а только строго определенные?

Размышления над этим и другими парадоксами привели Нильса Бора к созданию квантовой модели атома.

В 1934 году П. А. Черенков, изучая люминесценцию растворов солей урана под действием X-лучей радия, обнаружил странное свечение, совершенно непохожее на то, что обычно наблюдалось.

В постановке и обсуждении опыта участвовал научный руководитель Черенкова С. И. Вавилов, который сразу почувствовал значительность нового явления. Анализируя возможные причины свечения, Вавилов показал, что обычные механизмы не могут объяснить особенностей обнаруженного излучения. Например, следует отбросить так называемое тормозное излучение, которое получается при рассеянии атомами быстрых электронов, сопровождающих первичные  $\gamma$ -кванты (электроны вырываются квантами из атомов вещества).

Тормозное излучение идет под малыми углами к направлению движения энергичных электронов, тогда как обнаруженное Черенковым излучение наблюдается под большими углами. Явление стало казаться еще более странным, когда выяснилось, что излучение наблюдается только под строго фиксированным углом к направлению  $\gamma$ -квантов и, соответственно, к направлению вырываемых ими электронов.

Когда явление столь резко противоречит теории, возникает соблазн подвергнуть сомнению надежность эксперимента. Но, несмотря на все возражения, Черенков с упорством подлинного экспериментатора продолжал свои работы, совершенствуя методику измерений. Он показал, что аномальное излучение есть у громадного числа различных жидкостей. Так возник научный парадокс.

Вавилов близко подошел к объяснению явления, предположив, что вырванные  $\gamma$ -квантами электроны, двигаясь в среде, испытывают периодические возмущения и поэтому дают наблюдаемое свечение.

Однако теоретики не соглашались — электрон большой энергии движется в жидкости с постоянной скоростью, а заряженная частица излучает только ускоряясь или замедляясь. Электрон излучает электромагнитные волны в каждой точке своей траектории, но когда движется по прямой с постоянной скоростью, всегда найдутся такие участки траектории, на которых электрон излучает волны в противофазе, погашающие друг друга. Если электрон изменяет свое направление в результате столкновения или при движении в электромагнитном поле, то волны, испущенные до и после поглощения, перестают погашать друг друга, и возникает тормозное излучение.

Так объяснялось, почему электрон не излучает, двигаясь без изменения скорости. Но в этом рассуждении содержалось одно незаметное предположение: скорость электрона предполагалась меньшей, чем скорость света. В пустоте это условие всегда выполняется. Ведь согласно теории относительности, как бы ни была велика энергия частиц, скорость их меньше скорости света. Но в жидкости энергичный электрон движется со скоростью, близкой к скорости света, а электромагнитные волны рас-

пространяются со скоростью  $c'$ , заметно меньшей:  $c' = c/n$ , где  $n$  — показатель преломления (в воде для видимого света  $n \approx 1,5$ ).

Нетрудно сообразить, что когда  $v > c'$ , есть такой угол излучения, при котором волны, идущие от всех участков траектории, складываются. Угол  $\Theta$  просто связан со скоростью электрона и показателем преломления:  $\cos \Theta = c'/v$ . Именно под этим углом и происходит излучение Черенкова—Вавилова.

Подобное явление, но не для света, а для звука, обнаружил в XIX веке Эрнст Мах. Пуля, движущаяся со сверхзвуковой скоростью, излучает звук под углом, косинус которого равняется отношению скорости звука к скорости пули («угол Маха»). Такое же излучение звука происходит и при движении сверхзвуковых самолетов.

В 1937 году И. Е. Тамм и И. М. Франк поняли физическую причину явления, названного излучением Черенкова—Вавилова, и построили его количественную теорию. Определяя угол, под которым происходит излучение, можно найти скорость заряженной частицы. Поэтому излучение Черенкова—Вавилова оказало большое влияние на экспериментальную физику высоких энергий — появился способ определять с большой точностью энергию, например, протонов, участвующих в столкновениях элементарных частиц.

В 1958 году И. Тамм, И. Франк и П. Черенков получили Нобелевскую премию «за открытие и интерпретацию эффекта Черенкова».

А вот как было открыто явление сверхтекучести академиком П. Л. Капицей в Институте физических проблем АН СССР в 1937 году.

Изучались свойства жидкого гелия при низких температурах. Было известно, что при температурах, меньших 2,2 градуса Кельвина ( $-270,8$  градуса Цельсия), жидкий гелий переходит в другую модификацию — гелий II, с совершенно другими свойствами. Голландский физик Виллем Кеезом обнаружил, что гелий II имеет теплопроводность в  $10^6$  большую, чем медь, что уже очень странно. Затем обнаружилось, что у гелия II аномально малая вязкость — в  $10^3$  раз меньше, чем у воды. А микроскопический механизм теплопроводности и вязкости очень схож, и при большой теплопроводности всегда возникает и большая вязкость. Теплопроводность определяется скоростью передачи от слоя к слою тепловой энергии, а вязкость — скоростью передачи количества движения. Чем больше одно, тем больше и другое, а у гелия все получалось наоборот.

Размышления над этим парадоксом привели Капицу к идее, что никакой «сверхтеплопроводности» нет, а большая теплопроводность, обнаруженная Кеезом, обусловлена потоками, возникающими в гелии II из-за того, что он находится в состоянии сверхтекучести. В этом состоянии жидкий гелий может проходить через трубки без всякого трения. Поэтому достаточно самой малой неоднородности плотности, возникающей при разности температур, чтобы под влиянием силы тяжести появились потоки, переносящие тепло.

Чтобы эта идея превратилась в достоверную истину, Капице понадобилось поставить десятки тончайших экспериментов. Первоклассный экспериментатор, он обсуждал свои опыты с первоклассным теоретиком Л. Д. Ландау. Теория и эксперимент стимулировали друг друга. Благодаря

этому взаимодействию Ландау создал одну из лучших своих работ — теорию жидкого гелия II, с помощью которой удалось количественно описать все обнаруженные Капицей экспериментальные факты.

## ИНСТРУМЕНТЫ ПОЗНАНИЯ

Какими инструментами пользуется наука в процессе познания? Разумеется, прежде всего здравым смыслом и законами логики. Но, кроме того, в естественных науках были развиты и проверены на опыте принципы, позволяющие избегать ошибок и быстрее приходить к цели. Вот некоторые из них.

Принцип причинности: причина предшествует следствию. Мы увидим, что причинность физических явлений действительно можно проверить на опыте.

Любая теория должна удовлетворять принципу соответствия: переходить в предшествующую, менее общую теорию в тех условиях, в которых предшествующая была установлена. Как мы уже говорили, этот принцип отражает преемственность науки.

Принцип наблюдаемости, сыгравший очень важную роль в становлении физики XX века: в науку должны вводиться только те утверждения, которые могут быть хотя бы мысленно, хотя бы в принципе проверены на опыте. Впрочем, как станет ясно, это требование нельзя применять без оговорок.

В трудный период создания квантовой механики, во время мучительных споров, вызванных противоречием между вероятностным характером предсказаний новой теории и однозначной причинностью классической физики, Нильс Бор ввел принцип дополнительности, согласно которому некоторые понятия несовместимы и должны восприниматься только как дополняющие друг друга. Так, измерение координаты частицы делает неопределенной скорость. Идея дополнительности позволяет понять и примирить такие противоположности, как физическая закономерность и целенаправленное развитие живых объектов.

Древние говорили: «Природа не делает скачков». Это означает, что величины, встречающиеся в природе, — непрерывные функции других величин. Скачки, которые возникают в теориях, — результат разумной идеализации процессов, в реальности скачки хоть мало, но сглажены. С этим характером физических функций связана целая область теоретической физики, изучающая так называемые «аналитические свойства» физических величин.

Требование красоты научной теории тоже один из принципов познания. Под красотой теории прежде всего понимается установление неожиданных связей между разнородными явлениями. Одно из проявлений красоты в физике — свойства симметрии законов природы, например, неизменность уравнений электродинамики при переходе к движущейся системе координат или при изменении знака времени. Дальше мы подробно обсудим свойства симметрии.

Обсуждая научные парадоксы, мы видели, как важна для ученого способность удивляться. Но эти примеры, кроме того, дают и определенное



представление о красоте науки. Из незаметных на первый взгляд фактов после глубоких размышлений возникают неожиданные и важнейшие следствия. Слабое свечение неба заставляет нас пересмотреть свои взгляды на геометрию мира; закон сохранения энергии и равномерность хода времени оказываются теснейшим образом связанными; применение теории тяготения ко всей Вселенной приводит к поразительному заключению о расширяющейся Вселенной...

Логическую взаимосвязанность результатов науки выразил выдающийся немецкий математик Давид Гильберт, заметив, что если мы допустим, что дважды два равняется пяти, то сможем доказать, что из печной трубы вылетает ведьма. Красота науки и в логической стройности, и в богатстве связей. Умение чувствовать красоту вместе со способностью удивляться определяет выбор научной профессии.

### Подводные камни

Нильс Бор сказал: «Специалист — это тот, кто знает некоторые привычные ошибки в данной области и умеет их избегать».

Поговорим о самых распространенных и существенных психологических ошибках, затрудняющих научную работу.

На первой стадии работы, когда надо раздуть пламя, которое вот-вот погаснет, иногда необходимы поиски доводов, подтверждающих принятую точку зрения. Но как только работа начала оформляться, успокаивающие соображения приносят только вред. Теперь главной становится задача найти опровергающие факты. Доводы «за» находятся сами собой, без сознательных усилий.

Стремление обязательно сделать открытие очень часто приводит к выискиванию успокоительных аргументов и даже к невольной подтасовке фактов.

Вот случай, когда ничтожная недобросовестность в обработке экспериментальных данных, накапливаясь, привела к совершенно неправильному результату. Изучалось распределение по энергиям числа альфа-частиц, вылетающих из ядер при альфа-распаде. Или, иными словами — энергетический спектр альфа-частиц. Он состоит из резких максимумов. Нетрудно сообразить, что разница между энергиями максимумов дает возможные значения энергии возбуждения ядра, получающегося после распада (дочернее ядро).

В эксперименте обнаружили равнотстоящие по энергии группы альфа-частиц. Это означало, что интервалы между соседними энергетическими уровнями дочернего ядра одинаковы. Результат стал полной неожиданностью, противореча существующим представлениям о структуре ядра.

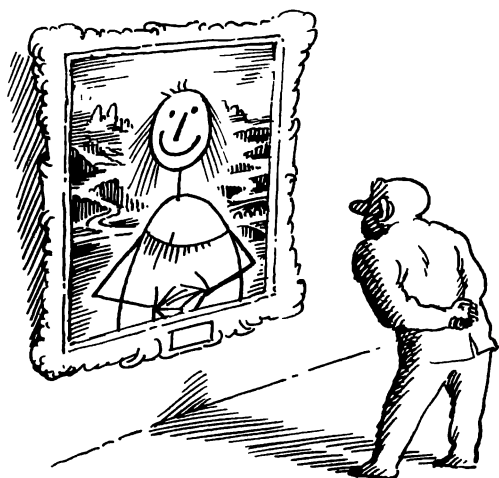
Экспериментаторы попросили теоретиков дать объяснение. Это был один из тех редких случаев, когда можно гордиться тем, что теорию не удалось построить — дальнейшая проверка не подтвердила полученного экспериментаторами результата. Оказалось, что в начале измерений случайно получились кривые с равноотстоящими энергиями альфа-частиц. Необычный результат так взволновал экспериментаторов, что каждый раз,

когда он не подтверждался, они проверяли напряжение в сети, и если оно отличалось от нормы, отбрасывали результат измерения. Такая проверка делалась только при получении нежелательного результата. Благодаря статистике, небольшая дискриминация привела к равноотстоящим с большой точностью значениям энергии альфа-частиц. Случилось это в лаборатории экспериментатора, известного своими добросовестными работами, который в данном случае потерял контроль над действиями менее опытных сотрудников. Перефразируя булгаковского Воланда, можно сказать: не бывает добросовестности первого или второго сорта, добросовестность одна — безупречная.

Стремление во что бы то ни стало сделать «великое открытие», совершить переворот в науке часто уводит человека за пределы его реальных возможностей. Это порой кончается грустно, а порой и трагически. Известно, что физические институты выделяют дежурных сотрудников для ответов авторам «великих открытий». Подобные открытия имеют общие черты:

1. Перевороту подвергается не отдельный вопрос, а сразу все результаты современной науки.
2. Автор не имеет профессиональных знаний в данной области.
3. Никогда не цитируются современные научные работы, по-видимому, потому, что автор с ними незнаком.
4. Автор заявляет, что его работа — плод многолетних усилий, однако видно, что время потрачено не на математические выкладки, не на эксперименты, даже не на анализ известных фактов, а лишь на старания сгладить противоречия.
5. Никаких других научных работ меньшего масштаба у автора не было.

По этим признакам работа «зановообоснователя» и «основополагателя», как их классифицировал еще Вольфганг Паули, безошибочно распознается независимо от деталей. Между тем истинный переворот в науке непосредственно затрагивает сравнительно узкую область явлений и происхо-



дит на прочной основе имеющихся достижений всех областей науки. Современная наука так специализирована, что требует громадного арсенала технических знаний, которые приобретаются длительной, упорной, добросовестной работой. К сожалению, иногда подобные «труды» получают поддержку людей с учеными званиями, публикуются в статьях и книгах. Сторонники научных сенсаций, несмотря на степени и звания, имеют к науке столь же малое отношение, как и авторы «открытий».

Существует, казалось бы, заколдованный безвыходный круг: нельзя сделать научную работу без ясного понимания, но ясное понимание возникает только в конце, да и то не всегда. В этом одна из главных трудностей научной работы. В каждой сделанной работе преодолевается это противоречие. Происходит это обычно не скачком — исследование продвигается по мере понимания, а понимание углубляется по мере продвижения исследования.

В начале работы часто откладываешь нерешенные вопросы и задачи, которые обязательно надо решить, но которые пока мешают двигаться дальше. Иногда листок с многочисленным перечнем таких вопросов теряется среди бумаг, и когда его снова находишь, с удивлением видишь, что при решении основной задачи почти все неясные места сами собой прояснились.

Стремление с самого начала понять все до конца, а потом уж работать — частая причина неудач. Однако есть люди, которые по своему складу неспособны блуждать в потемках, работать без полного понимания. С такими научными работниками очень полезно обсуждать работы. Трудно переоценить их роль в развитии науки — она гораздо значительнее, чем можно заключить, изучая их собственные труды, сколь бы интересными они ни были. Очень хороший физик с даром глубокого понимания, профессор И. М. Шмушкевич принадлежал к подобному типу. Каждый, кто его знал, стремился в середине или даже в конце работы услышать его критику. Это называлось «пропустить через Шмушкевича». После такой операции все сомнительные и недодуманные места выступали наружу. Если удавалось «пропустить» без замечаний, значит, все в порядке.

В не столь явной форме нелюбовь к блужданию в потемках проявляется в желании делать только достоверные работы. Все исследования, которые нельзя сделать без правдоподобных, но недостаточно обоснованных предположений, отбрасываются как недостоверные.

Эта черта иногда вредит даже физикам самого высокого класса. Эйнштейн писал в некрологе, посвященном очень глубокому физiku Паулю Эренфесту: «Он постоянно страдал от того, что его критические способности опережали конструктивные»...

Противоположный недостаток — желание «схватывать на лету», угадать результат, минуя процесс понимания. Назовем его «вундеркиндством». Воспитание и самовоспитание научного работника должно начинаться с полного устранения всяких признаков «вундеркиндства». Ландау, отличавшийся поразительной широтой охвата всех областей физики и совсем уж фантастической скоростью мысли, никогда не допускал никаких признаков «вундеркиндства», а старался довести вопрос до полной

ясности, до предельной простоты. И в шутку говорил: «Я — гениальный тривиализатор».

В научной работе не должно быть спешки и суеты, но недостаточно активная работа не только отнимает много времени, но и малоэффективна. Впрочем, это относится ко всем видам человеческой деятельности.

Еще одна психологическая черта, которая мешает творчеству, — вера в собственную непогрешимость. Конечно, нельзя сделать ничего серьезного без веры в свои силы. Но убеждение в непогрешимости приводит лишь к тому, что научный работник, раз выбрав неверное направление, будет его упорно держаться.

Необходимо найти правильную меру уверенности и сомнения, колебания и непреклонности, гибкости и негибкости.

Еще одна опасность на пути занимающихся наукой — «старение». Это слово стоит в кавычках, потому что не имеет отношения к возрасту. «Старение» начинается незаметно и может поразить тридцатилетнего человека. Очень заманчиво передать всю техническую работу помощникам, чтобы освободить себе время для более важных научных дел. Постепенно передаются и вычисления, а отчасти и размышления...

Этого делать нельзя, как нельзя общаться с любимым человеком через третье лицо. Как только научный работник перестает работать своими руками, делать измерения, если он экспериментатор, вычисления, если он теоретик, начинается «старение», независимо от возраста и чина. «Стареющий» ученый теряет способность удивляться и радоваться каждому шагу, не жаждет больше учиться; вместе с чванством и важностью возникает стремление решать исключительно мировые проблемы. При этом резко возрастает количество работ, публикуемых за единицу времени. Ему кажется, что все его советы необычайно ценны и непогрешимы, поэтому достаточно провести полчаса в неделю возле каждой установки, чтобы сделаться соавтором работ. Оговоримся: в некоторых случаях совет квалифицированного и опытного человека может оказать решающее влияние на ход работы. Иногда он оказывается настолько ценным, что дает право на соавторство. Но это исключение: участие в большом количестве публикаций настораживает и очень часто не только не вызывает уважения, но дает повод для насмешек. Как это объяснить самому пострадавшему? И вообще, как объяснить недопустимость слишком большого числа работ у любого научного работника? Может быть, следует выбросить неудачный анкетный вопрос о количестве публикаций, спросив вместо этого, какие оригинальные результаты получены; какие научные вопросы разрешены, благодаря вашим работам; или, если уж обязательно нужна цифра: сколько имеется ссылок на ваши работы?

Помимо засорения научных журналов, необузданное писание создает атмосферу дешевого успеха, чуждого задачам науки. Постепенно уменьшается чувство ответственности, исчезает желание взвешивать каждое слово в статье, чтобы не сделать ошибочного утверждения. Рождается успокоительная мысль, что, несмотря на ошибки, неправильная работа нередко указывает верный путь...

Понемногу научное содержание сменяется рассуждениями общего характера, увеличивается описательная часть статьи, уменьшается количество формул. Отсутствие новых мыслей автор пытается компенсировать ос-



троумными высказываниями. Попытавшись вернуться к работе, он способен лишь на замечания о работах, сделанных другими. Особенно острый характер это заболевание приобретает, когда научный работник внезапно оказывается на высоком административном посту. Тогда к его научным высказываниям добавляется самоуверенность, пропорциональная административным возможностям. Каждый знает примеры подобных научных судеб. Такая деятельность не может заменить радости подлинной творческой работы, и чаще всего порождает глубокое, иногда скрытое чувство неудовлетворенности. Такова расплата за пренебрежение научным трудом.

По-моему, успех в науке связан не с физическим возрастом, а с определенным характером способностей, с определенным психологическим типом. Эти свойства не обязательно ухудшаются с годами.

Но как же быть с тем несомненным фактом, что большая часть важных открытий сделана молодыми людьми? Из этого статистического наблюдения делается вывод, что значительные работы в математике или теоретической физике можно сделать только до тридцати лет.

Думаю, это распространенное заблуждение — результат неправильного анализа статистических данных.

Статистика означает только, что есть коррелятивная, сопутствующая связь между возрастом и научным успехом, но отсюда отнюдь не следует, что эта связь неизбежная, вытекающая из логики научной работы.

Действительно серьезная, но преодолимая трудность состоит в том, что ученому приходится перестраивать систему взглядов, стиль работы, а иногда и свой психологический склад с каждым большим открытием. В некоторых случаях это легче сделать молодому человеку, не обремененному грузом установившихся представлений. Вместе с тем привычка к гибкости мысли, порождаемая опытом научной работы, может скомпенсировать преимущества начинающего. Во всяком случае, индивидуальный разброс способности воспринимать новое значительно превышает те изменения, которые в среднем появляются с возрастом. Поэтому предельный возраст для занятий наукой нельзя уста-

новить статистически, он определяется индивидуальными способностями ученого.

Самая главная причина раннего старения состоит, на мой взгляд, в том, что очень часто, достигнув успеха в раннем возрасте, научный работник заболевает желанием и дальше получать результаты не меньшего значения, теряет бескорыстную способность радоваться «малым открытиям», повседневному труду, без которого не существует научной работы. И тогда он рано или поздно проделывает только что описанный печальный путь перерождения.

Думаю, что тот, кто ясно понимает причины раннего старения, может уничтожить свой возрастной барьер. Впрочем, я неравнодушен к этому вопросу и, отстаивая интересы своего возраста, могу заблуждаться.

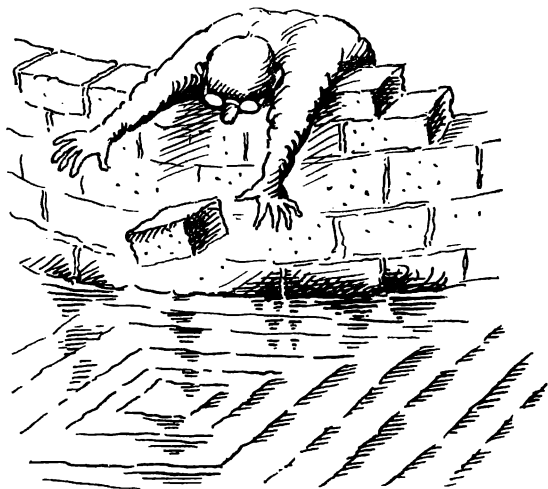
Одно бесспорно: когда человек, преданный науке, чувствует ослабление фантазии, творческих способностей, связанное с возрастом или болезнью; когда он еще может работать, но не так интенсивно, остается единственный достойный выход — помогать ученикам, гордясь их работами, как гордится рекордами своих воспитанников спортивный тренер, который сам был чемпионом.

## СЕКРЕТЫ РЕМЕСЛА

Можно ли проследить, как возникают скачки мысли, неожиданные сопоставления, внезапные просветления — все, что составляет творческий процесс? Как направить фантазию в нужную сторону? Какие приемы облегчают поиски решения? Какая последовательность действий надежнее и быстрее приводит к решению задачи?

### Невидимые миру слезы

В книге «Наука и метод» Анри Пуанкаре анализирует процесс математического творчества, который, по его мнению, состоит из чередования сознательных и подсознательных усилий.



Он рассказывает несколько случаев, когда после долгих бесплодных усилий работа откладывалась, а потом, внезапно, во время прогулки или при входе в омнибус, возникала идея решения. После этого требовалось несколько часов сознательной работы, чтобы завершить исследование. Эта схема действует и в теоретической физике и, я думаю, во многих других областях творчества. Михаил Зощенко, когда рассказ не удавалось довести до конца, откладывал его со словами: «Ничего, в духовке дойдет!» Иногда решение приходит во сне или еще чаще в состоянии между сном и бодрствованием, которое возникает после напряженной работы. Когда я решал задачу о вылете электронов из атома при ядерных столкновениях, качественно все было ясно: в результате столкновения с нуклоном ядро приобретает скорость за малое время, и электроны со скоростями, меньшими скорости ядра, не успевают улететь вместе с ним, а остаются там, где произошло столкновение. Но как найти количественное решение? Как получить формулу, дающую вероятность вылета любого из электронов? Подсознание выдало идею во сне: наездница скачет по цирковой арене, внезапно останавливается, и цветы, которые она держит в руках, летят в публику. Эта картина подсказала, что нужно перейти в систему координат, в которой ядро после столкновения остановилось — в такой системе проще описать состояние вылетающих электронов. Оставалось только перевести эту мысль на язык квантовой механики.

Под словом «подсознание» мы здесь понимаем область бессознательного, примыкающую к сознанию, хранящую весь накопленный опыт и питающую интуицию. Подсознание работает очень активно, часто убеждая человека от опасности, подсказывая ученому решение, писателю — идею, художнику — форму. Сознательные попытки решить проблему дают задание подсознанию искать решение в определенном круге понятий. Подсознательно из запаса накопленных знаний и особенно из арсенала собственного опыта отбираются сочетания понятий, которые могут оказаться полезными. Они предъявляются на суд сознания и либо остаются, если окажутся пригодными, либо уходят опять в темноту. Особенность подсознательной работы в том, что ассоциации возникают бесконтрольно. Поэтому возможно появление самых неожиданных сочетаний.

Иногда во время бессонной ночи, вызванной работой, кажется, что ты наблюдаешь за этим процессом со стороны, видишь больше деталей, и, конечно, картина становится еще более субъективной. Пуанкаре представлял себе подсознание в виде набора неких молекул, которые приводятся в движение предварительной работой сознания, сталкиваются и расходятся, а иногда сцепляются, образуя прочные соединения. Другой образ — собрание знакомых и полужнакомых людей, символизирующих различные понятия. Надо, чтобы они заинтересовались друг другом, начали общаться. Надо знать, кто из них уже раньше встречался. Надо почувствовать атмосферу собрания, чтобы получить ключ к нахождению недостающих идей. Конечно, это только образы. Согласно принципу наблюдаемости, какие-то их черты приобретут научную ценность, если на их основе будут указаны приемы, повышающие эффективность подсознательного процесса.

## Обузданная фантазия

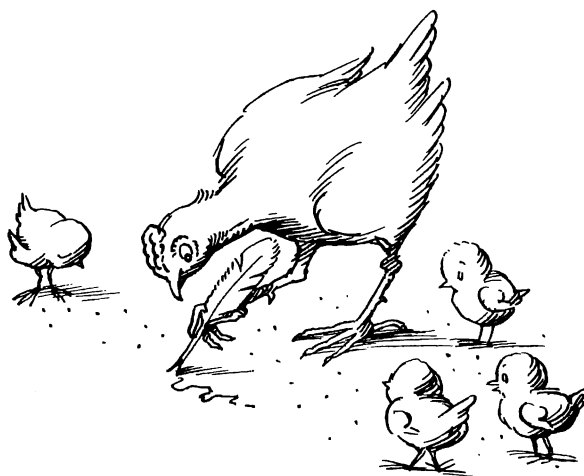
Такие приемы действительно существуют. Хорошо известно, как важно для плодотворного рабочего дня поработать хотя бы недолго накануне вечером. Мы как бы даем задание подсознанию и утром следующего дня встаем с ясной программой действий.

Чтобы сдвинуться с мертвой точки при решении трудной задачи, необходимо сознательными усилиями, многократно повторяя рассуждения и вычисления, довести себя до состояния, когда все аргументы «за» и «против» известны наизусть, а все выкладки проделываются без бумаги в уме. Такая подготовка настолько облегчает работу подсознания, что очень скоро решение приходит само собой. Можно искусственно регулировать соотношение между работой сознания и подсознания, между анализом и интуицией. Чтобы увеличить удельный вес контроля, можно работать вместе с критически настроенным соавтором, а чтобы подстегнуть интуицию — с соавтором, склонным к фантазиям.

Можно дать свободу интуиции, свободно фантазируя и временно отвлекаясь от трудностей. Способ «грез наяву» особенно полезен при изобретательстве, когда важно выдать на поверхность большое число вариантов решения, забывая на время о трудностях технического осуществления.

Для воспитания у студентов способности чередовать сознательные и интуитивные усилия полезны импровизированные лекции, когда лектор при участии слушателей пытается выяснить новый для него самого вопрос, показывая, как сам решал бы задачу. При этом видно, как логика задачи диктует ход решения.

Обучая молодых людей теоретической физике, можно применять метод, дающий, как мне кажется, хорошие результаты — работать в их присутствии. Сначала ученик только сопереживает, стараясь молча понять возникающие трудности и радости, потом превращается в соучастника, задает вопросы, возражает и спорит. Наконец, наступает момент, когда у него появляются собственные идеи, определяются задачи для самосто-





ательного решения. Такие занятия полезны не только для обучения техническим приемам. Главное в том, что ученик вместе с руководителем проходит извилистый путь со всеми взлетами и падениями от первоначальной идеи до завершённой работы.

Наверно, так же можно было бы воспитывать молодых альпинистов, если бы техника безопасности не запрещала выпускать третьеразрядников вместе с мастерами на восхождение пятой категории трудности.

Отношение учеников к учителю напоминает отношение детей к родителям: начинается с чрезмерного уважения и даже восхищения. В это время обучение наиболее плодотворно — ученик впитывает все советы. Затем приходит более трезвая оценка, возникает критическое отношение. Иногда наступает охлаждение, даже отчуждение. Тогда обучение бесполезно, на время лучше отдалиться. С годами отчуждение чаще всего проходит и возникает зрелая любовь, прощающая недостатки.

Тот, кто хоть однажды делал работу, лежащую на границе или даже, кажется, за пределом возможного, знает, что есть только один путь — упорными неотступными усилиями, решением вспомогательных задач, подходами с разных сторон, отменяя все препятствия, отбрасывая посторонние мысли, довести себя до экстаза (или до вдохновения?), когда сознание и подсознание смешиваются, сознательное мышление продолжается во сне, а подсознательное наяву... Такой экстаз довольно опасен, близок к психическому расстройству, к тому состоянию, которое описал Чехов в «Чёрном монахе». Эйнштейн признавался, что в период создания теории относительности доходил до галлюцинаций. Но это состояние редко приходит. Для него необходимо совпадение нескольких маловероятных условий: наличие трудной задачи, взволновавшей до глубины души; ощущение, что именно ты можешь и должен ее решить; владение необходимой для ее решения техникой; опыт решения более легких задач подобного рода; безупречное здоровье, чтобы выдержать длительную бессонницу; наконец, полное отвлечение от посторонних забот. Но самое главное — нужно огромное мужество, чтобы поверить своим результатам, как бы они ни расходились с общепринятыми, не испугаться собственных выводов, довести их до конца. Сколько замечательных работ осталось незавершёнными из-за недостатка смелости!

### Стиль научной работы

Существует глубокое родство в характере творческого процесса в любой области. Описания художественного творчества, сделанные художниками и поэтами, очень близки описанию процесса математического творчества у Пуанкаре. Много сходства есть и в методах осуществления поставленной задачи. И. Я. Померанчук, впервые попав в мастерскую скульптора, сказал: «В искусстве так же, как и в науке, надо знать, чем можно пренебречь».

Но есть принципиальная разница между истиной, заложенной в произведении искусства, и истиной, к которой стремится наука. Задача искусства — исследование мира глазами художника, познание связи природы и познающего человека. Эта задача по необходимости субъективна,

и произведение искусства не может не содержать в себе черты индивидуальности своего создателя.

Задача науки — нахождение объективных законов природы, и поэтому окончательный результат не зависит от личных качеств ученого. Но объективность науки исчезает, когда мы переходим от окончательной цели к способам ее осуществления, способам подхода к познанию истины, к методологии. У каждого ученого свой собственный стиль исследования, свой подход к решению стоящих перед ним задач. Мало того, стиль и способ подхода определяют характер изучаемых задач. Индивидуальность ученого проявляется так же, как индивидуальность архитектора, стремящегося к гармонии в рамках утилитарной задачи.

Есть физики, для которых несущественно, каким образом получен результат, лишь бы цель была достигнута. Но есть и такие (на мой взгляд, заслуживающие большего уважения), которые любят методику теоретической работы, добиваясь, чтобы результат был получен не искусственным методом, а наиболее соответствующим задаче. Это ведет к более глубокому пониманию и, следовательно, к большей достоверности результатов. Существуют абстрактные физики-теоретики, решающие задачи, не связанные непосредственно с опытом; и физики-теоретики, работающие в тесном контакте с экспериментаторами. Для последних заметную часть работы составляет теоретический анализ эксперимента, уже сделанного или предполагаемого. Наряду с теоретиками, предпочитающими строгий математический подход (к сожалению, редко возможный в теоретической физике), существуют ученые, для которых важнее подход качественный, когда результаты получаются сначала на упрощенных моделях и по возможности наглядно.

Среди физиков нашей страны самым ярким примером теоретика, стремившегося получить результат наиболее соответствующим задаче методом, был Л. Д. Ландау. Академик В. А. Фок добивался максимально строгой постановки вопроса. И. Е. Тамм сочетал разные стили: иногда это были работы по изучению приближенных моделей явления, а иногда, как у Ландау, исследования сложной физической задачи приближенными методами. Н. Н. Боголюбов представлял собой редкий пример сочетания двух профессий — математика и физика-теоретика. Для него характерно строгое исследование сознательно упрощенных моделей явления. И. Я. Померанчук ставил целью находить такие вопросы и строить теорию таких явлений, которые вскрывают самые глубинные свойства физического мира. Поэтому его работы всегда оказывались на переднем крае науки. Большое влияние на развитие многих областей теоретической физики оказал замечательный ученый Я. И. Френкель. Ему принадлежит громадное число физических идей, которые он выдвигал, не стремясь довести работу до конца, ограничиваясь качественным решением задач.

Неудивительно, что ученый, предпочитающий, например, строгий формально-математический метод исследования, привлекает своими работами молодых людей математического склада. Возникает группа людей, объединенных общим стилем исследований и вытекающей отсюда общностью задач. Так появляются научные школы. И хотя представители разных школ часто считают свой стиль единственно правильным, раз-

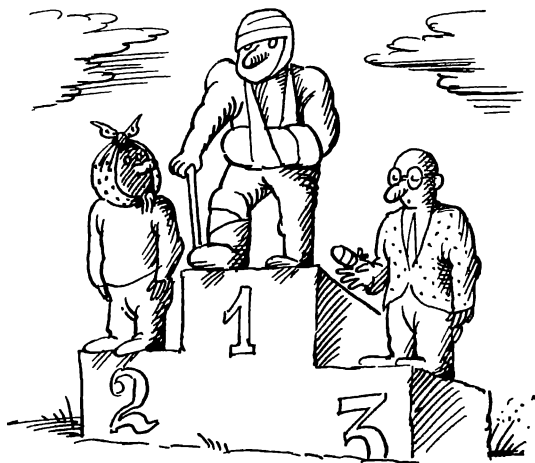
ные направления дополняют и стимулируют друг друга. В науке, в отличие от искусства, истина не зависит от того, каким способом к ней приближаться.

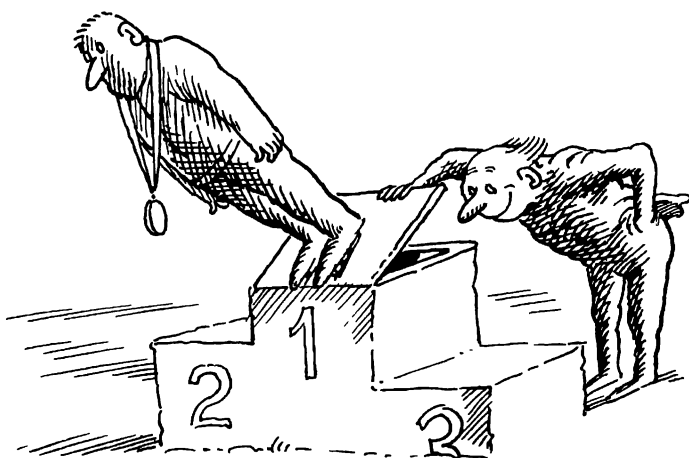
### «Достоверные» и «недостоверные» работы

Обязателен ли стиль или школа для научного работника? Изменяется ли со временем стиль? Характер избираемых задач и способ подхода к ним должен изменяться с ростом квалификации ученого, с совершенствованием техники, с приобретением опыта. Начиная свой путь в науке, лучше не браться за неопределенные, проблематичные работы. Необходимо набраться опыта и овладеть техникой, решая не очень сложные задачи. Очень важно усвоить, что работа, которая «получилась», которую удалось довести до конца, приносит гораздо больше пользы для воспитания качеств научного работника, чем десятки работ, брошенных на середине из-за чрезмерных трудностей. Начинать нужно с «достоверных» задач, которые не требуют введения недоказанных или недоказуемых предположений, а являются следствием полученных раньше результатов. Начиная научный работник не имеет права на ошибочные работы.

Однако с ростом опыта и числа доведенных до конца «достоверных» работ отношение к «недостоверным» должно измениться.

Надо ли серьезному ученому гордиться тем, что он никогда не делал ошибочных работ? Ошибочных не в смысле тривиальных ошибок, неправильных вычислений или невымытой химической посуды — таких ошибок надо стыдиться, как неблагоприятных поступков. Я имею в виду правдоподобные, но необоснованные предположения, неправильность которых выясняется только в ходе дальнейшего развития науки. С одной стороны, отсутствие ошибочных работ говорит о высокой научной добросовестности и интуиции ученого, а с другой может означать недостаток размаха и мужества. Не может быть хорошим горнолыжником или мотоциклистом тот, кто никогда не падал, — значит, он не доходил до





предела своих возможностей. Между тем именно «недостоверные» работы, когда они подтверждаются дальнейшим развитием науки, становятся самыми интересными, так как позволяют проверить предположения, положенные в их основу.

И наоборот, абсолютно достоверные работы, которые неизбежно следуют из полученных ранее результатов, часто не дают существенного толчка науке. Сюда же относится вопрос о сравнении теории с экспериментом, который вызывает много споров между физиками-теоретиками и физиками-экспериментаторами. Совпадение теории с опытом не единственный и даже не главный аргумент в оценке теории. Хорошая теоретическая работа представляет собой убедительный вывод из прежних достижений науки, которые получены в результате громадного числа многократно проверенных экспериментов. Несовпадение хорошей теоретической работы с опытом означает, что следует пересмотреть предположения, положенные в ее основу, и что произошло какое-то малое или большое открытие. Тогда как совпадение с опытом неправильной теории не делает ее более убедительной. О качестве теории нужно судить по тому, насколько непротиворечиво и убедительно она построена.

Убедительно построенные «недостоверные» теории влияют на развитие науки, даже когда положенные в их основу предположения оказываются неверными. Мне хочется рассказать о замечательной работе академика И. Е. Тамма, которая сильно повлияла на физику элементарных частиц. В то время — в 1934 году — только что появилась теория  $\beta$ -распада, предложенная Энрико Ферми. В ней был указан механизм превращения нейтрона в протон с испусканием электрона и нейтрино. Основываясь на этом механизме, Тамм построил теорию ядерных сил, то есть, сил, удерживающих в ядре нуклоны — нейтроны и протоны. Основная его идея состояла в том, что один из нуклонов испускает электрон и нейтрино, а другой нуклон поглощает эти частицы. Дальнейшее развитие науки показало, что обмен электронами и нейтрино почти не влияет на ядерные силы. Ядерные силы обусловлены тем, что нуклоны, как и в теории Там-

ма, испускают и поглощают частицы, но другие, открытые позже. Одна из таких частиц — пи-мезон. Таким образом, исходное предположение теории не подтвердилось. Тем не менее, идея о том, что ядерные силы связаны с испусканием и поглощением частиц нуклонами, оказалась не только правильной, но и чрезвычайно плодотворной. Она получила развитие в 1935 году в работе Хидэки Юкавы, где он объяснял ядерные силы обменом частицей, сильно взаимодействующей с нуклонами, предсказав тем самым существование пионов за четырнадцать лет до их открытия.

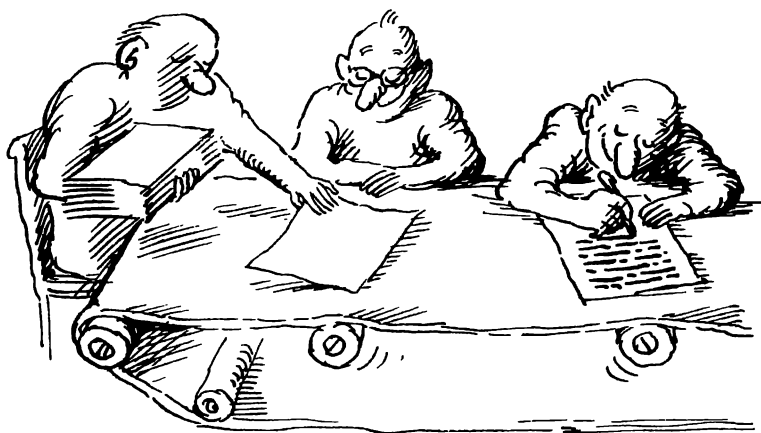
Каждый научный работник должен время от времени задаваться вопросом: почему некто, обладающий равными со мной способностями, сделал в науке больше, чем я, хотя мой уровень понимания и математической техники не ниже? Ответ обычно однозначен: он решается направить свои силы на «недостоверные» работы, а я ограничиваюсь «достоверными».

### Стиль конца XX века

Мы говорили об изменении стиля работы по мере роста опыта и квалификации. Но стиль гораздо больше меняется с развитием самой науки.

Во время затишья уместно заняться методическими работами, уточняя результаты, подготавливая аппарат для дальнейших исследований и, может быть, достижений. Но когда возникает важное открытие и начинается бурный период, главное — не уточнять методику, а получать новые результаты пусть более грубым, менее обоснованным способом.

Во второй половине XX века стиль работы физиков-теоретиков сильно изменился. Возник новый вид организации науки, который можно было бы назвать «коллективным мозгом». Допустим, после анализа накопившихся экспериментов или какого-нибудь экспериментального открытия возникает важная и сложная задача, которая не по силам одному человеку. Для решения подобных задач выработана тактика коллективной работы.



Часть научных работников, которым это ближе по складу характера, начинает заниматься генерацией идей — любых, верных или неверных, по методу «грез наяву». На основе этих идей делается попытка частичного объяснения изучаемого явления. Через десять-двадцать дней не доведенные до конца работы публикуются в виде препринтов. Раз в два-три месяца проводятся узкие конференции для обсуждения накопившейся информации. При этом критически настроенные физики указывают на слабые места. Дискуссия помогает отобрать разумное. Между конференциями более квалифицированные физики делают выводы и указывают направление дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Приблизительно раз в год на широкой конференции подводятся итоги. Исходные идеи подобны мутациям, которые либо закрепляются, либо приводят к гибели теории. Конференции служат и механизмом «естественного отбора». При таком стихийном разделении труда идея, выдвинутая вчерашним студентом, иногда оказывается в центре внимания всех участников конференции. Возможно, при решении следующей задачи ему уже будет доверена не генерация идей, а критический отбор.

Таким методом были исследованы и продолжают исследоваться некоторые важнейшие проблемы теории элементарных частиц. Перечислим без объяснения:  $SU(3)$ -симметрия, кварки, монополи...

Не уничтожает ли стиль XX века поэзию исследования? Нет — роль отдельного исследователя сокращается, но возникает новая романтика, радость совместных размышлений и споров.

### Роль вычислительной техники

Еще одно существенное изменение в стиле теоретической физики связано с появлением вычислительной техники.

В давние времена задача считалась решенной, если решение удавалось изобразить в виде комбинации известных — «элементарных» — функций. Это случается чрезвычайно редко, и такие случаи быстро исчерпались.

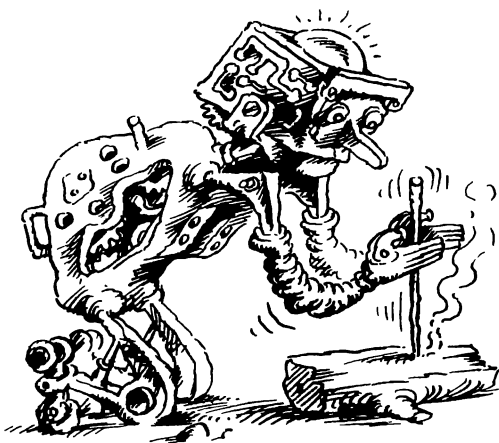


Позже стали довольствоваться выражением решения через «специальные» функции, определенные специально для данного круга задач. Однако потребности науки и этим не удовлетворились. Возникли приближенные методы. При этом решение изображается в виде суммы бесконечного ряда, каждый из членов которого содержит известные функции. Чтобы этими рядами можно было пользоваться, нужно, чтобы уже первые несколько членов давали результат с хорошей точностью. Математики говорят: «Нужно, чтобы ряд хорошо сходился». Чтобы члены ряда быстро убывали, они должны содержать возрастающие степени какого-либо малого параметра. (Параметры — это совокупность чисел, определяющая условия задачи). Поэтому теоретиков постоянно спрашивали: «Что в вашей задаче является малым параметром?» Этот вопрос очень часто означал утверждение: «Ваша теория сомнительна, поскольку в ней нет малого параметра, и непонятно, какую роль играют отброшенные вами члены ряда».

Для решения задачи с помощью ЭВМ не требуется малого параметра. Правда, решение не изображается через какие-либо функции параметров задачи (аналитическая форма решения), а дается в виде набора числовых таблиц. Поскольку с появлением вычислительных машин решение не ищется в аналитической форме, интерес к ней существенно снизился, но не совсем, как мы сейчас увидим.

Предельный пример вычислительного подхода продемонстрировал блестящий представитель «машинного» стиля американский физик-теоретик Кеннет Уилсон (нобелевский лауреат 1982 года). Он решил на вычислительной машине так называемую задачу Кондо — по имени японского физика, сделавшего первый шаг в постановке вопроса. Требовалось объяснить аномальное поведение при низких температурах металлов с примесью атомов, имеющих магнитный момент. Магнитная восприимчивость и электрическое сопротивление при очень низких температурах сначала возрастают при понижении температуры, а затем стремятся к конечному пределу. Теоретическое исследование задачи показало, что с уменьшением температуры роль взаимодействия электронов металла с атомами примеси становится настолько существенной, что обычные способы, предполагающие малость взаимодействия, совершенно неприменимы. Необходимы новые методы подхода, не требующие малого параметра. Такие методы стали интенсивно развиваться под влиянием задач, выдвинутых сначала в теории элементарных частиц, а затем в физике твердого тела.

Тем не менее попытки аналитического решения задачи не приводили к цели. Уилсон после глубокого исследования задачи сумел так ее сформулировать, что возникла возможность использовать вычислительные машины. Для вычисления магнитной восприимчивости при заданной температуре требуется всего несколько минут машинного времени. Правда, эти «несколько минут» дались долгими поисками методов, упрощающих задачу. Без этого вычисление было бы невозможно. Казалось, что проблема полностью решена — можно с любой точностью вычислить температурный ход сопротивления и магнитной восприимчивости. Но не в том главная ценность задачи Кондо. Ее теоретическое и эвристическое значение — в развитии методов исследования, выходящих за рамки теории возмущений. Именно поэтому физики с таким волнением встретили блестящую работу молодого советско-



го теоретика Павла Вигмана, которому удалось для широкого класса случаев решить задачу Кондо аналитически, и тем самым глубже понять явление.

Мы подходим к вопросу о границах применимости вычислительной техники в научном исследовании.

Почему теоретик, получив простой результат надежным, но сложным путем, обязательно отыскивает простой способ решения, получает результат «на пальцах»?

Это делается для того, чтобы в другой задаче, где встретится подобная ситуация и сложный способ откажет, можно было использовать простой способ, основанный на более глубоком понимании.

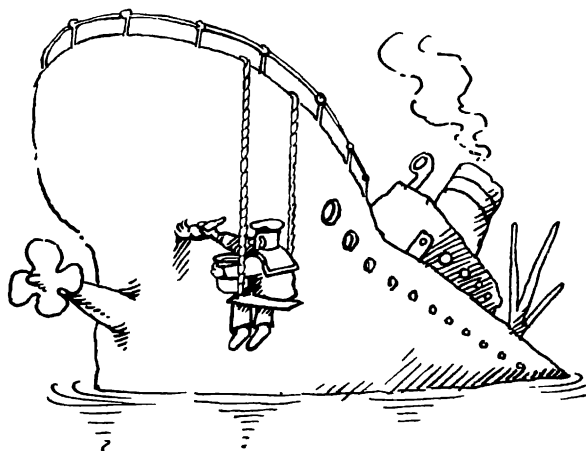
В многочисленных работах делались попытки объяснить свойства ядра, рассматривая его как газ взаимодействующих нейтронов и протонов, причем взаимодействие извлекалось из анализа данных по рассеянию нуклона на нуклоне в пустоте. Это взаимодействие велико, в задаче нет малого параметра. Но при машинном подходе ограничение снимается. Можно так усовершенствовать программу расчета, что задача будет решена численно, несмотря на отсутствие малого параметра. Тем не менее при этом возникает грубая ошибка — не учитывается возможность появления в ядре новых коллективных степеней свободы (пионная степень свободы, пионная конденсация; см. стр. 153). Возможность таких неожиданностей должна быть заранее учтена при программировании, а для этого требуется предварительное, хотя бы грубое, аналитическое решение.

Итак, вывод ясен: прежде чем пользоваться ЭВМ, задачу необходимо всесторонне исследовать аналитическими методами. Это старое, но грозное оружие не утрачивает своего значения.

### Здравый смысл и законы логики

Обычно при написании научных работ и особенно учебников тщательно убираются «леса», помогавшие строить здание. Остается неясным, как был получен результат, какие трудности встречались на пути, как они





преодолевались. А ведь важно именно детально описать ход рассуждений, успехи и отступления, попытки подхода с разных сторон — это принесло бы большую пользу начинающим. Более того, излагая окончательные результаты и не объясняя, как они получены, можно внушить начинающим чувство неполноценности, ощущение, что для занятий наукой требуется не обычный здравый смысл, а особый склад ума, позволяющий скачками приходить к неожиданным заключениям. К счастью, это не так.

В нашем распоряжении только один ум. Рабочий инструмент для занятия наукой наряду с интуицией и фантазией — тот же самый здравый смысл, который позволяет хозяйке делать разумные покупки на рынке. Ферми задавал начинающим физикам неожиданные вопросы, например, сколько в Чикаго настройщиков роялей? По тому, как делается оценка, можно судить о способности применять здравый смысл.

Понимание любых, даже самых сложных и неизученных вещей возникает не в результате внезапного озарения свыше, а в результате упорного труда.

Именно поэтому, несмотря на чередование сознательных и подсознательных усилий, на присутствие неопределенного элемента догадок и интуиции, результаты в научной работе пропорциональны затраченному труду, пропорциональны затраченному времени.

Здравый смысл позволяет так организовать труд, методику работы, чтобы на долю интуиции оставались по возможности небольшие скачки. Любую сложную задачу необходимо свести к совокупности гораздо более легких. Движение к окончательному результату сводится к последовательному преодолению сравнительно небольших трудностей, к движению шаг за шагом.

Как это делается? Прежде всего задача упрощается до предела, когда остаются лишь главные ее черты. Постепенно усложнять уже решенную задачу несравненно легче, чем сразу решать сложную. Затем выясняется возможность решения задачи в предельных частных случаях. Кроме того, прежде чем пытаться получить количественные решения, нужно найти



результаты грубо, качественно, что гораздо проще. И, наконец, на всех этапах необходимо пытаться опровергнуть полученное, используя все известные к настоящему времени соотношения, к которым полученный результат должен сводиться в частных случаях.

Следует проверять и логическую структуру полученных результатов. Может ли этот результат следовать из принятых посылок? Не противоречит ли результат каким-либо принципам, которые могли быть незаметно нарушены при выводе? Очень часто результат применим при более широких предположениях, чем сделанные в процессе его получения. Выражаясь математически, результат иногда можно аналитически продолжить за пределы сделанных предположений.

Не слишком ли легко результат получился? Ведь существует нечто вроде «закона сохранения трудностей». Если при каком-нибудь подходе выясняются принципиальные трудности решения, то они, как правило, должны проявиться и при любом другом подходе. Допустим, придуман остроумный обходной прием, устраняющий трудности. Не стоит на этом успокаиваться, надо выяснить, почему исчезли затруднения. Обычно после такого анализа задачу либо удастся решить и прямым способом, либо обнаруживается ошибочность искусственного обходного решения.

И, наконец, красиво ли то, что получилось. Мы уже говорили, и в дальнейшем подробно покажем, что красота научных результатов служит проверкой их правильности и помогает находить новые соотношения.

### Последовательность действий

Вот разумная, на мой взгляд, последовательность действий в теоретической физике, а, возможно, и не только в ней. (В связи с этим рекомендую читателям блестящую книгу Д. Пои́а «Как решать задачу»). Следует начать с попытки решить задачу до изучения литературы. Первое знакомство с задачей без предвзятости, продиктованной предшествующими работами, первые качественные оценки порядков ожидаемых величин,

первые поиски путей решения, во многом определяют будущий ход работы. Возникает активное отношение к изучению литературы (вторая стадия). Изучение впрямь всегда менее эффективно, чем изучение для дела, под определенным углом зрения. После этого или одновременно выясняются ограничения, накладываемые на возможный результат общими принципами теоретической физики, например, законами сохранения. Затем надо попытаться найти грубое качественное решение при различных значениях параметров задачи. Потом искать количественное решение задачи в предельных случаях, когда задача существенно упрощается. Далее наступает, может быть, самая важная и трудная часть работы. Полученные результаты анализируются и критикуются всеми способами, о которых мы уже говорили. Если все добытое до этого окажется верным, можно предпринимать последнее усилие — получить количественный результат аналитически или с помощью вычислительных машин. И, конечно, на всех стадиях работу необходимо обсуждать со всеми, кто занимался этой или близкими задачами. Дело завершается публикацией. Полезно какое-то время выдержать законченную и подготовленную к печати работу, а потом еще раз просмотреть.

### Иногда ошибка видна сразу

Какие ограничения накладывают на решение задачи общие теоремы теоретической физики?

В солнечный зимний день большая компания загорала на вершине Кохты в Бакуриани. Молодые люди радовались и удивлялись голубому цвету неба. Один из них сказал: «Голубой цвет неба объясняется тем, что по закону Рэлея рассеяние света пропорционально третьей степени частоты, а голубой цвет, имеющий большую частоту, сильнее рассеивается». Этому я как физик не мог стерпеть и возразил: «Рассеяние света — явление обратимое, и не может содержать нечетных степеней частоты, а закон Рэлея содержит не третью, а четвертую степень этой частоты. Допустив нечетную степень частоты, мы нарушаем закон обратимости природы, а значит, и всю статистическую физику...» Этот разговор сильно повысил мой авторитет, подорванный невысокой горнолыжной квалификацией.

Действительно, есть такая теорема: все уравнения физики, кроме слабых взаимодействий, о которых речь пойдет позже, а, следовательно, и явления природы, ими описываемые, не изменяются при изменении знака времени, а выглядят одинаково, откуда на них ни смотреть — из прошлого в будущее или из будущего в прошлое. Из этого свойства и следует, что обратимые величины могут быть только четными функциями частоты.

### Логический анализ

Приведем пример анализа логической структуры доказательства. Рассмотрим теоретическое доказательство утверждения, что все тела падают с одинаковой скоростью. Его приводит Галилей в своей знаменитой книге «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых от-



раслей науки» (1638). Опровергая утверждение Аристотеля, что более тяжелые тела падают с большей скоростью, Галилей приводит следующее рассуждение. Допустим, Аристотель прав, и тяжелое тело падает быстрее. Скрепим два тела — легкое и тяжелое. Тяжелое, стремясь двигаться быстрее, будет ускорять легкое, а легкое, стремясь двигаться медленнее, будет тормозить тяжелое. Поэтому скрепленное тело должно двигаться с промежуточной скоростью. Но ведь оно тяжелее, чем каждая из его частей, и будет двигаться не с промежуточной скоростью, а со скоростью, превышающей скорость его более тяжелой части. Возникает противоречие, значит, исходное предположение неверно.

Так же можно привести к противоречию и обратное предположение, что легкие тела падают быстрее тяжелых. Можно повторить рассуждение, скрепляя два одинаковых тела. Они не ускоряют и не замедляют друг друга, должны двигаться со скоростью каждого из них; таким образом, вдвое большее тело движется с той же скоростью. Следовательно, все тела падают с одинаковой скоростью.

Теперь надо задуматься. На первый взгляд, имеется строгое логическое доказательство того, что все тела падают с одинаковой скоростью. Но, с другой стороны, этот вывод нельзя получить умозрительным путем без использования каких-то экспериментальных фактов. Каких именно?

Итак, мы пока не понимаем логической структуры доказательства, и, значит, не уверены в его убедительности.

Поскольку предположение, что тела большего веса падают с большей скоростью, логически допустимо, мы вправе использовать рассуждение Галилея, чтобы установить, каким фактам это предположение противоречит. Тогда добавление малого тела к большому должно не замедлять его, а ускорять — ведь получившееся после скрепления тело должно падать с еще большей скоростью. С другой стороны, если два тела скреплены длинной тонкой ниткой, то они будут стремиться двигаться так же, как и без скрепления, то есть, тело большего веса будет двигаться быстрее, а малое будет его тормозить. При основательном же скреплении малое

тело должно ускорять большое. Это означает, что скорость падения тела зависела бы от того, слабо или сильно скреплены его части. Из опытов по взвешиванию известно, что вес тела равен сумме весов частей, из которых тело состоит, независимо от того, как эти части скреплены. Следовательно, вес скрепленного тела не зависит от способа скрепления, а скорость падения согласно нашему предположению — зависит. Это противоречит опытам Галилея по падению тел на наклонных плоскостях, из которых следует, что скорость падения однозначно определяется составляющей силы тяжести вдоль направления движения, которая не зависит от способа скрепления частей. Поэтому от него не зависит и скорость падения. Итак, доказательство Галилея не чисто логическое построение: в нем неявно использованы известные в то время экспериментальные факты.

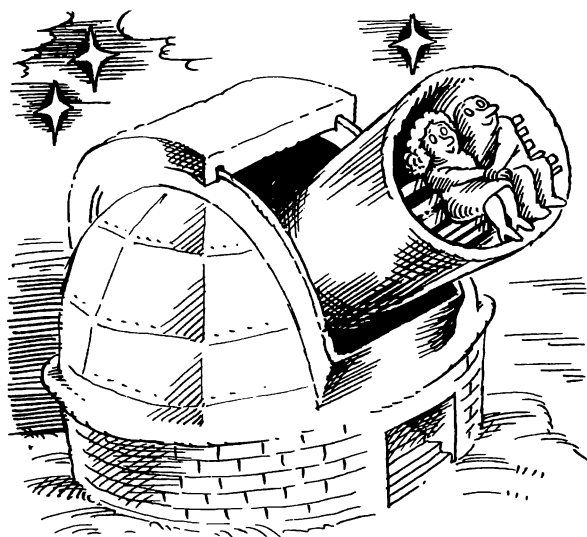
В заключение попробуем применить ко всему сказанному в этой главе идею предельного упрощения.

Движущей силой в науке должно быть не стремление совершить переворот, добиться успеха, а любознательность, способность удивляться и радоваться каждой малой удаче и, главное, видеть и чувствовать красоту науки. Необходимо воспитать в себе безупречную добросовестность, научиться доводить любой самый сложный вопрос до предельной простоты и ясности; найти выход из многих психологических противоречий; руководствоваться интуицией, но не верить ей на слово; знать все трудности, но уметь на время от них отвлекаться; верить в результат, и в то же время упорно искать его опровержение; найти свой стиль работы, но менять его по мере накопления опыта и с каждым большим открытием. Короче, все понять «до оснований, до корней, до сердцевины», как сказано у Пастернака.

Пусть эти строки послужат напутствием тем, кто решил посвятить себя науке.

# О КРАСОТЕ НАУКИ

---



**Н**еудивительно, что истинное прекрасно — истина отражает красоту и гармонию Вселенной. Но более того — красивое часто оказывается истинным. Когда у математика или физика возникает изящное построение, оно почти всегда либо решает поставленную задачу, либо будет использовано для каких-то других, будущих задач. Мы увидим это на примере одного из главных направлений современной физики — поисков симметрии пространства и внутренней симметрии элементарных частиц. Но прежде нужно понять, что такое красота в науке, и как поиски красоты приближают нас к познанию природы.

## ПОИСКИ КРАСОТЫ

Можно ли ограничиться чисто внешней красотой или за ней следует искать более глубокую, несущую некий высший смысл? В чем красота логических построений? Главные направления физики XX века — поиски симметрии и единства картины мира.

### Алгебра и гармония

Что такое красота? Часто мы называем красивым то, что соответствует нормам и идеалам нашего времени. Идеалы и моды у каждой эпохи свои. Но есть красота нетленная, непреходящая, к которой человечество

обязательно возвращается. Нас никогда не перестанут восхищать пропорции Парфенона, гармоничность и единство с природой церкви Покрова на Нерли... Я всякий раз огорчаюсь, когда слышу фразу: «На вкус и цвет товарищей нет». Как раз наоборот — удивительно, как много людей одинаково чувствуют красоту. И что примечательно: те, кто в это большинство не входит, обычно не единодушны в своих мнениях. В этом доказательство объективности прекрасного.

Можно ли ограничиться внешним восприятием красоты? Можно ли оценить красоту, измеряя линейкой соотношения размеров? За чисто внешней красотой лица мы ищем красоту духовную, благородство, напряжение мысли.

И в конкретном, и в абстрактном искусстве значительность произведения определяется тем, насколько оно выходит за рамки внешнего воздействия, насколько глубоко взаимодействуют и соотносятся части целого.

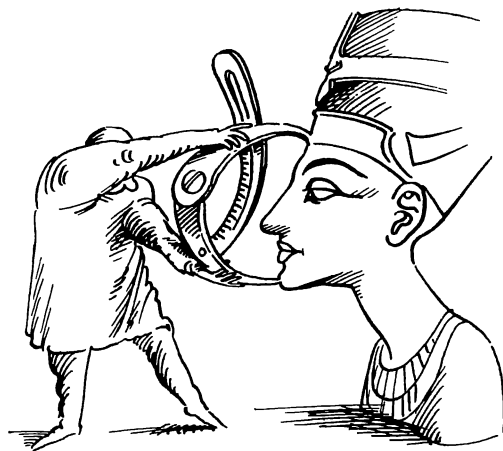
Мой друг скульптор Алексей Зеленский говорил: «Я сажусь в метро и смотрю на ноги сидящих. Потом поднимаю глаза и вижу: а голова-то от этих ног! Вот когда поймешь, почему при этой голове должны быть именно такие ноги, можно делать портрет». Валерий Брюсов писал: «Есть тонкие властительные связи меж контуром и запахом цветка». Взаимодействие частей иногда радует взор, как в «Поцелуе» Родена, картинах Рафаэля, Ватто, иногда бывает напряженным, трагическим, как в «Рабах» Микеланджело, у Эль Греко и Гойи.

Вот строки Осипа Мандельштама:

...Но чем внимательней, твердыня Notre-Dame,  
Я изучал твои чудовищные ребра,  
Тем чаще думал я: «Из тяжести недоброй  
И я когда-нибудь прекрасное создам»...

По словарю Ларусса, красивое — это то, что «радует глаз или разум».

Мы говорим о красоте музыки Моцарта, пушкинских стихов, но что можно сказать о красоте науки, мысленных построений, которых не нарисовать на бумаге, не высечь из камня, не переложить на музыку?



Красота науки, как и искусства, определяется ощущением соразмерности и взаимосвязанности частей, образующих целое, и отражает гармонию окружающего мира.

Вот что говорит Анри Пуанкаре в книге «Наука и метод»: «Если бы природа не была прекрасна, она не стоила бы того, чтобы ее знать; жизнь не стоила бы того, чтобы ее переживать. Я здесь говорю, конечно, не о той красоте, которая бросается в глаза (...), я имею в виду ту более глубокую красоту, которая открывается в гармонии частей, которая постигается только разумом. Это она создает почву, создает скелет для игры видимых красок, ласкающих наши чувства, и без этой поддержки красота мимолетных впечатлений была бы несовершенна, как все неотчетливое и преходящее. Напротив, красота интеллектуальная дает удовлетворение сама по себе».

### **Красота логических построений**

Красота, о которой говорит Пуанкаре, — это не только отражение гармонии материального мира, это и красота логических построений. Логическое — один из объектов познания, его объективность доказывается общезначимостью логических заключений. Логическая красота столь же объективна, как и красота физических законов. Мы часто ощущаем изящество теории, даже если ее предсказания не подтвердились экспериментом. Под «изяществом» понимается остроумие аргументации, установление неожиданных связей, богатство и значительность заключений при минимальном числе правдоподобных предположений... Словом, то, что отражает красоту законов разума.

Красота логических построений в самом чистом виде проявляется в математике. Так, математика изучает все возможные геометрии пространства с произвольным и даже бесконечным числом измерений. Математическая ценность и красота этих результатов не зависят от того, какая именно из геометрий осуществляется в нашем трехмерном мире.

Один из удивительных примеров математической красоты — это «алгебра высказываний», или «алгебра логики», позволяющая анализировать законы и возможности логических заключений.

Еще у Аристотеля была идея составлять сложные рассуждения, последовательно применяя более простые элементы, независимые от природы объектов, о которых идет речь. Дальнейшее развитие эта идея получила у Лейбница — он пытался придать аристотелевой логике алгебраическую форму. Но только в середине XIX века идея превратилась в законченную теорию (см.: Бурбаки Н. Очерки по истории математики).

Обычная алгебра, которую учат в школе, не единственно возможная. Если вы увидите книгу под названием «Алгебры Ли», не думайте, будто множественное число — опечатка.

Можно определить понятия сложения и умножения объектов, отказываясь при этом от аксиом обычной алгебры, например, от предположения, что результат умножения не зависит от порядка сомножителей. Получится другая алгебра. Причем анализ соотношений в ней целиком определяется принятыми аксиомами о свойствах операций и не зависит от



ее конкретного воплощения. «Действенность анализа зависит не от истолкования символов, а исключительно от законов их комбинации» — так выразил суть и силу математической абстракции Джордж Буль, автор книги «Исследование законов мысли».

Буль построил (или, как говорят математики, «исследовал структуру») алгебру на системе аксиом, которая описывает свойства высказываний. Одновременно эта же структура представляет и алгебру релейных электрических цепей, без которой невозможно построение сколько-нибудь сложной ЭВМ. Только на основе подобной математической или символической логики возможно научное обсуждение такой волнующей проблемы, как создание искусственного интеллекта.

Элементами алгебры высказываний служат простые суждения, вроде «в этой книге больше ста страниц» или «протон состоит из трех кварков». Они обозначаются буквами  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ... Два высказывания считаются равными, если истинность одного означает и истинность другого. Например, если  $A$  — «сегодня 10 мая», а  $B$  — «послезавтра 12 мая», то  $A = B$ .

Сумма  $A + B$  означает новое высказывание, которое получается соединением  $A$  и  $B$  союзом «или» в том смысле, что справедливо, по крайней мере, одно из двух высказываний,  $A$  или  $B$ . Если  $A$  — «я люблю тебя», а  $B$  — «ты любишь меня», то  $A + B$  означает либо «я люблю тебя», либо «ты любишь меня». Мы используем для этой операции знак «плюс», следуя книге И. М. Яглома «Булева структура и ее модели».

Отсюда следует одно из отличий этой алгебры от школьной: повторение высказывания не означает нового утверждения. Поэтому  $A + A = A$ .

Определим произведение  $AB$  как высказывание, которое получается соединением  $A$  с  $B$  союзом «и».  $C = AB$  в нашем примере означает: «я люблю тебя и ты любишь меня». Тогда  $A^2 = A$ . Нетрудно получить и более сложное соотношение:

$$AB + C = (A + C)(B + C).$$

Введем отрицание  $\bar{A}$ . Если  $A$  — «электрон массивнее протона», то  $\bar{A}$  — «электрон не массивнее протона». Тогда  $\bar{\bar{A}} = A$ , и  $\bar{A}A = 0$ . Под знаком 0 следует понимать заведомо неверное суждение: электрон не может быть одновременно массивнее и не массивнее протона.

Мы не будем двигаться дальше, уже этого немного достаточно, чтобы почувствовать идею исчисления высказываний. Тем, кто заинтересовался, будет полезно почитать упомянутую книгу Яглома.

Интересна судьба автора этой удивительной алгебры. Джордж Буль (1815—1864) родился в Англии в бедной семье. Он не учился ни в одном учебном заведении, окончив лишь начальные классы школы для бедных. Самостоятельно изучив латынь и древнегреческий, двенадцатилетний Буль стал печатать в местных изданиях свои переводы Горация. После долгих поисков работы, которая оставляла бы время на самообразование, он открыл маленькую школу, где был единственным преподавателем. К счастью, два влиятельных математика — Д. Грегори, издававший математический журнал, и О. де Морган, профессор Кембриджского университета, оценили оригинальность и глубину первых работ Буля. В 1849 году он стал профессором математики в колледже города Корк в Ирландии.

дии. Там он женился на Мэри Эверест, родственнице бывшего председателя геодезического комитета Индии, именем которого названа самая высокая вершина мира. Одна из их дочерей — Этель Лилиан — вышла замуж за польского революционера Войнич и прославилась как автор романа «Овод». Как переплетаются судьбы и события!

Красота логических построений в физике совсем другого рода. В математике правильность интуитивной догадки проверяется логически, в физике же, изучающей мир вещей, верховный судья — эксперимент. Необязательно каждый раз обращаться к нему для проверки теории, чаще всего теория опровергается или подтверждается при тщательном анализе ранее сделанных экспериментов или вытекающих из них соотношений. Теоретические построения в физике требуют постоянного согласования с тем, что мы уже знаем об окружающем мире. Физическая теория — не логическое следствие из принятых аксиом, а здание, построенное на правдоподобных предположениях, которые предстоит проверить. Казалось бы, здание строится на шатких основаниях, но слабые звенья постоянно заменяются более крепкими и здание делается все прочнее.

В главе «Как работают физики» будет много примеров того, как неуклонно приводит к цели метод проб и ошибок. Вы увидите, как мало было оснований для гениальной догадки де Бройля о волновых свойствах частиц: раз свет — и волна, и частица, почему бы электрону тоже не быть сразу и частицей, и волной! Или другой пример: уравнения Шрёдингера, блестяще объяснившие свойства атома еще до того, как смутные и тончайшие соображения привели к пониманию физического смысла волновой функции.

Есть особая прелесть в этих поисках в потемках, где проводник — шестое чувство!

Математик не может без негодования смотреть, «как физик суммирует бесконечные ряды, предполагая при этом, что два-три члена ряда дают хорошее приближение ко всему ряду, и вообще живет в царстве свободы, нарушая все «моральные нормы». Но вместе с тем эффективность «колдовства» физиков... оставляет математика в состоянии немого изумления». Я цитирую книгу Ю. И. Манина «Математика и физика». Очень жаль, что глубокие и остроумные замечания этой книги адресованы в основном математикам.

Результативность интуитивных методов физики объясняют слова, написанные на камине в доме Эйнштейна: «Господь Бог изощрен, но не злонамерен». Экзотические ситуации, которые математик обязан предусмотреть, создавая строгое доказательство, редко встречаются в реальном мире — бесконечности и разрывы есть результат упрощенной или неудачной формулировки. Можно ожидать, что те же величины в более совершенной теории окажутся конечными и непрерывными при вещественных значениях переменных. И тогда возмущенный математик строгим путем получит часть уже известных физикам соотношений.

Красота теории имеет в физике почти определяющее значение, делает недостоверные рассуждения достаточно убедительными, чтобы поста-

вить эксперимент для проверки предположений. В следующей главе у нас еще будет повод сравнить поиски истины в физике и в математике. Несмотря на разные методы и объект познания, физика не может обойтись без математического языка и математического аппарата.

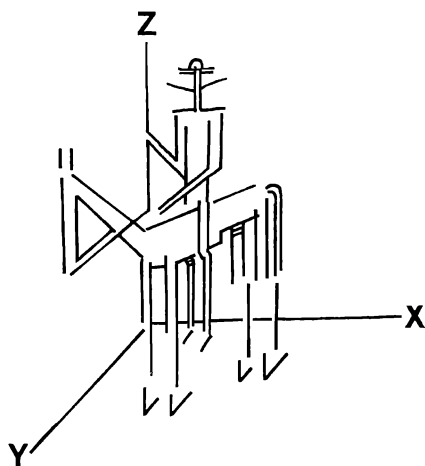
Разумеется, не все естественные науки нуждаются в математике в такой мере, как физика. В биологии основное — это процессы жизни, не сводящиеся к числовым характеристикам. Легко можно математизировать только ту сторону биологических явлений, которая определяется физико-химическими процессами. Впрочем, возможно, в скором времени возникнут новые математические структуры, которые позволят формализовать более глубокие стороны биологии и даже искусства.

### Скрытая красота

Не странно ли, что математика, исследующая мир логических отношений, позволяет проникать в тайны мира вещей? Красота физики открывается во всей полноте только с помощью математики.

Теория относительности возникла из глубочайшего пересмотра понятий времени и пространства. Математики почти не потребовалось. Но завершённую красоту теория приобретает, если воспринимать ее как следствие симметрии природы относительно поворотов в четырехмерном пространстве, где четвертая координата — время. Уравнения теории тяготения, несмотря на глубину и ясность идей, лежащих в ее основе, нельзя даже представить себе без методов описания величин в пространстве с геометрическими свойствами, которые изменяются от точки к точке.

Д. И. Менделеев обнаружил удивительную симметрию химических свойств, но подлинную красоту таблица Менделеева обрела после создания квантовой механики, когда полностью раскрылась природа этой симметрии.



Почему симметрия, объясняющая независимость энергии атома водорода от момента количества движения, видна, как показал В. А. Фок, только во вспомогательном четырехмерном пространстве после сложных преобразований?

Почему квантовая электродинамика становится особенно красивой и простой, если описывать электрон как позитрон, движущийся вспять во времени, хотя в действительности любой физический объект движется во времени только вперед? Это дало право замечательному американскому физiku Джону Уилеру высказать дикую, но красивую и ошеломляющую идею, что все электроны и позитроны мира это проекция на плоскость времени — мгновенный разрез — клубка движений вперед и назад одного-единственного электрона. Фейнман рассказывал в нобелевской речи, как ему позвонил Уилер: «Фейнман, я знаю, почему у всех электронов одинаковый заряд и масса!» — «Почему?» — «Потому что все это один и тот же электрон!»

Природа почему-то скрывает часть красоты от самого пристального взгляда физиков и позволяет увидеть ее только с помощью сложнейших математических построений. Почему математика оказывается таким точным и незаменимым инструментом, вскрывающим красоту опытных наук? Не означает ли это, что она изучает не мир логических построений сам по себе, а через него — все возможные реализации мира вещей; не нашу единственную Вселенную, не только те законы, которые ею управляют, а все возможные законы, которые могли бы реализоваться при других начальных условиях или в других вселенных?

Красота логических построений в науке — аналог одухотворенности в искусстве. Красота линий и красок в «Троице» Рублева — гениальная метафора субстанции «неделимой, неслиянной, единосущной». Напряженность и богатство духовных связей делают неприглаженную прозу Достоевского единственно возможной, а значит красивой.

Как проявляется красота в науке? Я буду говорить о своей науке — физике. Вся ее история — это поиски симметрии и единства мира, то есть, той внутренней красоты, о которой мы только что говорили.

## Симметрия

Обычно мы под этим словом понимаем либо зеркальную симметрию, когда левая половина предмета зеркально симметрична правой, либо центральную, как у древнего восточного знака «инь и ян» или у пропеллера. В таком понимании симметрия означает неизменность предмета при отражении в зеркале или при повороте вокруг центра. Но вернем слову его первоначальное значение — «соразмерность», и будем понимать под ним неизменность не только предметов, но и физических явлений, и не только при отражении, но и вообще при любой операции. Например, при переносе установки из одного места в другое или при изменении момента отсчета времени. Для проверки, скажем, зеркальной симметрии явления можно построить установку с деталями и расположением частей, зеркально симметричными относительно прежней. Если обе установки дают одинаковые результаты, явление зеркально симметрично.

Проследим сначала, как проявляется самая простая симметрия — однородность и изотропность (эквивалентность всех направлений) пространства. Она означает, что любой физический прибор — часы, телефон, телевизор — должен работать одинаково в разных точках пространства, если не изменяются окружающие физические условия. То же самое относится и к повороту прибора, если отвлечься от силы тяжести, которая выделяет на поверхности Земли вертикальное направление. Эти замечательные свойства пространства использовались в глубокой древности, когда геометрия Евклида применялась на практике. Ведь геометрия как практическая наука имеет смысл, только если свойства геометрических фигур не меняются при их повороте и одинаковы в Греции и в Египте.

Измерения показали, что геометрические теоремы, примененные к реальным физическим объектам, действительно выполняются с колоссальной точностью для тел любого размера, в каком бы месте мы их ни проверяли и как бы ни поворачивали тела. Одно из таких измерений сделал «король математиков» Карл-Фридрих Гаусс (1777—1855), проверив, не отклоняется ли геометрия нашего мира для больших размеров от евклидовой, определяя свойства треугольника, образованного вершинами трех гор. Сейчас мы знаем, что на масштабах Вселенной и вблизи тяжелых тел геометрия отличается от евклидовой. Однако эти поправки лежат далеко за пределами точности измерений Гаусса. Не только геометрические свойства, но и вообще все физические явления не зависят от перемещений и поворотов.

Итак, физические законы должны быть инвариантными относительно перемещений и поворотов. Это требование облегчает нахождение уравнений физики и придает им более красивый вид.

Еще одна важная симметрия — однородность времени. Все физические процессы протекают одинаково, когда бы ни начались — вчера, сегодня, завтра...

Если какая-нибудь машина в этом году работает не так, как в прошлом, значит, у нее износились детали, изменились климатические усло-



вия или произошло еще что-нибудь, но это никак не связано с нарушением однородности хода времени.

Ход времени определяется относительной скоростью различных процессов в природе. Скорость космического корабля можно сравнить со скоростью света или звука в воздухе. Ход часов можно определять числом периодов колебания света, излучаемого атомом за время перемещения стрелки на одно деление. Любое измерение интервала времени означает сравнение скоростей разных процессов.

Равномерность хода времени означает, что во всякое время, и сегодня, и через год, относительная скорость всех процессов в природе одинакова.

Равномерность хода времени установлена с колоссальной точностью на примере излучения атомов. Атомы звезд излучают свет с такими же длинами волн, как и земные атомы, даже если звездный свет испущен миллиард лет назад.

Законы природы не изменяются и от замены времени на обратное. Это означает, что взгляд назад по времени являет такую же картину, что и взгляд вперед. Так ли это? Каждый видел, как растекается упавшее со стола яйцо, но никому не доводилось наблюдать, как белок и желток собираются обратно в скорлупу и прыгают на стол. Как говорится в старой английской песенке, собрать его не сможет и «вся королевская конница, вся королевская рать». Тем не менее движение молекул может случайно согласоваться так, что невероятное совершится, хотя вероятность чуда неслыханно мала, ждать его пришлось бы гораздо дольше, чем существует Вселенная. В простых системах явления подобного рода происходят с большей вероятностью: молекулы в малом объеме газа под влиянием столкновений то стекаются вместе, то растекаются так, чтобы плотность в среднем везде была одинакова и равнялась плотности газа.

Глубокий анализ подобных событий привел физиков к заключению, что «обратимость» времени существует не только в механике и электродинамике, где она прямо видна из уравнений, но и во многих других явлениях природы. Расширение Вселенной хотя и означает необратимость на космологических интервалах времени (порядка миллиардов лет), но практически не влияет на обычные земные эксперименты.

Существует, кроме того, зеркальная симметрия — волчок, закрученный вправо, ведет себя точно так, как закрученный влево. Единственная разница в том, что фигуры движения правого волчка будут зеркальным отражением фигур левого. Существуют зеркально асимметричные молекулы, как правая и левая рука, но если они образуются в одинаковых условиях, число левых молекул равно числу правых.

Зеркальная симметрия законов природы — неточная, как и большинство других симметрий. В слабых взаимодействиях, ответственных за радиоактивный распад, зеркальная симметрия нарушается. Даже в явлениях, не связанных с радиоактивными превращениями, влияние слабых взаимодействий приводит к небольшому нарушению зеркальной симметрии. Так, в атомах относительная неточность зеркальной симметрии составляет порядка  $10^{-15}$ . Однако влияние этого ничтожного нарушения на переходы между очень близкими уровнями не так мало (по-

рядка  $10^{-3} - 10^{-8}$ ). В 1964 году группа физиков Московского института теоретической и экспериментальной физики обнаружила небольшое нарушение четности ядерных сил, вызванное слабыми взаимодействиями (Ю. Абов, П. Крупчицкий, Ю. Оратовский, И. Шапиро). В 1966 году нарушение четности было обнаружено другим методом в Ленинградском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова (В. Лобашов, В. Назаренко, Л. Саенко, Л. Смотрицкий, Г. Харкевич). В 1978 году Л. Баркову и М. Золотареву из Института ядерной физики новосибирского Академгородка удалось обнаружить это явление в атоме. Кроме того, слабые взаимодействия приводят и к небольшому нарушению временной обратимости.

Важнейшая симметрия, пронизывающая всю современную физику, была обнаружена в начале XX века. Еще Галилей нашел замечательное свойство механических движений: они не зависят от того, в какой системе координат их изучать — в равномерно движущейся или в неподвижной.

Замечательный голландский физик Хендрик Антон Лоренц в 1904 году убедился, что таким свойством обладают и электродинамические явления, причем не только для медленно движущихся тел, но и для тел, движущихся со скоростью, близкой к скорости света. При этом выяснилось, что скорость заряженных тел не может превысить скорости света.

Анри Пуанкаре в работе, оказавшей огромное влияние на теоретическую физику, показал, что результаты Лоренца означают инвариантность уравнений электродинамики относительно поворотов в пространстве-времени, то есть, в пространстве, в котором, кроме трех обычных координат, есть еще одна — временная.

Но самый важный шаг сделал Эйнштейн, обнаружив, что симметрия пространства-времени — всеобщая; что не только электродинамика, но и все явления природы — физические, химические, биологические — не изменяются при поворотах. Ему удалось это сделать после глубокого и не сразу понятого современниками пересмотра привычных представлений о пространстве и времени.

Слово «поворот» надо было бы заключить в кавычки — это не обычный поворот, при котором сохраняются расстояния между точками, например, расстояние от какой-либо точки до начала координат.

В четырехмерном пространстве, о котором мы только что говорили, по четвертой оси откладывается время  $t$ , помноженное на скорость света  $c$ , и «поворот» соответствует неизменности не расстояния до начала координат, а величины  $l^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - c^2 t_1^2$ , где  $x, y, z, x_1, y_1, z_1$  — координаты до и после поворота. Такой «поворот» обеспечивает постоянство скорости распространения света в разных системах координат.

Таким образом, все симметрии, которые мы до сих пор рассматривали, объединяются в одну всеобщую — все явления природы инвариантны относительно сдвигов, поворотов и отражения в четырехмерном пространстве-времени. Инвариантность относительно сдвигов и поворотов в обычном пространстве получается как частный случай, когда сдвиг не изменяет отсчета времени или когда вращение происходит вокруг временной оси.

Нужно пояснить, что означает инвариантность явления природы отно-

сительно поворотов. Все физические величины можно классифицировать по тому, как они изменяются при повороте. Есть величины, которые не изменяются вовсе — они называются скалярами. Другие — векторы — ведут себя как отрезок, проведенный из начала координат в какую-либо точку пространства. При повороте системы координат длина вектора не изменяется, а его проекции на оси координат изменяются по известному закону. Есть величины, изменяющиеся более сложно, например, как произведение двух векторов. Они называются тензорными.

Кроме векторных и тензорных величин, есть и другие, которые при поворотах тоже изменяются заданным образом. Я не сразу решился их назвать, боясь испугать читателя незнакомым словом — спиноры. Из спиноров можно образовать квадратичную комбинацию, которая изменяется как вектор; или другую — скалярную, не изменяющуюся при поворотах. Волновая функция электрона изменяется при поворотах как спинор, короче говоря, она есть спинор. Пока достаточно знать само слово, не раскрывая его математического смысла. Неизменность законов или уравнений означает, что во всех слагаемых уравнения и в левой, и в правой частях стоят величины, одинаково изменяющиеся при поворотах.

Так же, как бессмысленно сравнивать величины разной размерности, скажем, время и длину, массу и скорость, невозможно и равенство, в котором слева скаляр, а справа вектор.

Суть симметрии именно в этом делении величин на скаляры, векторы, тензоры, спиноры... Ясно, насколько легче отыскать уравнение, все слагаемые которого должны одинаково изменяться.

Мы увидим в следующей главе, как размерные оценки позволяют находить неожиданные физические соотношения. Классификация величин по их изменению при поворотах или при какой-либо другой операции — следующий шаг к более глубокому пониманию природы. Жаль, что школьный курс ограничивается лишь первым шагом — размерностью.

Симметриям, которые мы до сих пор рассматривали, соответствовали операции, не зависящие от пространственной точки. Во всем пространстве происходит одинаковый сдвиг или поворот. Такие симметрии называются «глобальными». Можно попытаться найти такие уравнения, так записать законы природы, чтобы они не изменялись не только при глобальных сдвигах и поворотах, но и при разных сдвигах и поворотах в разных точках. Такая симметрия называется локальной.

Именно из этого исходил Эйнштейн в поисках своих знаменитых уравнений тяготения, связавших геометрию пространства с плотностью материи. Уравнения тяготения возникают как следствие локальной симметрии пространства-времени. Эти уравнения объединили механику и тяготение; из них при малых скоростях вытекают уравнения ньютоновой механики.

Мы пока рассматривали пространственно-временные, или, короче, пространственные симметрии.

В современной физике важнейшую роль играют и так называемые «внутренние симметрии». Одна из них — калибровочная инвариантность. Не вдаваясь в сложные объяснения, скажу, что она обеспечивает, в частности, справедливость такого важного закона, как закон Кулона. Да-



же малое нарушение калибровочной инвариантности в электродинамике несовместимо с тем, что нам известно о распространении длинных радиоволн.

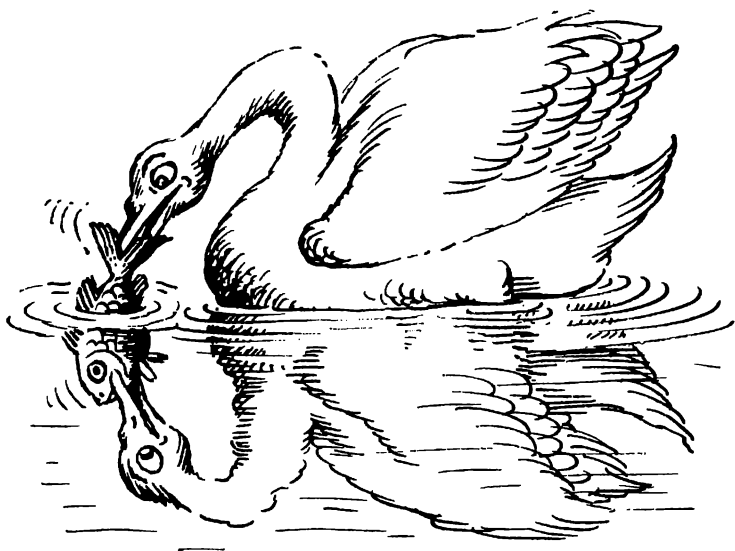
Другой пример внутренней симметрии — изотопическая инвариантность сильных взаимодействий. Она объясняет сходство целых семейств элементарных частиц, например, нейтрона и протона. Обобщение этой симметрии привело физику к открытию кварков — частиц, из которых построены все сильновзаимодействующие частицы — адроны, — такие, как нейтрон, протон, пи-мезон, прежде считавшиеся элементарными.

Дальше я расскажу подробнее об этих и других внутренних симметриях. Мы увидим, что законы сохранения — закон сохранения энергии, импульса или заряда — получаются как строгое следствие различных симметрий.

### Природа не терпит точных симметрий

Большинство симметрий возникает при некоторой идеализации задачи. Учет влияния более сложных взаимодействий приводит к нарушению симметрии. Например, независимость энергии атома водорода от орбитального момента становится неточной — симметрия слегка нарушается, если учитывать релятивистские поправки к движению электрона. Даже законы сохранения, связанные с пространственной симметрией, крайне мало, но все-таки нарушаются неоднородностью Вселенной во времени и пространстве.

Существует гораздо более важное нарушение симметрии — «спонтанное». Примеры такого нарушения встречаются на каждом шагу в обыденной жизни. Капля воды, лежащая на столе — пример нарушения симметрии, поскольку взаимодействие молекул воды между собой и с молеку-



лами стола допускает более симметричное решение, когда капля растекается тонким слоем. Но для малых капель такое решение оказывается энергетически невыгодным. Таким образом, система, обладающая высокой симметрией, может иметь менее симметричные решения. Твердые тела представляют собой кристаллические решетки, и это пример нарушения не только трансляционной симметрии (относительно сдвигов), но и симметрии относительно поворотов. Однородное хаотичное расположение атомов, как в жидкости, полнее отражало бы симметрию взаимодействия. Атомное ядро представляет собой каплю нуклонной жидкости — тоже пример нарушения трансляционной симметрии.

Существуют не только сферические, но и «деформированные» ядра, имеющие форму эллипсоида, — это нарушение и трансляционной, и вращательной симметрии.

Спонтанное нарушение симметрии весьма распространенное явление в макроскопической физике. Однако в физику высоких энергий оно пришло с большим запозданием. Не все физики, занимавшиеся теорией элементарных частиц, сразу приняли возможность асимметричных решений в симметричных системах. Что поделаешь — узкая специализация имеет свои теневые стороны!

Как сказывается это явление в физике элементарных частиц? Плодотворная тенденция теории элементарных частиц состоит в предположении, что на сверхмалых расстояниях царствует максимальная симметрия, но при переходе к большим расстояниям возникает спонтанное нарушение, которое может сильно замаскировать симметрию.

Спонтанное нарушение симметрии связано еще с одним очень важным явлением. При нарушении симметрии все-таки остаются следы бывшей ранее более высокой симметрии. Это так называемые «возбуждения Гольдстоуна», по имени обнаружившего их английского физика. Когда атомы собираются в кусок твердого тела, возникает нарушение трансляционной симметрии. Но при этом остается свобода перемещения в пространстве центра тяжести всего куска в целом. Когда происходит упругое колебание с большой длиной волны, каждый маленький участок перемещается, как целое. Поэтому мы вправе ожидать, что при увеличении длины волны частота упругого колебания должна стремиться к нулю. Это действительно выполняется: частота длинноволнового колебания — частота звука — обратно пропорциональна длине волны. Звук в твердом и жидком теле и есть простейший пример «гольдстоуновского колебания». Вращательные состояния больших деформированных ядер тоже «гольдстоуновские колебания», на этот раз возникающие в результате нарушения вращательной симметрии, именно поэтому вращательные возбуждения ядер имеют малую частоту.

Спонтанное нарушение симметрии — хороший пример того, как разные области физики, даже далекие друг от друга, оказывают взаимное влияние. В данном случае это влияние физики твердого тела на теорию элементарных частиц. Но можно привести не меньше и обратных примеров — современные теоретические методы исследования фазовых переходов и других явлений макроскопической физики пришли в нее из физики высоких энергий.

## Объять необъятное

Другое направление развития физики — поиски единых причин для явлений разного круга, попытки объединения различных областей физической науки.

Важный шаг на этом пути сделал Ньютон. Он доказал, что падение тел на Земле, движение Луны вокруг Земли и движение звезд определяются одной причиной — притяжением с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния. И показал, что все эти явления можно количественно рассчитать с помощью сформулированных им законов механики.

Следующий, не менее грандиозный шаг сделал Джеймс Максвелл, получив удивительные уравнения, объединившие все явления электричества, магнетизма и оптики. Говоря об уравнениях Максвелла, замечательный немецкий физик, один из создателей статистической физики Людвиг Больцман повторил слова гетевского Мефистофеля: «Не Бог ли начертал эти письма?»...

В начале XX века физики знали только два типа взаимодействия — электромагнитное и гравитационное. Уже первые исследования атомных ядер показали, что нейтроны и протоны, входящие в состав ядра, удерживаются силами, которые в десятки раз больше электромагнитных. Эти частицы связаны сильными взаимодействиями. Кроме того, были обнаружены гораздо более слабые силы между электронами, нейтрино и нуклонами (нейтронами и протонами). Эти взаимодействия, ответственные за радиоактивный распад, были названы «слабыми». Они, в частности, вызывают превращение свободного нейтрона в протон, электрон и анти-нейтрино.

До недавнего времени казалось, что между четырьмя взаимодействиями — сильным, слабым, гравитационным и электромагнитным — не существует никакой связи, и физики направили свои силы на их объединение. Электромагнитное и слабое взаимодействия объединяются в «электрослабое». Они, как мы уже упоминали, оказались проявлениями более общего единого взаимодействия. В чем красота такого объединения?

Возникли неожиданные связи между разнородными явлениями. Так, постоянная, определявшая величину слабого взаимодействия, оказалась связанной с зарядом электрона. Теория объяснила многие явления, казавшиеся раньше загадочными.

Еще далека от завершения, но, можно надеяться, идет по верному пути теория Великого объединения, которая даст единое объяснение электромагнитным, слабым и сильным взаимодействиям. Согласно предсказаниям этой теории, протон не стабильная частица, время его распада на позитрон и нейтральный пион или на нейтрино и положительный пион составляет примерно  $10^{30}$  —  $10^{33}$  лет. Поставлен ряд опытов по проверке этого предсказания. Если распад обнаружится, то, по крайней мере, подтвердится идея Великого объединения.

Теоретики уже пытаются создать теорию Суперобъединения, которое охватило бы все четыре взаимодействия — сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.

У Пастернака есть строки: «В родстве со всем, что есть, уверяясь и знаясь с будущим в быту, нельзя не впасть к концу, как в ересь, в неслыханную простоту»... К сожалению, попытки объединения пока слишком сложны, пройдет немало времени, прежде чем откроется «неслыханная простота». Картина только начинает возникать. Она еще недостаточно красива и значит, далека от истины. Тем не менее уже ясно, что мы на пути к более глубокому пониманию величественной красоты, скрытой во Вселенной.

## **СИММЕТРИЧНО ЛИ ПРОСТРАНСТВО?**

Поиски симметрии законов природы показывают, как извилист путь к научно доказанной истине, как иногда приходится отказываться от незыблемых, казалось бы, утверждений, как внезапно возникают неожиданные связи между совершенно разнородными явлениями. Вопросы, о которых сейчас пойдет речь, касаются самых глубоких свойств Вселенной — связи законов природы со свойствами пространства и времени. Эти вопросы определяют характер нашего понимания мира.

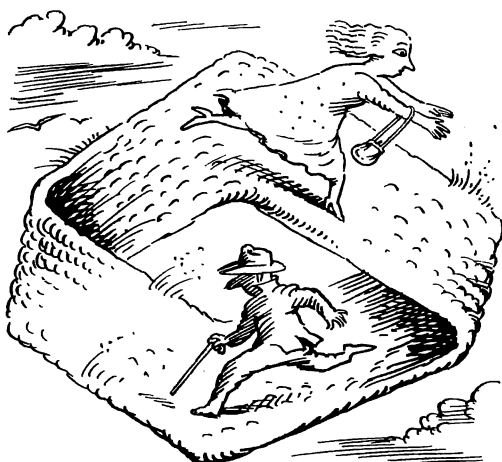
### **Законы сохранения вытекают из симметрии пространства и времени**

Существует поразительная и в то же время естественная связь между свойствами пространства и времени и так называемыми «законами сохранения», такими как закон сохранения энергии или закон сохранения количества движения. Эту замечательную связь сформулировала немецкий математик Эмми Нетер (1882—1935).

Каждому виду симметрии соответствует свой закон сохранения. Так, закон сохранения энергии — следствие симметрии природы относительно сдвигов во времени. Симметрия относительно сдвигов в пространстве приводит к закону сохранения количества движения или импульса. Мы часто пользуемся этим законом, на нем основано ракетное движение. Поскольку полное количество движения должно сохраняться, то импульс самой ракеты (произведение ее массы на скорость) увеличивается на величину импульса, уносимого вылетающими газами.

Симметрия относительно поворотов приводит к сохранению момента количества движения, или углового момента частицы. Для частицы, движущейся по окружности, момент есть произведение расстояния от частицы до центра вращения на массу и скорость частицы. Для неточечных тел нужно сложить моменты отдельных, достаточно малых частей тела. Законом сохранения момента широко пользуются балерины: приближая руки к телу, они уменьшают расстояние до оси вращения и в силу сохранения момента увеличивают скорость вращения. Надеюсь, балеринам будет приятно узнать, что их пируэты получаются благодаря симметрии пространства относительно поворотов.

Попробую пояснить, каким образом неравномерность хода времени приводит к несохранению энергии. Допустим, что неравномерность хода времени проявилась в том, что, начиная с некоторого момента, стала пе-



риодически изменяться постоянная всемирного тяготения. Тогда легко построить машину, которая будет получать энергию из ничего — «вечный двигатель». Для этого нужно поднимать грузы в период слабого тяготения, и превращать приобретенную ими энергию в кинетическую, сбрасывая в период увеличения тяготения. Как видите, неравномерность хода времени, то есть, изменение относительного ритма разных процессов, приводит к нарушению закона сохранения энергии.

Теперь не покажется странным, что законы сохранения энергии и других величин выполняются во всех явлениях природы — они вытекают из такого общего свойства нашего мира, как симметрия пространства и времени.

Из сказанного следует, что однородность хода времени можно проверить по тому, насколько точно выполняется закон сохранения энергии. Если у нас возникает ощущение, что в юности время шло медленнее, свет горел ярче, краски были свежее, мысли острее, его следует объяснять изменениями, происходящими внутри нас, а не изменением хода времени — время течет равномерно. И, как ни удивительно, для доказательства достаточно убедиться, что в бездушных машинах энергия с большой точностью сохраняется. И, наоборот, из одного того факта, что атомы во все времена испускают свет одной и той же частоты с колоссальной точностью, можно заключить, что с такой же точностью выполняется закон сохранения энергии.

### Почему сердце слева?

Зеркальная симметрия законов природы означает: если две экспериментальные установки отличаются только тем, что одна есть зеркальное отражение другой, то они работают совершенно одинаково.

Но разве не нарушается это требование в повседневной жизни? Примеров нарушения зеркальной симметрии в природе немало. У людей сердце расположено с левой стороны, а для соблюдения зеркальной симмет-

рии в процессе эволюции должно было получиться равное количество лево- и правосердечных. Рассмотрим объект менее сложный, чем человек. Существуют, например, два типа кварца, которые по своему молекулярному строению зеркально подобны, как правая и левая руки. Эти два типа кварца встречаются на Земле в разных количествах. То же относится и к другим минералам. Поэтому асимметрию живых объектов можно объяснить тем, что пища или «строительный материал», встречающийся в природе, не имеет зеркальной симметрии. Тогда вопрос сводится к более простому — к нарушению зеркальной симметрии в неживой природе.

В связи с этим следует вспомнить об одном удивительном опыте Луи Пастера.

Было известно, что поляризованный свет, проходя через виннокаменную кислоту, встречающуюся в природе, изменяет направление поляризации — направление электрического поля в световой волне. Поляризованный свет — свет с фиксированным направлением поляризации — получается после прохождения обычного света через поляризатор: устройство, пропускающее свет только с определенным направлением поляризации. На этом основано действие поляроидных очков. Их линзы пропускают свет только с вертикальным направлением поляризации. Между тем свет, отраженный от луж или от мокрого асфальта, имеет преимущественно горизонтальное направление. Поэтому поляроидные очки уменьшают слепящее действие отраженного света. В этом легко убедиться, поворачивая их вокруг горизонтальной оси.

После того, как свойства естественной виннокаменной кислоты были хорошо изучены, химики получили искусственную. По всем физическим и химическим свойствам она не отличалась от натуральной. Когда через синтезированную кислоту пропустили поляризованный свет, к невероятному изумлению ученых обнаружилось, что направление поляризации не изменилось!

Пастер предположил, что искусственная кислота представляет собой смесь двух зеркально симметричных форм, как правая и левая рука. Один тип кислоты поворачивает направление поляризации направо, другой — налево. В результате поляризация не меняется.

Для доказательства этой гипотезы Пастер вырастил в искусственной кислоте колонию микробов, рассудив, что микробы, приученные к поглощению естественной кислоты, не станут использовать ее зеркальную форму. Алиса, героиня сказок Льюиса Кэрролла, современника Пастера, отправляясь в Зазеркалье, тоже размышляла, сможет ли ее кошка пить зеркальное молоко, не повредит ли оно ей...

Что же обнаружилось? Когда микробы стали размножаться в искусственной кислоте, направление поляризации проходящего света поворачивалось все больше и больше. Естественная кислота поворачивала плоскость поляризации направо, а синтезированная после размножения микробов, питавшихся естественной, стала поворачивать налево! Можно представить, как радовался и волновался Пастер, когда его догадка подтвердилась таким неожиданным способом. Пожалуй, это единственный случай в истории физики, когда открытие было сделано с помощью микробов.

Так Пастер блестяще доказал свою гипотезу и показал, что уже низшие организмы имеют приспособления, различающие две зеркальные формы. Тот факт, что при любом способе искусственного получения вещества обе зеркальные формы появляются в одинаковом количестве, лишний раз подтверждает, что процессы симметричны относительно зеркального отражения.

Зеркальная асимметрия в живой природе объясняется, по-видимому, не нарушением зеркальной симметрии, а историческими причинами. Возможно, в той части Земли, где впервые возникла жизнь, случайно оказалось больше, скажем, «правого» строительного материала, поэтому возникла одна из живых зеркальных форм, которая потом наследовалась.

Разницу в распространенности правых и левых минералов можно объяснить, предположив, что во время их образования в окружающем веществе были сильные скручивающие напряжения, или, если это была жидкость, сильные вихревые движения. Одна из возможных причин асимметрии — вращение Земли — дает пренебрежимо малое преимущество одной из зеркальных форм по сравнению с другой. Нарушение зеркальной симметрии, вызванное слабыми взаимодействиями, как мы видели, очень мало и вряд ли способно объяснить большую разницу в распространенности правых и левых минералов. Итак, до недавнего времени физики были убеждены, что все законы природы в нашем мире и в зеркальном будут одинаковы. От этого убеждения пришлось отказаться.

### **Нарушение зеркальной симметрии в слабых взаимодействиях**

Где-то в начале 1950-х годов возникли первые противоречия. Была обнаружена частица — заряженный К-мезон, — которая может распадаться либо на две, либо на три другие частицы: пи-мезоны. Анализ опытов привел физиков к заключению, что здесь нарушается зеркальная симметрия. Закон зеркальной симметрии запрещает К-мезону распадаться обоими способами.

Дело в том, что зеркальная симметрия, как и рассмотренные ранее симметрии относительно сдвигов и поворотов в пространстве-времени, приводит к закону сохранения. Сохраняется величина, которая называется «четностью». Согласно квантовой механике, поведение частицы описывается так называемой «волновой функцией». Физические величины выражаются через эту функцию квадратично. По закону зеркальной симметрии свойства частиц не должны изменяться при зеркальном отражении, но к волновой функции это не относится. Она может, например, изменить знак. Когда волновая функция не изменяет знака при зеркальном отражении, состояние называется «четным», а когда изменяет — «нечетным». Таким образом, если есть зеркальная симметрия, каждая частица имеет определенную четность. Теперь можно пояснить затруднение, возникшее с К-частицей. Пи-мезон — нечетная частица, то есть, в состоянии покоя его волновая функция изменяет знак при зеркальном отражении. Если К-мезон четный, он может распадаться только на две нечетные частицы, а если нечетный — то только на три. Мы немного

упростили рассуждение, но недалеко отошли от истины, надо было еще убедиться, что четность вылетающих частиц не изменяется от их движения.

Самый решительный удар по закону зеркальной симметрии был нанесен в 1956 году блестящим опытом по изучению  $\beta$ -распада кобальта, поставленным группой американских физиков (Цзинь-сян Ву и др.). Кобальт при низкой температуре поместили в сильное магнитное поле. При этом ядра поляризуются — их спины (о спине речь пойдет дальше) ориентируются вдоль магнитного поля. При  $\beta$ -распаде из ядер кобальта вылетают электроны и антинейтрино. Обнаружилось, что электроны вылетают преимущественно под тупыми углами к направлению магнитного поля. Между тем по закону зеркальной симметрии острые и тупые углы должны встречаться одинаково часто.

Действительно, посмотрим на отражение этой установки в зеркале. Магнитное поле изменит свое направление по отношению к отраженным предметам на обратное, как винт, который при отражении из правого превращается в левый. Ведь направление магнитного поля определяется направлением тока в катушке, создающей поле как раз по правилу винта. Потому тупые углы к направлению магнитного поля в зеркале превратятся в острые, следовательно, зеркальное изображение опыта выглядит не так, как сам опыт, в прямом противоречии с законом зеркальной симметрии.

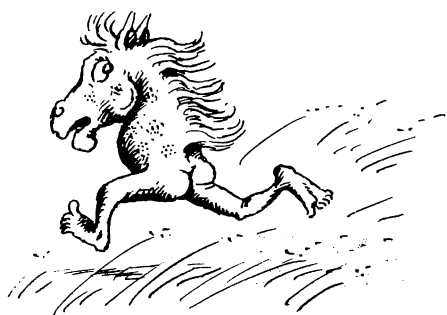
Наступил период смятения. Физики начали сомневаться и в других свойствах симметрии нашего пространства. Казалось, что выход из тупика нашли в 1957 году Л. Д. Ландау и американцы Цзун-дао Ли и Чженьнин Янг. Они предположили, что частицы (электроны, нейтрино, нуклоны), участвующие в  $\beta$ -распаде, зеркально асимметричны; симметрия восстанавливается только при переходе от частиц к античастицам. Тогда при отражении в зеркале вся картина изменится — не только тупые углы перейдут в острые, но и частицы не перейдут сами в себя. Таким образом, зеркальная симметрия пространства не нарушается, а асимметрия слабого взаимодействия определяется асимметрией участвующих частиц. Существование в нашем мире асимметричных частиц не противоречит симметрии пространства, так же, как ей не противоречит асимметрия живых объектов.

### **Зарядово-зеркальная симметрия. Антимир**

До этих опытов физики считали, что законы природы не изменяются, если все заряды заменить на обратные. Это свойство законов природы называется зарядовой симметрией.

Все уравнения физики допускают существование античастиц наряду с частицами. И такие античастицы (позитрон, антипротон, антинейтрон и т.д.) действительно были обнаружены. Ядро любого химического элемента состоит из протонов и нейтронов, точно так же можно составить ядро соответствующего антиэлемента из антипротонов и антинейтронов. Если к такому отрицательно заряженному антиядру добавить позитроны, получится антиатом, а из антиатомов можно образовать антивещество. Силы между античастица-





ми равны силам между частицами, поэтому антивещество будет обладать теми же свойствами, что и вещество.

Теперь для учета свойств слабого взаимодействия закон зарядовой симметрии пришлось уточнить: природа обладает не зарядовой, а зарядово-зеркальной симметрией. Никакие законы природы не изменяются, если все заряды в мире изменить на обратные и одновременно произвести зеркальное отражение.

Антимир отличается от нашего мира не только знаком зарядов. В нем изменяется понятие правого и левого; антимир — зеркальное отражение нашего. Если бы люди в таком мире прошли тот же путь эволюции, что и мы, сердце у них было бы справа, а левая рука лучше развита. Американский физик Ричард Фейнман говорил в своих лекциях: «Если вы встретите в космическом пространстве корабль из далеких миров, и космонавт протянет вам левую руку — берегитесь, возможно, он состоит из антивещества!»

Существуют ли в нашей Вселенной антимир, то есть, области из антивещества? Этот вопрос пока остается без окончательного ответа, хотя большинство астрофизиков полагают, что антимиров нет. Если бы они существовали, то на границах вещества и антивещества происходила бы аннигиляция электронов и позитронов, то есть, превращение электрона и позитрона в два кванта, оба из которых обладали бы энергией, равной энергии покоя электрона (0,5 МэВ). Во Вселенной должны были бы присутствовать в большом количестве кванты с энергией 0,5 МэВ. Между тем таких квантов нет.

Итак, Ландау и Ли с Янгом предположили, что законы природы обладают зарядово-зеркальной симметрией.

Но и эта симметрия оказалась неточной. В опытах по распаду того же злополучного К-мезона, который принес первые неприятности с нарушением зеркальной симметрии, было обнаружено небольшое, но с принципиальной точки зрения колоссально важное нарушение закона зарядово-зеркальной симметрии.

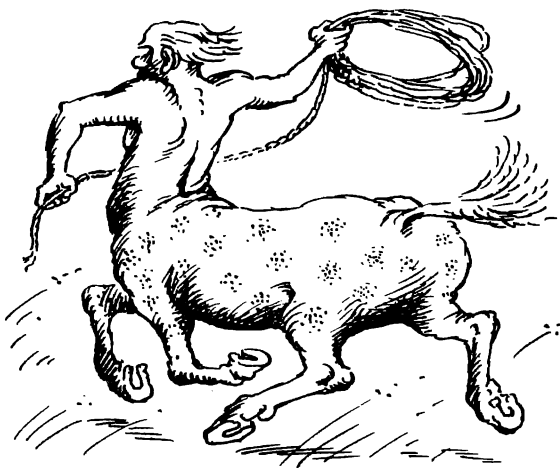
Означает ли это, что наше пространство не симметрично, или же нарушение вновь обусловлено свойствами частиц, а не пространства?

Любое важное открытие сначала нарушает красоту и порядок, но со временем приводит к еще более стройной картине. Поэтому лучше подождать с ответом на вопрос, поставленный в заглавии раздела.

## ВНУТРЕННЯЯ СИММЕТРИЯ

Нам предстоит обсудить еще один тип симметрий, так же оплодотворяющий современную физику, как и пространственные.

Существуют «внутренние симметрии», которые означают неизменность явлений не при отражении, сдвигах или поворотах в пространстве, а при



изменении некоторых внутренних свойств полей или частиц. Так, сильные взаимодействия слабо зависят от заряда участвующих частиц, это свойство позволяет установить «изотопическую симметрию сильных взаимодействий» — пример внутренней симметрии.

Каждая внутренняя симметрия, так же, как и пространственная, приводит к своему закону сохранения, и наоборот, когда какая-нибудь величина сохраняется во многих явлениях, это, как правило, означает, что существует симметрия, обеспечивающая сохранение. Например, электрический заряд сохраняется во всех известных явлениях природы. Симметрия, которая соответствует этому закону сохранения, называется калибровочной инвариантностью. Она пронизывает не только электродинамику, но и всю современную теоретическую физику. Поэтому о ней следует поговорить подробнее.

### **Калибровочная инвариантность**

Электромагнитные поля, взаимодействующие с заряженными частицами, удобно описывать с помощью так называемых «векторных потенциалов». Между тем силы, действующие на заряженные тела, определяются не непосредственно векторным потенциалом, а напряженностями электрического и магнитного полей. Эти поля выражаются через разности значений векторного потенциала в соседних точках (градиенты векторного потенциала). Можно изменять векторный потенциал, не изменяя при этом напряженности полей. Калибровочная инвариантность, или калибровочная симметрия, означает, что никакие электродинамические явления не изменяются при тех изменениях векторного потенциала, которые сохраняют значения электрического и магнитного полей в каждой точке пространства-времени. Следствия этого свойства электродинамики выполняются на опыте с большой точностью. Какие же изменения векторного потенциала допустимы? Самое простое — добавление к векторному потенциалу постоянного слагаемого, не зависящего от координат. От этого разности значений векторного по-

тенциала не изменятся и, значит, напряженности будут прежними. Но, оказывается, векторный потенциал допускает гораздо больший произвол — к нему можно добавить определенным образом подобранную функцию от координат и времени без изменения электрических и магнитных полей.

Калибровочная инвариантность должна выполняться в каждой точке пространства — это локальная симметрия.

Калибровочная инвариантность обеспечивает сохранение электрического заряда не только во всем пространстве, но и в каждой точке. Заряды могут только перетекать, но не могут исчезнуть в одной области пространства и появиться в другой без возникновения переносящего их электрического тока.

Хорошо проверенный на опыте закон Кулона тоже есть следствие калибровочной инвариантности. Даже малое нарушение этого требования изменило бы закон распространения длинных радиоволн, чего не случается в нашем повседневном опыте.

Требование калибровочной симметрии было определяющим при создании квантовой электродинамики, в которой законы квантовой механики применяются не только к частицам, но и к самому электромагнитному полю.

Понимание калибровочной инвариантности особенно обогатилось после создания квантовой механики. Волновые функции заряженных частиц изменяются при калибровочном изменении векторного потенциала таким образом, чтобы оставались неизменными уравнения движения всей системы — полей и взаимодействующих с ними частиц. Такая обобщенная калибровочная инвариантность приводит к громадному количеству наблюдаемых следствий.

### **Неотличимость одинаковых частиц**

Не менее важная симметрия возникает как следствие принципиальной неотличимости одинаковых частиц. Никакие физические явления не должны изменяться при перестановке двух одинаковых частиц, например, двух электронов или двух нейтронов. Это требование называется «перестановочной симметрией тождественных объектов».

Чтобы не перепутать одинаковые палки, два туриста выкрасили их в разные цвета, и тут же поняли, что достаточно было покрасить одну. Если немного подумать, станет ясно, что в том вообще не было необходимости — два абсолютно одинаковых предмета нельзя перепутать. Марк Твен, рассказывая о своем брате-близнеце, якобы утонувшем в корыте, замечает: «Никто так и не узнал, кто из нас утонул, я или мой брат». Если они действительно одинаковы, нет способа установить замену. А все, что невозможно проверить, находится за пределами науки, как уже не раз говорилось.

Напомним: в квантовой механике состояние системы описывается волновой функцией, через которую физические величины выражаются квадратично. Поэтому есть две возможности, не нарушающие перестановочную симметрию. Первая — при перестановке частиц волновая функция не изменяется; вторая — волновая функция при такой перестановке изменяет знак.

В работе, оказавшей огромное влияние на всю последующую физику, Вольфганг Паули показал, что первая возможность осуществляется для частиц с целым спином, а вторая — для частиц с полуцелым спином.

Теперь поясним, что такое спин частицы.

Элементарные частицы можно представить себе как маленькие вращающиеся волчки. Они характеризуются своим моментом количества движения. Как мы увидим в следующей главе, согласно квантовой механике, угловой момент системы может принимать не любые значения, а изменяется скачками величины  $\hbar$  ( $\hbar$  — та самая постоянная Планка, определяющая скачки в энергии электромагнитного поля, о которой говорилось в главе о физических парадоксах). Угловой момент естественно измерять в единицах  $\hbar$ , и такой момент называется спином. Он может принимать целые и полуцелые значения. Так, спин электрона в атоме водорода в основном состоянии равен  $1/2$ , а в возбужденных состояниях принимает значения  $1/2, 3/2, 5/2...$  Спин атома гелия в основном состоянии имеет значение 0, а в возбужденных 0, 1, 2, 3... Спин покоящихся электрона, нейтрона, протона равен  $1/2$ .

Проекции момента на какую-либо ось тоже принимают значения, отличающиеся на  $\hbar$ . Так как проекция вектора на ось, скажем,  $z$  есть его длина, помноженная на косинус угла между вектором и осью  $z$ , то и угол может принимать только дискретные значения. Таким образом, квантовый волчок может наклоняться не под любыми углами. Дискретность возможных значений момента количества движения совершенно незаметна в обычной жизни, так как  $\hbar$  очень мало ( $\hbar = 10^{-27}$  в системе CGS).

Иное дело — малые объекты: атомы и молекулы, электроны и нуклоны. Там дискретность возможных значений вектора момента и его проекции проверяется непосредственно. Так, проекция спина  $1/2$  может принимать только два значения  $1/2$  и  $-1/2$ , и здесь дискретность очень заметна. Частица со спином 1 имеет только три возможные проекции:  $+1, 0, -1$ . Число проекций возрастает с увеличением спина. У тел с макроскопическим моментом, то есть, с огромным спином, значений проекций момента так много, что дискретность невозможно заметить.

Спин проще всего найти по числу его проекций. Число проекций у частиц со спином  $I$  равно  $2I + 1$ . Кроме того, спин частицы влияет на зависимость сечения рассеяния от угла отклонения.

Таким образом, волновая функция изменяет знак при перестановке, скажем, двух электронов (спин электрона равен  $1/2$ ) и не изменяется при перестановке двух пи-мезонов (спин пи-мезона равен нулю). Теперь уже нетрудно понять принцип «запрета Паули», относящийся к частицам с полуцелым спином: если две частицы с полуцелым спином находятся в одинаковом состоянии, то их перестановка не может изменить волновую функцию. Между тем по теореме Паули волновая функция должна была бы изменить знак. Следовательно, такая волновая функция равна нулю. Но волновая функция определяет вероятность нахождения частицы в данном состоянии, и если она равна нулю, значит, такое состояние невозможно — две частицы с полуцелым спином не могут находиться в одинаковом состоянии.

## Изотопическая симметрия

Один из простых примеров внутренней симметрии — изотопическая инвариантность сильных взаимодействий — подтвердился многочисленными экспериментами и оказался очень важным для построения теории ядра. Бросается в глаза необыкновенное сходство некоторых частиц, например, нейтрона и протона, или положительного, отрицательного и нейтрального пи-мезонов. Нейтрон и протон практически отличаются только зарядом, их масса совпадает с точностью до 0,1%, и они одинаково взаимодействуют с другими частицами. Спин протона и нейтрона одинаков и равен  $1/2$ . То же самое относится и к трем пи-мезонам: у них не только близкие массы, не только одинаковый, равный нулю спин, но и одинаковое взаимодействие с нуклонами.

Подобное сходство навело на мысль, что нейтрон и протон есть как бы два состояния одной и той же частицы. Три пи-мезона тоже одна частица, способная находиться уже не в двух, а в трех изотопических состояниях.

Введем новое понятие — изотопический спин (изоспин). Пусть его свойства напоминают обычный спин, тогда изоспин 1 будет иметь три проекции, а изоспин  $1/2$  — две. У нуклона два изотопических состояния, следовательно, его изоспин равен  $1/2$ , а протон и нейтрон соответствуют двум проекциям:  $1/2$  и  $-1/2$ . У пи-мезона изотопический спин 1. Положительный, отрицательный и нейтральный пи-мезоны соответствуют трем проекциям изоспина 1. Таким образом, сильные взаимодействия обладают свойством изотопической инвариантности — они не зависят от того, в каком состоянии находятся взаимодействующие частицы.

Изотопическая симметрия неточная: частицы разных зарядов имеют хоть и близкие, но неравные массы.

## Странность

Создание мощных ускорителей и чувствительных методов обнаружения привело к открытию огромного количества новых частиц. Они рождаются при столкновениях нуклонов или обнаруживаются по их влиянию на рассеяние.

Прежде всего обнаружили «странные» частицы. Их странность в том, что они не могут рождаться поодиночке, как пи-мезоны, а возникают только парами — частица с античастицей. Чтобы объяснить это свойство, пришлось приписать частицам, кроме спина и изоспина, еще одно число — «странность». Так, лямбда-частица имеет странность  $-1$ , а антилямбда  $+1$ . У пары частица-античастица странность равна нулю. Легко понять, почему лямбды рождаются только парами. Если предположить, что странность сохраняется, и что у нуклона и пи-мезона странность равна нулю, рождение одиночной лямбды-частицы в реакциях с участием нуклонов и пи-мезонов сразу становится невозможным. В остальном лямбда очень похожа на нуклон.

Все сильновзаимодействующие частицы (адроны) обладают еще одним свойством: число барионов не изменяется при их (адронных) столкнове-

ниях, барионы могут только переходить друг в друга: точнее, не изменяется разность барионов и антибарионов. Это свойство можно сформулировать как закон сохранения барионного заряда, достаточно лишь приписать каждому бариону заряд 1, а антибариону  $-1$ . Барионный заряд пи-мезонов, которые могут рождаться в любом количестве, следует считать равным нулю.

Вскоре обнаружили и другие странные частицы. Для включения их в одно семейство с нуклоном или с пионом (в случае барионного заряда, равного нулю) понадобилось усложнение изотопической симметрии. Нужно было предположить более широкую симметрию, включающую странные частицы. Обнаружились два больших семейства сильновзаимодействующих частиц: барионы и мезоны. Барионы имеют полуцелый спин ( $1/2, 3/2, \dots$ ) и барионный заряд 1, мезоны — целый спин ( $0, 1, 2, \dots$ ) и не имеют барионного заряда. Семейство барионов разбилось на две группы с близкими свойствами. Барионы одной из них (их восемь) имеют спин  $1/2$ , в другой группе десять барионов со спином  $3/2$ . Аналогично, мезоны с нулевым спином образуют восьмерку схожих частиц.

Изобилие частиц, обнаруженных в результате успехов теоретической и экспериментальной физики, не радовало, а только озадачивало теоретиков. Начались попытки найти праматерию или прачастицы с тем, чтобы все обилие наблюдаемых частиц получалось бы из комбинаций нескольких элементарных или, говоря осторожнее, более элементарных частиц.

## История одной симметрии

Необыкновенно поучительна и драматична история работ по нахождению субчастиц, из которых состоят адроны. Из разрозненных фактов постепенно возникала все более отчетливая картина устройства адронов. Мы перечислим главные события этой драмы, за которыми стоят огромные усилия физиков всех стран, временные удачи и провалы, судьбы людей, потерявших годы в попытках найти истину на неверном пути. И вместе с тем увидим, что неудавшиеся попытки всякий раз приближали к цели и подготовили правильное решение.

### Начало истории

Пока были известны только два адрона — нуклон и пи-мезон, существовала надежда, что элементарными частицами являются нейтрон и протон, а пи-мезон есть связанное состояние нуклона и антинуклона. Так, отрицательный пи-мезон строился из антипротона и нейтрона с противоположными спинами. Эту идею не удалось превратить в убедительную количественную теорию, и к лучшему, так как сразу после открытия лямбда-частицы стало ясно, что первичные частицы следует снабдить странностью. Тогда возникла идея, что есть не два, а три строительных элемента, которые обозначались аналогично нейтрону, протону и лямбде:  $p, \bar{p}, \lambda$ . Развитие этой идеи привело к созданию модели Окуны—Са-

каты, по именам советского теоретика Л. Б. Окуня и японского физика Сёити Сакаты. Субчастицы имели те же свойства, что их тезки — нейтрон, протон, лямбда.

Мезоны составлялись из субчастицы и ее античастицы, а барионы из двух частиц и античастицы. Таким образом, из субчастиц  $p$ ,  $p$ ,  $\lambda$  и их античастиц были составлены все известные тогда адроны и предсказано существование некоторых новых адронов, которые были открыты позднее.

Так, из трех частиц  $p$ ,  $p$ ,  $\lambda$  и трех античастиц можно составить девять мезонов со спином 0, а известны были только семь: три пи-мезона и четыре К-мезона. Два недостающих электрически нейтральных мезона  $\eta$  и  $\eta'$  были открыты через несколько лет.

Составная модель естественным образом объяснила разбиение девяти мезонов на семейство из восьми (октет) и одиночного мезона (синглет), но объяснить наблюдавшиеся семейства барионов, в частности, семейство восьми барионов со спином  $1/2$ , на основе этой модели не удавалось.

### Кварки

Многочисленные попытки получить наблюдаемые семейства барионов и мезонов из частиц с целым электрическим и барионным зарядом потерпели неудачу. Неожиданный выход из тупика нашли американские теоретики Марри Гелл-Манн и независимо Джордж Цвейг.

Они предположили, что все адроны составлены из частиц с барионным зарядом, равным  $1/3$  нуклонного, и с электрическим зарядом, равным  $2/3$  или  $-1/3$  заряда протона. Спин у этих частиц такой же, как у нуклона, равный  $1/2$ . Частицы с дробным электрическим зарядом никогда не появлялись на опыте, и физики были так прочно уверены в том, что все заряды кратны электронному или протонному, что идея частиц с дробным зарядом казалась дикой. Американский журнал «Physical Review Letters» отказался печатать статью Гелл-Манна, и ему пришлось отправить ее в Европу в «Physics Letters». Гелл-Манн назвал эти дикие частицы «кварками» — так в романе Д. Джойса «Поминки по Финнегану» кричат чайки.

Все адроны, как по мановению волшебной палочки, улеглись в те группы с одинаковыми свойствами, которые были ранее установлены экспериментально.

Барионы состоят из троек кварков, чтобы барионный заряд был равен единице. Из трех кварков можно составить две комбинации со спином  $1/2$  и  $3/2$ , поэтому и возникают два семейства барионов. Пришлось ввести три типа кварков: верхний, нижний и странный. Они обозначаются начальными буквами соответствующих английских слов up, down, strange. Кварк  $u$  имеет электрический заряд  $2/3$ ;  $d$ - и  $s$ -кварки имеют заряд  $1/3$ ; странный кварк имеет странность 1 (он входит только в странные адроны), а  $u$ - и  $d$ -кварки имеют странность 0. Кварки  $u$ ,  $d$  есть две изоспиновые проекции одной частицы с изоспином  $1/2$  (верхняя и нижняя проекции — отсюда название этих кварков). Нейтрон и протон устроены так:  $n = (udd)$ ;  $p = (duu)$ . Или, иначе, нейтрон состоит из двух  $d$ -кварков и одного  $u$ -кварка, а протон получается заменой  $\bar{u}d$ . Легко увидеть, что при

этом заряд нейтрона равен нулю, а протона 1, как и полагается. Почти так же легко составить все возможные комбинации троек из трех кварков с суммарным спином  $1/2$  и  $3/2$ . Получаются все барионы, входящие в два семейства — восьмерку и десятку. Мезоны состоят из кварка и антикварка. Так, заряженные пи-мезоны изображаются как  $\pi^+ = (ud)$ ;  $\pi^- = (d\bar{u})$ ; а нейтральные как комбинация  $(\bar{u}u)$   $(\bar{d}d)$ . Чертой обозначаются антикварки, электрический заряд которых отличается знаком от заряда соответствующего кварка. В пи-мезон странный кварк не входит; пи-мезоны, как мы уже говорили, — частицы со странностью и спином, равным нулю. У  $K^0$ -мезона странность  $-1$ .  $K^0 = (d\bar{s})$ . Это нейтральный мезон. Аналогично составляются и заряженные:  $K^+ = (us)$ ;  $K^- = (\bar{u}s)$ .

Поиграйте в эту игру вроде кубиков, постройте и другие адроны.

Однако, как мы сейчас увидим, нашего набора кубиков все еще недостаточно для полной картины.

### Кварки нужно раскрасить!

Среди барионов, составляющих десятку со спином  $3/2$ , есть дельта-резонанс (или дельта-барион), обозначаемый заглавной греческой буквой «дельта» —  $\Delta$ . Эта частица живет недолго, ее трудно увидеть в свободном состоянии. Однако она проявляется в рассеянии пи-мезонов на нуклоне. Дельта-барион представляет собой связанное состояние нуклона и пи-мезона. В процессе рассеяния пи-мезон и нуклон на время объединяются в дельта-барион. Поэтому сечение рассеяния пи-мезона на покоящемся нуклоне имеет максимум (резонанс) при энергии пи-мезона, соответствующей этому связанному состоянию.

Воспользуемся общеизвестной формулой  $E = mc^2$ : энергия равна массе, помноженной на квадрат скорости света. Разделив энергию пи-мезона в максимуме сечения на  $c^2$  и прибавив к массе нуклона, получим массу дельта-резонанса. Поскольку нуклон и пи-мезон не странные частицы, странность дельты равна нулю. А это означает, что она состоит из  $u$ - и  $d$ -кварков.

По зависимости сечения от угла отклонения рассеянных частиц было установлено, что спин дельты равен  $3/2$ . Были обнаружены четыре изотопические разновидности дельта-бариона, отличающиеся только электрическим зарядом.

Нетрудно их все построить из троек  $u$ - и  $d$ -кварков:  $(ddd) = \Delta^+$ ;  $(ddu) = \Delta^0$ ;  $(duu) = \Delta^+$ ;  $(uuu) = \Delta^{++}$ . Это дельта-барионы с зарядами  $-1, 0, 1, 2$ . Мы перебрали все возможности, следовательно, других дельта-барионов нет. Например,  $\Delta^-$  не существует. Частицу с двойным отрицательным зарядом можно построить только из антикварков:  $(\bar{u}\bar{u}\bar{u}) = \bar{\Delta}^-$ .

Обратим особое внимание на дельта плюс-плюс барион, который, как мы только что видели, состоит из тройки  $u$ -кварков (только тогда полный заряд будет  $2(3 \times 2/3) = 2$ ).

Но для того, чтобы спин дельты равнялся  $3/2$ , нужно, чтобы проекции спинов всех трех  $u$  были одинаковы и равны  $1/2$ .

Возникает противоречие с принципом Паули! Ведь согласно этому принципу частицы с полуцелым спином не могут находиться в одном



и том же состоянии. Во избежание противоречия можно было бы попытаться по-разному распределить эти три кварка в пространстве внутри дельта-бариона. Но при таком неравномерном распределении возрастает энергия, а, следовательно, и масса дельта-бариона. Вместо наблюдаемой массы (примерно полторы нуклонных) мы получили бы значительно бóльшую. Было много теоретических попыток обойти принцип Паули, но все они потерпели неудачу. Оставалось одно — предположить, что каждый кварк, помимо спина и заряда, имеет еще одну характеристику, которую условно называли «цветом». Каждый кварк может иметь один из трех цветов, скажем, красный, желтый, синий. Противоречие с принципом Паули снимается: u-кварки в дельта-барионе разноцветные, а разным частицам не запрещается находиться в одном состоянии.

Только не надо понимать цвета кварков буквально, это просто красивое условное обозначение. Можно было бы просто их пронумеровать:  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ .

### Кварки не могут жить друг без друга

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования подтвердили дробные заряды и трехцветность кварков. Кварки стали столь же достоверным объектом физики, как протон или электрон. И вместе с тем, несмотря на многие попытки, не удалось найти свободные частицы с дробным зарядом. Кварки не вылетают из адронов даже при энергичных столкновениях. Хочешь не хочешь, невылетание кварков приходится возвести в ранг закона природы. В изолированном состоянии могут находиться только «белые» частицы, адроны и лептоны (электрон, мюон, нейтрино), а цветные частицы — кварки — можно наблюдать только внутри адронов. Их нельзя удалить далеко друг от друга. При попытке раздвижения они превращаются в белые частицы. Если при столкновении, скажем, электронов с позитронами при больших энергиях (например, в ускорителе на встречных пучках) рождается пара кварк—антикварк, то она немедленно рождает другие цветные пары, и все они группируются в белые комбинации — барионы и мезоны. Чуть позже мы точнее определим понятие «белой частицы».

На первый взгляд невылетание кварков не такое уж странное свойство. Нейтрон живет в ядрах неограниченно долго, а в свободном состоянии распадается за пятнадцать минут. Конечно, это громадное время для ядерной частицы, но, например,  $\Delta$ -резонанс распадается за такое малое время, что его невозможно увидеть в свободном состоянии, а можно наблюдать только по его влиянию на пион-нуклонное рассеяние. Кварки и антикварки при раздвижении так быстро превращаются в белые частицы, что вдали друг от друга их нельзя обнаружить.

Необычность этого объекта в том, что кварки не живут друг без друга. До превращения в белые частицы кварк и антикварк скреплены друг с другом силовыми взаимодействиями, на какое бы расстояние они ни раздвигались. В электродинамике два противоположных заряда тоже притягиваются друг к другу, но сила этого притяжения убывает как квадрат расстояния. Поэтому при рождении пары электрон—позитрон эти частицы можно считать свободными, как только они хотя бы немного раздвинутся так, чтобы

потенциальная энергия стала меньше кинетической. В случае пары кварк—антикварк такой момент никогда не наступает — потенциальная энергия их взаимодействия растет с расстоянием!

Это объясняется свойствами того поля, которое скрепляет кварки: оно не убывает с расстоянием, в отличие от электрического.

Когда рождается пара кварк—антикварк, они сначала разлетаются. Кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию их притяжения, как у двух разлетающихся шаров, соединенных пружиной. Но при большой потенциальной энергии система становится неустойчивой, пружина рвется, система превращается в два летящих в разные стороны снопа белых частиц.

Были обнаружены и другие типы, или, как принято говорить, «ароматы» кварков — «очарованный» и «красивый».

Теория предсказывает еще один аромат — «высший». Этот кварк недавно обнаружен на опыте. Подобно  $u$ -,  $d$ -,  $s$ -кваркам, эти обозначаются  $c$ ,  $b$ ,  $t$  — начальными буквами соответствующих английских слов (*charm*, *beauty*, *top*).

Итак, есть кварки и антикварки шести ароматов —  $u$ ,  $d$ ,  $s$ ,  $c$ ,  $b$ ,  $t$ , — и каждый из кварков имеет три цвета. Общее число кварков  $6 \times 2 \times 3 = 36$  (вместе с антикварками).

Будем надеяться, что изобретательность природы этим исчерпывается и больше кварков не обнаружится.

### Поле, склеивающее кварки

Как ни важно знать симметрии, они не исчерпывают всех свойств физических объектов. Нужно еще знать, как взаимодействуют и движутся поля и частицы.

Соображения симметрии позволили нам найти, из каких кварков составлены адроны. Но гораздо труднее понять, что удерживает кварки внутри адронов и как они там движутся. Электрон в ядре атома водорода удерживают возле протона электрические силы. Аналогично следует предположить, что кваркам не дает разбежаться особое поле. Поле, склеивающее кварки, назвали глюонным (от английского *glue* — клей). Так же, как для электромагнитного поля, применение квантовой механики к глюонному полю приводит к скачкообразному изменению энергии. Энергия поля изменяется скачками величины  $E = \hbar\omega(\lambda)$ , где  $\hbar\omega$  — частота поля с длиной волны  $\lambda$ . Порция энергии глюонного поля называется глюоном, аналогично тому, как порция энергии электромагнитного поля называется квантом или фотоном.

Квантовая электродинамика оказалась замечательной теорией: ее предсказания выполняются с колоссальной точностью. Кроме того, она обладает калибровочной симметрией, которой подчиняются и уравнения тяготения Эйнштейна. Физики-теоретики пришли к заключению, что калибровочная симметрия — почти неотъемлемое качество физической теории. Поэтому уравнения глюонного поля следует искать по образу и подобию уравнений электродинамики. Из калибровочной симметрии следует, в частности, что глюон, как и фотон — безмассовая частица.

Но есть одно важное отличие: кварки, взаимодействуя с глюонным полем, могут изменять свой цвет, тогда как электрон не изменяется при взаимодействии с электромагнитным полем. Поэтому глюодинамика сложнее электродинамики.

Для каждого изменения цвета кварка нужно вводить свое поле: красно-синее, сине-желтое и т.д. Всего девять вариантов ( $3 \times 3$ ). В действительности, как мы увидим, нужно ввести не девять, а восемь глюонных полей. Из трех полей — красно-красного, сине-синего, желто-желтого — можно составить одну бесцветную (белую) комбинацию, которую не следует включать в число цветных полей, обеспечивающих взаимодействие кварков. Чтобы в этом разобраться, нам придется сделать усилие — ничего не поделаешь, симметрию не всегда легко увидеть.

Вспомним, что говорилось в первом разделе этой главы о классификации величин, по-разному изменяющихся при операциях симметрии, например, при поворотах в пространстве.

По аналогии с пространственной симметрией необходимо ввести трехмерное цветное пространство и классифицировать все величины по тому, как они изменяются при поворотах в этом пространстве.

Белые частицы не должны изменять свое состояние, точнее, свою волновую функцию, при цветовых поворотах — они скаляры относительно цветовых преобразований. Волновая функция, описывающая состояние кварка, не остается неизменной, она определенным образом изменяется при поворотах в цветном пространстве.

Для сохранения классификации барионов и мезонов, существовавшей до введения цвета, необходимо, чтобы из 27 цветных состояний, которые есть у трех кварков ( $3 \times 3 \times 3 = 27$ ), можно было составить одну комбинацию, не изменяющуюся при поворотах в цветном пространстве, то есть, белое состояние, соответствующее бариону; а из 9 цветных состояний системы кварк—антикварк ( $3 \times 3 = 9$ ) — одну белую конструкцию: мезон. Перебирая все ароматы кварков, входящих в состав белых частиц, мы получим те же семейства барионов и мезонов, что и до введения цвета.

Поскольку глюон может виртуально (на время) превращаться в пару кварк—антикварк, то его волновая функция преобразуется так же, как волновая функция пары, и, значит, из девяти глюонных полей можно тоже образовать одно белое поле. Симметрия требует, чтобы все восемь цветных глюонных полей одинаково взаимодействовали с кварками. Белое же глюонное поле может взаимодействовать совсем иначе — у него своя константа взаимодействия, так как оно может превращаться только в белые кварковые комбинации.

Нетрудно убедиться, что белое глюонное поле в веществе крайне мало. Действительно, если бы нейтроны и протоны, входящие в состав ядер вещества, создавали сколько-нибудь заметное белое глюонное поле, то между макроскопическими телами действовали бы дополнительные силы (для белых глюонов, как и для фотонов, справедлив закон Кулона), и белое глюонное поле просто добавлялось бы к полю тяготения. Из того, что на поверхности Земли нет никаких других сил, кроме силы тяжести, следует, что константа взаимодействия нуклонов с белым глюонным полем в  $10^{50}$  раз меньше их взаимодействия, скажем, с пионами.

Мы уже сталкивались с симметрией, напоминающей цветовую, при обсуждении классификации барионов и мезонов. Только там речь шла об изотопической симметрии, о симметрии в пространстве трех ароматов:  $u$ ,  $d$ ,  $s$ . Там мы умолчали о том, как из кварков получается, скажем, семейство из восьми мезонов. Сейчас это уже нетрудно.

Всего из кварка и антикварка можно составить девять ароматических (или изотопических) комбинаций. Из них одна — скалярная (это семейство из одного мезона), а остальные восемь преобразуются в пространстве ароматов как кварк—антикварк и образуют семейство из восьми мезонов.

Обе эти симметрии — изотопическая (включающая только три аромата  $u$ ,  $d$ ,  $s$ ) и цветовая (симметрия в пространстве трех цветов) — имеют одну и ту же математическую природу, хотя и реализуются в разных пространствах. Вспомним слова Джорджа Буля, их стоит повторить: «Действительность анализа зависит не от истолкования символов, а исключительно от законов их комбинаций». В обоих случаях действует одна симметрия, которую математики обозначают символом  $SU(3)$ . Чтобы получить представление об этой и других возможных симметриях, нужно изучить важный для физики раздел математики: теорию групп.

Но на этом теория сильных взаимодействий не заканчивается. Недостаточно найти свойства цветовых преобразований кварков и восьми глюонных полей. Главная задача — найти уравнения, которые описывают эти поля и их взаимодействия с кварками. И, наконец, не менее важно решить эти уравнения, выразить массы всех адронов и их взаимодействия через свойства пока «элементарных» частиц — глюонов и кварков. Так поступали физики, определяя свойства атомов и молекул через свойства считавшихся элементарными ядер и электронов.

### Забытый клад

Как найти уравнение для глюонных полей и для кварков, которое обобщало бы уравнение Максвелла для электромагнитного поля, взаимодействующего с электронами?

Тут придется рассказать о редком случае в науке, о котором можно сказать: «Новое — это хорошо забытое старое». Еще в 1954 году два теоретика — Чжень-нин Янг и Р. Миллс — играли в математическую игру. Они задались целью получить обобщение электродинамики на случай трех типов калибровочно-инвариантных полей, которые преобразуются друг через друга, подобно тому, как три пионных поля — положительное, отрицательное и нейтральное — преобразуются при поворотах в изотопическом пространстве. Это была игра, потому что в то время казалось, что никаких физических объектов, к которым можно было бы приложить такую теорию, нет и в помине.

Прежде всего выяснилось важное обстоятельство: такие поля можно разумно ввести, только предполагая, что они взаимодействуют между собой. Электромагнитное поле в отсутствие зарядов само с собой не взаимодействует, уравнения Максвелла без зарядов — линейные. Уравнения же Янга—Миллса оказались обязательно нелинейными. Они однозначно

определились из требования калибровочной инвариантности и симметрии в изотопическом пространстве. У Янга и Миллса три поля имели заряды  $+$ ,  $-$ ,  $0$ . Они могли изменять свой заряд, взаимодействуя с нуклонами (переводя протон в нейтрон и обратно). И, что примечательно, поля взаимодействуют с нуклоном с тем же зарядом, что и между собой.

Как только выяснилась многоцветность кварков и глюонов, возникла идея описать соответствующие поля с помощью уравнений, аналогичных уравнениям Янга—Миллса. Нужно было только обобщить эти уравнения на случай не трех, а восьми полей, преобразующихся в цветовом пространстве, и приписать кварку, кроме электрического заряда, особый цветовой заряд, определяющий его взаимодействие с глюонным полем, подобно тому, как заряд электрона определяет его взаимодействие с электромагнитным полем.

Так у теоретиков появился математический аппарат, который позволил предсказывать новые явления.

Это великолепный пример того, как красивое построение обязательно находит применение. Все дальнейшее развитие физики элементарных частиц подтвердило ожидания теоретиков. Обобщенные уравнения Янга—Миллса вместе с уравнениями для кварковых полей действительно описывают сильные взаимодействия элементарных частиц. По аналогии с электродинамикой эту теорию называли хромодинамикой (от греческого  $\chi\rho o m\acute{o}\varsigma$  — цвет). Пока не удастся решить эти уравнения для всех случаев. В отличие от электродинамики, взаимодействие глюонных полей и кварков на больших расстояниях не мало, а это всегда крайне затрудняет решение.

Уравнения Янга—Миллса имеют много удивительных особенностей, и об одной из них обязательно надо упомянуть. Истинное взаимодействие глюонов и кварков крайне мало. Однако каждый кварк притягивает к себе глюонное поле и поэтому окружен глюонным облаком, которое увеличивает его взаимодействие с другим кварком или с глюонным полем. Такой эффективный заряд совпадает с истинным (как иногда говорят, «голым» или «затравочным»), когда расстояния между кварками или глюонными сгустками очень малы. По мере увеличения расстояния заряд растет, сперва медленно, потом, на расстояниях порядка размеров адронов ( $10^{-14}$  см) резко возрастает. При больших энергиях, когда частицы сближаются на малые расстояния, заряд уменьшается, и взаимодействие между кварками убывает. Это явление называется асимптотической свободой. Но при малом взаимодействии хромодинамика не сложнее электродинамики. Поэтому решения уравнений хромодинамики хорошо исследованы при больших энергиях.

Удивительное явление уменьшения заряда с ростом энергии подтвердилось экспериментально в количественном согласии с теорией. Объяснилось много интересных явлений в области больших энергий, например, множественное рождение частиц при столкновении электрона с позитроном.

Но как раз в той области масштабов и энергий, который определяет структуру адронов, а, следовательно, и их массы, заряд велик, и решение пока не удается найти аналитически.

Необходимо также объяснить, почему на опыте в свободном состоянии наблюдаются только белые частицы. Мы уже упоминали без доказательства, что глюонное поле кварка и вообще любого цветного объекта не убывает с расстоянием. В отличие от электрического поля вокруг точечного электрического заряда, силовые линии глюонного поля не распределяются равномерно по всем направлениям, а сосредоточены в узкой трубке, соединяющей кварк и антикварк, или, для изолированного кварка, идущей в бесконечность. Но если так, то энергия цветного объекта будет бесконечно большой за счет энергии глюонного поля в трубке, идущей от цветного заряда к бесконечности. Тогда легко понять, почему кварки не могут жить друг без друга и почему в изолированном состоянии есть только белые объекты. У белых частиц нет растущего глюонного поля, они глюонно нейтральны.

К сожалению, это очень правдоподобное свойство глюонного поля пока не удалось убедительно доказать.

Когда на помощь физикам пришла современная электронно-вычислительная техника, возникла возможность численно решать уравнения хромодинамики, пока, правда, довольно грубо. Результаты убеждают в правильности хромодинамики не только для больших, но и для малых энергий. Массы и взаимодействия адронов получились близкими к экспериментальным.

Так полузабытые уравнения Янга—Миллса получили новую жизнь и сделались основой одного из важнейших разделов теории элементарных частиц — теории сильных взаимодействий.

# КАК РАБОТАЮТ ФИЗИКИ

---



**В** этой главе мы посмотрим — уже не с высоты птичьего полета, а с более близкого расстояния, — как работают физики-теоретики. Естественно, я ограничиваюсь теоретической физикой: это моя профессия, говорить о ней мне легче и интереснее.

Особенности работы теоретиков прекрасно видны на примере развития квантовой теории от ее зарождения, когда был совершенно неясен смысл сделанных предположений, до глубокого понимания, возникшего в спорах Нильса Бора с Эйнштейном. От общего анализа мы перейдем к более конкретному, покажем, как работают физики на первой стадии, делая оценки величин и их соотношений, прежде чем пытаться точно решить задачу. Потом посмотрим, как такой качественный анализ прилагается к задачам квантовой механики и к проблеме квантования полей.

Но сначала поговорим о задачах и особенностях физики и о ее связи с математикой.

## ЗАДАЧИ ФИЗИКИ

Есть две близкие и вместе с тем разные области — экспериментальная и теоретическая физика. У них общая цель — познание мира вещей, — разные методы, но они немыслимы друг без друга.

Физик формулирует свои законы, пользуясь математическими понятиями и математическим аппаратом, но задачи и методы в математике и в физике резко отличаются.

Наметим — разумеется, только в самых общих чертах, — главные направления и важнейшие задачи физики.

### Экспериментаторы и теоретики

Существуют два типа физиков — экспериментаторы и теоретики, причем две эти профессии почти никогда не совмещаются в одном лице. Физики-экспериментаторы исследуют соотношения между физическими величинами, или, выражаясь более торжественно, открывают законы природы, пользуясь экспериментальными установками, то есть, производя измерения физических величин с помощью приборов. Надо глубоко понять связи между изучаемыми величинами, чтобы знать, как и что измерять. Физики-теоретики изучают природу, пользуясь только бумагой и карандашом, выводят новые соотношения между наблюдаемыми величинами, опираясь на найденные ранее экспериментально и теоретически законы природы. Причина разделения этих двух профессий не только в том, что каждая требует специальных знаний: в одном случае — знания методов измерения, в другом — владения математическим аппаратом. Главная причина в том, что эти профессии требуют разных типов мышления и форм интуиции. Интуиция, то есть, способность подсознательно находить правильный путь, играет важнейшую роль, особенно на первых стадиях работы. Поскольку теоретическая физика имеет дело с более отвлеченными понятиями, чем экспериментальная, физику-теоретика требуется более абстрактная интуиция, близкая иногда интуиции математика.

В XIX веке, когда физика не была еще так специализирована, многие физики совмещали обе профессии. Максвелл, получивший удивительные уравнения, объединившие электричество, магнетизм и оптику, занимался и экспериментами. Генрих Герц, экспериментально обнаруживший электромагнитные волны, одновременно был хорошим теоретиком. Но все-таки в каждом случае можно сказать, какая профессия главная: для Максвелла теоретическая физика, а для Герца экспериментальная.

В XX веке одним из самых замечательных физиков-экспериментаторов был Эрнест Резерфорд. Изучая рассеяние альфа-частиц на атомах, он установил существование положительно заряженного ядра с радиусом в десять тысяч раз меньше радиуса атомной оболочки. Великий теоретик Альберт Эйнштейн, пользуясь только бумагой и карандашом, создал теорию относительности, согласно которой время течет по-разному в неподвижной системе и в системе, равномерно движущейся относительно наблюдателя. Со временем эксперименты показали, что быстродвижущиеся нестабильные частицы, например, мюон или пи-мезон, распадаются медленнее, чем неподвижные, в точном соответствии с предсказаниями теории относительности. При скорости, приближающейся к скорости света, время жизни частицы неограниченно возрастает.

Замечательный итальянский физик Энрико Ферми создал наряду со многими другими теоретическими работами теорию радиоактивного распада, и вместе с физиками своей группы экспериментально открыл, что почти все элементы становятся радиоактивными при бомбардировке ней-



тронами. Но и в этом случае можно сказать, что главная его профессия — теоретическая физика.

Прекрасным теоретиком, тесно связанным с экспериментом, был Г. И. Будкер, совмещавший теоретическую физику с замечательными инженерными идеями. Он теоретически разработал ускоритель заряженных частиц на встречных пучках и руководил его созданием в новосибирском Академгородке. В ускорителе на встречных пучках вся энергия идет на рождение новых частиц, тогда как при столкновении энергичной частицы с неподвижной мишенью на рождение идет только малая доля.

Приведенные исключения подтверждают правило, и молодые люди, интересующиеся физикой, должны решить для себя, какую из двух профессий они выбирают.

### **Физика и математика**

Задача физика-теоретика — получать соотношения между наблюдаемыми величинами с помощью математических выкладок. Не означает ли это, что теоретическая физика представляет собой нечто вроде прикладной математики? Нет: и по характеру задач, и по методам подхода к задачам математика и физика категорически отличаются друг от друга.

В математике важнейшую роль играет логическая строгость, безупречность выводов вместе с исследованием всех логически возможных соотношений, вытекающих из принятых аксиом. Задача физики — воссоздать по возможности точную картину мира без строгих правил игры, используя известные экспериментальные и теоретические факты, основанные на интуиции догадки, которые в дальнейшем будут проверены на опыте. Если математик исследует все логически возможные типы геометрий, то физик выясняет, какие геометрические соотношения осуществляются в нашем мире.

Даже занимаясь прикладными задачами, пришедшими не из математики, математик берется за решение только тех проблем, которые не требуют дополнительных недоказанных предположений. Физик, как правило, имеет дело с задачами, для решения которых недостаточно имеющихся исходных данных. Его искусство состоит в том, чтобы угадать, какие недостающие соотношения реализуются в природе. Для этого требуется не математическая, а именно физическая интуиция.

Убедительность в физике достигается получением одного и того же результата из разных исходных предпосылок, для чего приходится вводить лишние, логически необязательные «аксиомы», каждая из которых сама по себе не абсолютно достоверна. Единственное условие — уметь оценивать степень убедительности того или иного предположения и ясно понимать, какие из них требуют дальнейшей проверки.

Разумеется, очень полезно анализировать структуру физической теории, то есть, выяснять, из каких исходных предпосылок получаются те или иные результаты. Однако главное в таком аксиоматическом подходе не общность и математическая строгость выводов, а правильный выбор исходных предположений и оценка того, какие из них наиболее достоверно подтверждены опытом, а для этого требуется интуиция физика.



Когда такую работу проделывает математик, он обязательно, хотя бы на время, превращается в физика-теоретика.

Итак, математика и физика — науки с разными задачами и с разными методами подхода к задачам.

В математике достоверность результатов достигается за счет логической строгости и исчерпывающего анализа логически возможных решений. В физике рассматриваются только те решения, которые могут осуществиться в природе, а достоверность достигается многократной проверкой сделанных предположений. Математическая строгость в физике представляет собой невозможную и ненужную роскошь. Добиваться ее так же нелепо, как требовать от бригадиров лесоповала, чтобы они на работе говорили стихами. Но вместе с тем физик-теоретик должен свободно владеть математическим аппаратом, знать и уметь использовать все математические методы, которые могут оказаться полезными при решении физических задач.

### Пути развития

Когда какая-то область физики достигает стадии развития, на которой все ее результаты можно вывести из нескольких аксиом, строго установленных экспериментально, она перестает быть частью развивающейся физической науки и переходит в раздел прикладной математики или техники. Так произошло с электродинамикой, с классической и релятивистской механикой.

Перечислим главные направления, по которым идет развитие теоретической физики.

Это прежде всего получение количественных соотношений между наблюдаемыми величинами. Так, пользуясь законами движения электронов в металле, теоретики рассчитали кривую зависимости электрического сопротивления от температуры и объяснили природу сверхпроводимости.

Еще одно направление — обсуждение и теоретический расчет физических экспериментов. Работающие в этом направлении теоретики обычно не только рассчитывают, но и предлагают эксперименты, которые особенно важны для развития теории. В связи с увеличением стоимости опытов это направление становится все важнее.

Прикладная физика занимается проблемами, которые в обозримом будущем могут привести к практическим применениям. Например, одна из важнейших задач — проблема создания высокотемпературной сверхпроводимости или получение управляемой термоядерной реакции.

Следующий путь — создание адекватных методов математического описания законов природы. Сюда входят использование и развитие тех методов математики, которые позволяют выявить свойства симметрии законов природы. Количественное завершение идей общей теории относительности (теории тяготения) стало возможным только в результате применения методов описания геометрических свойств, изменяющихся от точки к точке. Для многих задач теоретической физики наиболее подходящий способ — решение с помощью ЭВМ.

И, наконец, самое главное в экспериментальной и теоретической физике — поиски общих принципов, лежащих в основе законов природы, таких, как причинность, законы сохранения, свойства симметрии мира...

Итак, задача физики — наметать пути к пониманию единства, симметрии и динамики явлений, пути к пониманию красоты Вселенной, к использованию законов природы на благо человечества.

## КАК СОЗДАВАЛАСЬ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ

Яркое представление о работе физиков дает история зарождения и развития квантовой теории. Мы увидим в действии множество методических особенностей научной работы, о которых говорилось в главе о психологии научного творчества. Но, может быть, самое интересное, что все важнейшие результаты теории возникали до того, как становился ясен физический смысл сделанных предположений! Понимание возникало постепенно, по мере продвижения вперед.

Из наших кратких рассуждений, возможно, уже стало ясно, что частная теория относительности и теория тяготения создавались совсем иначе. Там глубокие и ясные физические идеи предшествовали законченной теории. Может быть, это был последний взлет классической науки XIX века.

Для XX века характерно именно движение вперед без прочных оснований, через смутные догадки, которые постепенно уточняются и заменяются другими, словом, метод проб и ошибок, который мы уже прослеживали на примере открытия кварков. В рассказах о важных открытиях обычно не говорят о неправильных догадках, или упоминают вскользь, поэтому история науки представляется сплошной чередой оправдавшихся озарений. Разумеется, это не так. Было много блужданий в потемках, путь часто уводил в сторону... После обнаружения кажущегося несохранения энергии при  $\beta$ -распаде, прежде чем стало ясно, что часть энергии уносит нейтрино, некоторые физики предполагали, что закон сохранения энергии нарушается в отдельных актах и выполняется только в среднем.

Конечно, анализ удач дает больше, чем исследование ошибок. Мы не будем сейчас заниматься историей физики, а лишь попытаемся почувствовать ход идей, поэтому ограничимся удачами.

### Начало квантовой эры

В наследство от XIX века нам среди прочих достались два великих парадокса: противоречия эфира и «катастрофа Рэлея—Джинса». Первый устранила теория относительности, а второй привел к зарождению квантовой теории.

Мы уже обсуждали значение парадоксов для науки, и упоминали, что в 1900 году Макс Планк задался целью понять причины странного распределения по частотам интенсивности электромагнитного излучения, которое находится в тепловом равновесии в ящике с нагретыми стенками («черное» излучение). Нужно было объяснить эмпирический закон Вина — интенсивность излучения при большой частоте света экспоненциально падает с увеличением частоты, — между тем, как по классической статистике плотности энергии должна расти с частотой.

Планк обнаружил единственную возможность объяснить парадокс — предположить, что частицы, излучающие волны с частотой  $\omega$ , могут изменять свою энергию только дискретными порциями  $\Delta E = \hbar\omega$ . Коэффициент пропорциональности  $\hbar$  вошел в науку как постоянная Планка — мы уже не раз о ней говорили.

Предположим, что стенки ящика содержат набор излучателей всевозможных частот. Как будут возбуждены излучатели в тепловом поле? Излучатели малой частоты будут вести себя, как полагается по правилам классической статистической физики, для них скачкообразность энергии несущественна. Все они приобретут энергию, соответствующую температуре стенок. Но излучатели, имеющие большую частоту, для которых  $\hbar\omega$  много больше, чем средняя тепловая энергия, почти все будут с наинизшей энергией. Только очень малая доля будет возбуждена. Чтобы их возбудить, нужно передать им энергию  $\hbar\omega$ , а с помощью столкновений нельзя передать им энергию много большую, чем средняя тепловая энергия частицы. Вероятность такого события экспоненциально мала. Эти излучатели как будто заморожены, и поэтому экспоненциально мала интенсивность испускаемого ими света. Так объясняется закон Вина. Основываясь на предположении о дискретном изменении энергии излучателей, Планк получил формулу, описавшую экспериментальное распределение интенсивности для всех частот в зависимости от температуры стенок. Для согласия с опытом достаточно было только правильно подобрать константу  $\hbar$ . Так было получено численное значение этой величины:  $\hbar \cong 10^{-27}$  эрг·с. Понятно, почему скачкообразность излучателей не проявляется в других случаях — порции энергии так малы, что изменение энергии кажется непрерывным.

### Волна или частица?

Следующее важное событие произошло в 1905 году — появилась замечательная работа Эйнштейна по теории фотоэффекта: вырывания электронов из атома при облучении. В этой работе было показано, что фо-

то эффект можно объяснить, только предположив, что свет представляет собой набор частиц-фотонов, которые, ударяясь об электрон, выбрасывают его из атома. Представление о свете как о волне не могло объяснить той концентрации энергии на одном электроне, которая необходима для его вырывания.

Эйнштейн показал, что при поглощении или рождении кванта света — фотона — одновременно исчезает или появляется количество движения  $p = h\omega/c$ . Таким образом, фотон имеет импульс (количество движения), связанный с длиной волны  $\lambda$  соотношением  $p = 2\pi h/\lambda$ .

Здесь мы использовали известную связь частоты  $\omega$  с длиной волны  $\lambda$ :  $\omega = 2\pi c/\lambda$ .

Энергия волны заданной частоты может изменяться только порциями  $h\omega$ , аналогично тому, как изменялась энергия излучателей в рассуждениях Планка. Дискретность распространилась и на электромагнитные волны. Более того, формула Планка получается из предположения, что электромагнитное излучение в ящике есть газ частиц-фотонов, находящийся в тепловом равновесии со стенками. Кстати, Эйнштейн получил Нобелевскую премию 1922 года именно за теорию фотоэффекта, а не за свой главный духовный подвиг — теорию относительности и теорию тяготения.

В некотором смысле точка зрения Эйнштейна означала возврат к ньютоновой теории корпускул. Опять возник вопрос, на который не смог ответить Ньютон: как объединить оба представления — о волновой природе света, доказанной опытами по интерференции и дифракции, и о корпускулярной, необходимой для понимания фотоэффекта. Возник важный парадокс: «дуализм волн-частиц».

### Постулаты Нильса Бора

В 1913 году вышла в свет знаменитая работа Нильса Бора, в которой он распространил на атом дискретность возможных значений энергии излучателей, предложенную Планком для объяснения свойств равновесного излучения — допустимы не все орбиты, а только некоторые. Бор установил правила для нахождения допустимых орбит электрона.

С классической точки зрения электрон, вращающийся вокруг ядра (планетарная модель атома), должен излучать электромагнитные волны. Ведь, вращаясь, электрон движется с ускорением, а по законам классической электродинамики не излучает только заряд, движущийся по прямой с постоянной скоростью.

Согласно правилам Бора, электрон может излучать свет только при переходе с одной орбиты на другую, причем только порциями с частотой  $\nu = (E_n - E_m)/h$ , где  $E_n$  и  $E_m$  — возможные значения  $n$ -той и  $m$ -той орбит.

Есть орбита с наименьшей возможной энергией, в этом состоянии электрон живет неограниченно долго — ему некуда переходить. Так объяснялась стабильность атома. Боровские правила квантования объяснили тот удивительный факт, что атомы испускают свет строго дискретных частот, и позволили выразить эти частоты через заряд ядра, заряд и массу электрона и постоянную Планка.

Таким образом, теория описывала все главнейшие свойства атомов, хотя смысл правил квантования Бора оставался загадочным. Недаром он назвал свои правила «постулатами» — недоказанными предположениями.

Их смысл стал ясен только после создания квантовой механики.

Правила квантования Бора — одно из удивительнейших явлений в истории науки. Только гениальным озарением можно объяснить появление этой теории в то время на таких шатких основаниях! Эйнштейн сказал по этому поводу: «Это высшая музыкальность в области теоретической мысли».

### Догадка де Бройля

Лишь в 1923 году произошло событие, которому суждено было объяснить смысл правил квантования. Но сначала оно лишь обострило проблему волн-частиц. Французский физик Луи де Бройль предположил, что частицы обладают таким же дуализмом, как свет. Частицы должны описываться волновым процессом с длиной волны  $\lambda$ , так связанной с количеством движения  $p$ , как и длина волны световых частиц — фотонов:  $\lambda = 2\pi h/p$ .

Уже через четыре года это удивительное предсказание было подтверждено опытом. К. Дэвиссон, Л. Джермер и Дж. П. Томсон открыли дифракцию электронов на кристаллах. Электрон действительно ведет себя как волна!

Подтвердилась не только волновая природа электрона, но и в точности формула де Бройля для длины электронной волны. История повторилась в обратной последовательности: в случае света была сначала изучена волновая природа, а потом корпускулярная, а у электрона — наоборот.

### Квантовая механика

Следующий шаг — важнейшее обобщение догадки де Бройля. В 1926 году Эрвин Шрёдингер получил свое знаменитое уравнение для волновой функции ( $\psi$ -функции) частицы, движущейся во внешнем поле. В свободном пространстве это уравнение для волн с постоянной длиной. Его решение и есть волна де Бройля. Но во внешнем поле, например, в кулоновском поле ядра, длина волны изменяется от точки к точке. Особенно просто найти это уравнение для медленно изменяющегося поля. Тогда и длина волны изменяется медленно, в каждой точке определяясь формулой де Бройля, но с изменяющимся от точки к точке импульсом  $p(r)$ .

Его можно найти из выражения для энергии:

$$E = \frac{p^2(r)}{2m + U(r)}$$

Первое слагаемое здесь — кинетическая энергия, второе — потенциальная. Уравнение Шрёдингера легко получается из уравнения де Бройля для волн, в которое входит слагаемое  $p^2\psi$  — надо только заменить

в нем импульс  $p$  на  $p(r)$ . Наверно, подобные соображения и помогли Шрёдингеру найти это замечательное уравнение.

Оказалось, что решение уравнения Шрёдингера для атома водорода согласуется с правилами квантования Бора не для всех энергий, а только для дискретных значений, совпадающих с теми, которые следовали из боровских правил. Объяснились многие детали устройства атомов, которые не объяснялись постулатами Бора. Стал ясен и смысл правила квантования — оно означает, что в области движения электрона должно укладываться целое число волн де Бройля. Но об этом мы еще подробно поговорим в следующих разделах, и даже найдем решения упрощенного уравнения Шрёдингера для разных случаев.

За несколько месяцев до Шрёдингера Вернер Гейзенберг предложил другой вариант квантовой теории. Исходя из принципа наблюдаемости, он представил величины как совокупность всех возможных амплитуд перехода из одного состояния квантовой системы в другие. Сама вероятность перехода пропорциональна квадрату амплитуды, точнее, квадрату модуля амплитуды (уточнение для тех, кто знаком с комплексными числами). Именно такие амплитуды перехода и наблюдаются на опыте. В таком представлении каждая величина имеет два значка, определяющих начальное и конечное состояния системы. Эти величины называются «матрицами». Так, координате  $q$  соответствует матрица — совокупность матричных элементов  $q_{mn}$ , где  $m$  и  $n$  — два состояния системы. Гейзенберг получил замкнутые уравнения, из которых в принципе можно найти все наблюдаемые величины. Однако в своей первоначальной форме матричная механика Гейзенберга казалась неоправданно сложной по сравнению с волновой механикой Шрёдингера. Уже в 1926 году Шрёдингер показал полную эквивалентность обоих подходов. Матричная и волновая механики объединились в квантовую.

Сейчас физики запросто обращаются с матрицами, уравнения для матриц не кажутся сложными. Но для получения аналитических результатов удобнее перейти, как говорится, в координатное представление и вместо уравнения для матриц решать уравнение Шрёдингера.

Даниил Данин в книге «Вероятностный мир» описывает драму зарождения квантовой механики во всех деталях и с удивительной поэтичностью. Там приводится поучительный рассказ:

«Летом 25-го года, когда волновой механики еще не существовало, а матричная только-только появилась на свет, два геттингенских теоретика пошли на поклон к знаменитому Давиду Гильберту — признанному главе тамошних математиков. Бедствуя с матрицами, они захотели попросить помощи у мирового авторитета. Гильберт выслушал их и сказал в ответ нечто в высшей степени знаменательное: всякий раз, когда ему доводилось иметь дело с этими квадратными таблицами, они появлялись в расчетах как «своего рода побочный продукт» при решении волновых уравнений.

— Так что, если вы поищите волновое уравнение, которое приводит к таким матрицам, вам, вероятно, удастся легче справиться с ними».

По словам американца Эдварда Кондона, «геттингенскими теоретиками» были Макс Борн и Вернер Гейзенберг. А заканчивается рассказ так:

«Оба теоретика решили, что услышали глупейший совет, думая будто Гильберт просто не понял, о чем шла речь. Зато Гильберт потом с наслаждением смеялся, показывая им, что они могли бы открыть шрёдингеровскую волновую механику на шесть месяцев раньше ее автора, если бы повнимательнее отнеслись к его, гильбертовым, словам».

На этом закончился первый этап развития квантовой механики. Несмотря на все ее успехи, оставался нерешенным главный вопрос: что такое волновая функция, основной инструмент теории?

### Координата или скорость?

В 1927 году Вернер Гейзенберг сделал важнейший шаг на пути к пониманию физического смысла новой механики. Анализируя возможности измерения координаты и импульса электрона, он пришел к заключению, что условия, благоприятные для измерения положения, затрудняют нахождение импульса, и наоборот — в этом смысле два понятия дополняют друг друга. Для доказательства он пользовался мысленными экспериментами. Вот краткая схема одного из них.

Для определения положения электрона нужно осветить его светом и посмотреть в «микроскоп». Такой способ определения координаты дает неопределенность  $\Delta q$  порядка длины волны  $\lambda$  использованного света:  $\Delta q \approx \lambda$ .

Для уточнения положения электрона надо брать возможно меньшую длину волны. Но это палка о двух концах. При взаимодействии с электроном свет передает ему импульс. Чтобы уменьшить передаваемый импульс, можно ослабить интенсивность света так, чтобы с электроном взаимодействовал один фотон. Минимальный передаваемый электрону импульс будет порядка импульса одного кванта. Этот импульс связан с длиной волны соотношением  $p = 2\pi\hbar/\lambda$ , поэтому неопределенность импульса электрона:  $\Delta p > 2\pi\hbar/\lambda$ . Умножая на  $\lambda$  и подставляя  $\Delta q$  вместо  $\lambda$ , получаем:

$$\Delta q \Delta p > 2\pi\hbar.$$

Это и есть соотношение неопределенности.

Попробуем измерить координату электрона другим способом — будем пропускать пучок электронов через отверстие в экране, плоскость которого перпендикулярна пучку. Со светом такой опыт много раз делался, и хорошо известно, что получается. Если за отверстием поместить второй экран, то на нем мы увидим яркое пятно того же размера, что отверстие, но края пятна будут размыты, пятно расширяется. Свет у краев отверстия загибается в результате своей волновой природы. Получится пучок световых лучей внутри некоторого угла. Этот угол — угол дифракции — равен  $\Theta = \lambda/d$ , где  $\lambda$  — длина волны, а  $d$  — диаметр второго отверстия. Если расстояние от отверстия до второго экрана  $l$ , то радиус диаметра фракционного пятна будет  $R = l\Theta \sim \lambda l/d$ . Вокруг центрального пятна чередуются концентрические темные и светлые кольца, быстро убывающие по интенсивности.

Загибание световых лучей легко увидеть, если закрыть почти полностью свет лампочки линейкой, держа ее на вытянутой руке. Линейка по-



кажется вышербленной в том месте, где проходит свет. Звуковые волны гораздо длиннее световых, и поэтому звук легко огибает препятствия.

Так как с электроном связан волновой процесс, аналогичная дифракционная картина получится и при прохождении через отверстие пучка электронов. В момент прохождения отверстия координата электрона, поперечная направлению пучка, будет определена с точностью  $\Delta q \sim d$ , где  $d$  — диаметр отверстия.

Что будет по другую сторону экрана? По законам дифракции после прохождения отверстия получится пучок волн всех направлений, лежащих внутри дифракционного угла  $\Theta = \lambda/d$ . Но теперь  $\lambda$  — длина волны электрона  $\lambda = 2\pi\hbar/p$ , где  $p$  — импульс электрона в падающем пучке. Отклонение электрона от прежнего направления после прохождения отверстия означает, что электрон получил импульс отдачи  $\Delta p$  в поперечном направлении, причем

$$\Delta p/p = \Theta = \lambda/d.$$

Подставляя выражение для  $\lambda$  и заменяя  $d$  на  $\Delta q$ , получим опять соотношение Гейзенберга. Прodelав большое число таких мысленных экспериментов с тем же результатом, нельзя не прийти к заключению, что мы имеем дело с принципиальным ограничением. Этого ограничения не знала классическая физика — оно не вносит изменений в описание больших тел из-за малости  $\hbar$ .

Соотношение неопределенности — частный случай и конкретное выражение общего принципа дополненности, сформулированного Нильсом Бором в 1927 году. Принципиальная неопределенность некоторых величин есть следствие применения классических понятий к описанию неклассических объектов. Квантовая природа микрообъектов дополнительна к их классическому описанию. Но классическое описание результатов наблюдений неизбежно. Все измерительные приборы обязательно классичны, при изменении недопустимы неопределенности, прибор должен давать определенное численное значение измеряемой величины. Особенно наблюдений квантовых объектов мы обсудим немного позже, а пока, чуть отвлечшись от конкретной темы, еще раз вернемся к некоторым фундаментальным принципам.

## Наблюдаемость

Опасность введения предвзятых понятий, основанных на повседневном опыте, была ясна уже Галилею, который в «Разговорах» призвал к «меньшей доверчивости к тому, что на первый взгляд представляют нам чувства, способные легко обмануть... Лучше постараться посредством рассуждения или подтвердить реальность предположения, или разоблачить его обманчивость».

В начале XX века этот призыв превратился в требование наблюдаемости вводимых понятий. В 1905 году Эйнштейн, создавая теорию относительности, начал с анализа понятия одновременности. Это понятие раньше вводилось в науку интуитивно, без указаний на какой-либо, хотя бы принципиально возможный способ проверки. Эйнштейн задался целью выяснить, является ли понятие одновременности отно-

сительным, то есть, изменяется ли оно при переходе к движущейся системе координат. Совпадает ли понятие одновременности для наблюдателя, стоящего на земле, и наблюдателя, равномерно движущегося относительно нее?

Для ответа на этот вопрос нужно было найти способ физического определения одновременности. Эйнштейн предложил следующее: две вспышки света в точках А и В считаются одновременными, если свет от них одновременно приходит в точку, лежащую посередине. Из этого определения немедленно вытекает, что события, одновременные для неподвижного наблюдателя, не одновременны для наблюдателя, движущегося относительно системы координат, в которой выбраны точки А и В.

Итак, одновременность оказывается понятием относительным. Но если так, то и длина, скажем, какого-нибудь стержня тоже оказывается относительной — ведь для ее определения нужно одновременно измерить положение левого и правого конца.

В сущности, вся частная теория относительности возникает как следствие последовательно проведенного принципа наблюдаемости. Единственное, на чем Эйнштейн основывал рассуждения — независимость скорости света от движения источника, что следует из уравнений Максвелла, и было с большой точностью проверено на опыте Альбертом Майкельсоном в 1881 году.

Часто приходится слышать, что все гениальное просто. К сожалению, это далеко не так. Частная теория относительности — единственная из теорий XX века, обладающая простотой технических средств. Последующие теории сложны не только идейно, но и требуют для своей формулировки сложного математического аппарата. Общая теория относительности, квантовая механика, квантовая электродинамика, теория элементарных частиц не подпадают под характеристику «все гениальное просто».

Принцип наблюдаемости сыграл огромную роль в создании квантовой механики, особенно при анализе ее физического смысла. Вернер Гейзенберг проверил на наблюдаемость такие понятия, как координата и скорость, проделывая мысленные эксперименты по их определению. Выяснилась принципиальная невозможность одновременного точного измерения координаты и скорости: любой мыслимый акт определения координаты вносит непредсказуемую отдачу и делает неопределенным значение импульса частицы.

Нужно ли требовать, чтобы в науку входили только непосредственно наблюдаемые величины? Этим требованием руководствовался Гейзенберг при создании матричной механики (1925). Другой метод подхода — волновая механика Шрёдингера (1925), где не ставилось такой задачи, и в теорию вводилась волновая функция, не измеряемая непосредственно на опыте, содержащая неизмеримые характеристики. В 1926 году Эрвин Шрёдингер показал эквивалентность обоих подходов. Больше того, форма квантовой механики Шрёдингера оказалась гораздо удобней. Подобная ситуация уже возникала в классической физике: уравнения электродинамики удобнее решать, вводя векторные потенциалы, не измеряемые на опыте.

Дальнейшее развитие теоретической физики показало принципиальное преимущество некоторой свободы во введении понятий.

Поучительна история так называемой S-матрицы, или матрицы рассеяния. Этот предложенный Гейзенбергом способ позволяет записывать в компактной форме все результаты возможных экспериментов по изучению системы. Для изучения любой системы необходимо найти амплитуды рассеяния всех возможных частиц, взаимодействующих с системой. Введение S-матрицы позволило получить много важных соотношений. Успех этого метода привел в 1950-х годах к идее получить замкнутые уравнения для матрицы рассеяния, связывающие между собой все возможные амплитуды рассеяния, и таким образом построить теорию элементарных частиц, не обращаясь к их внутреннему устройству, связывая непосредственно данные эксперимента.

Если позволительно применить к разумной на первый взгляд физической идее эпитет «вредная», то он здесь вполне уместен. Эта идея отвлекла многих талантливых людей от более плодотворных направлений. Впрочем, издержки неизбежны, наука развивается не по прямой.

S-матрица имеет дело только с поведением частиц, разведенных на большие расстояния, где их можно наблюдать изолированно. Поэтому в ней теряются такие частицы, как кварки, не существующие вдали друг от друга.

Без вхождения в механизм взаимодействия элементарных частиц и полей на малых расстояниях невозможно построить разумную теорию. Поэтому попытки создать замкнутую систему уравнений для матрицы рассеяния безнадежны. Успехи последнего времени в теоретической физике элементарных частиц покоятся на квантовой теории поля, изучающей взаимодействие полей и частиц как на малых, так и на больших расстояниях.

Требование буквальной наблюдаемости оказалось слишком стеснительным для современной физики.

### Дополнительность

В юности на Нильса Бора оказала большое влияние поэтическая проза датского философа Серена Кьеркегора (1813—1855), при жизни почти не известного за пределами родной страны, но приобретшего громкую славу в 1920-х годах, когда его признали одним из родоначальников экзистенциализма. Интересно проследить на этом примере, как юношеские впечатления, накапливаясь в подсознании, создали почву, на которой родился удивительный склад мышления, отличавший Бора. Возможно, его идея о взаимодействии прибора и объекта, сыгравшая столь важную роль при построении квантовой теории, была связана с утверждением Кьеркегора, что «мыслящий является одновременно тем музыкальным инструментом, той флейтой, на которой играет». Оспаривая мысль Гегеля о переходе количества в качество, Кьеркегор писал: «Высшая количественная определенность так же мало объясняет скачок, как и низшая. Новое возникает скачкообразно». Не отразилась ли и эта мысль в размышлениях Бора о квантовых скачках?

Один из основных трудов Кьеркегора называется «Или — или». Это

загадочное название отражает многозначность понятий кьеркегоровской философии. Многозначность понятий — одна из излюбленных мыслей Нильса Бора. «Каждое высказанное мною суждение, — говорил он, — надо понимать не как утверждение, а как вопрос». Или: «Есть два вида истины — тривиальная, отрицать которую нелепо, и глубокая, для которой обратное утверждение — тоже глубокая истина». Последнее утверждение можно было бы сформулировать мягче: содержательность утверждения проверяется тем, что оно может быть опровергнуто.

Поль Дирак в статье «Многогранность личности Бора» говорит об этом подробнее: «При изучении абстрактных философских проблем Бор обращал особое внимание на возможность двойственного толкования, заключенного в самих значениях слов. Эта двойственность может определять истинность или ложность высказывания. Бор считал, что высшая мудрость должна быть обязательно выражена такими словами, смысл которых нельзя определить однозначно. Следовательно, истинность высшей мудрости не абсолютна, а лишь относительна в соответствии с одним из значений двусмысленных слов, поэтому противоположное высказывание столь же правомерно и мудро».

Бор советовал: «Никогда не выражайся ясней, чем ты думаешь», — любил китайскую поговорку: «Все мы — одновременно зрители и актеры драмы жизни»...

Принцип дополнительности, о котором пойдет речь, — вершина боровской диалектики.

В начале 1927 года произошли два важных события: Вернер Гейзенберг получил соотношение неопределенности, а Нильс Бор сформулировал принцип дополнительности.

Анализируя все возможные мысленные эксперименты по измерению координаты и скорости частицы, Гейзенберг пришел к заключению об ограниченных возможностях их одновременного измерения: чем точнее измерять координату электрона, например, осветив его светом короткой волны, тем менее определенной делается скорость электрона из-за неопределенной отдачи, которую он получает при взаимодействии с волной. Полученная Гейзенбергом формула так проста, что ее стоит здесь написать:  $\Delta q \Delta p = h$ . В правой части стоит постоянная Планка, слева — неопределенность координаты, помноженная на неопределенность импульса (количества движения) частицы. Мы недаром употребляем слово «неопределенность» — не ошибка, не незнание, а именно неопределенность. Согласно принципу наблюдаемости, принципиальная невозможность измерения означает неопределенность самого понятия.

Точное определение координаты делает импульс полностью неопределенным. Понятия координаты и импульса ограничивают и дополняют друг друга.

Соотношение неопределенности Гейзенберга есть проявление принципа дополнительности.

Слова Гегеля о единстве и борьбе противоположностей, как и всякое слишком общее суждение, от частого повторения кажутся тривиальными. Боровская идея дополнительности дает мысли Гегеля новое воплощение. Именно понятие дополнительности позволяет примирить, казалось бы,

непримиримое: ведь электрон проявляет себя в разных экспериментах то как частица, то как волна.

Частица-волна — две дополнительные стороны единой сущности. Нельзя подчеркивать одну из этих сторон в ущерб другой. Квантовая механика синтезирует эти понятия, позволяя предсказать исход любого опыта, в котором проявляются как корпускулярные, так и волновые свойства частиц.

Первая реакция физиков на идею дополнительности была сдержанной. Дирак сказал, что она не кажется содержательной, поскольку не изменяет нашего описания природы. Только Вольфганг Паули, обычно настроенный критически, принял дополнительность и даже предлагал назвать квантовую механику «теорией дополнительности».

Позже Бор еще много раз обращался к идее дополнительности в популярных статьях и выступлениях.

По словам одного из коллег Бора, он вел огромную и напряженную работу по исследованию применения понятия дополнительности в других областях знаний, считая эту задачу не менее существенной, чем чисто физические исследования.

Сводятся ли биологические закономерности к физико-химическим процессам? На первый взгляд все биологические процессы определяются движением частиц, составляющих живую материю. Предельное выражение такой точки зрения — определение физиологии как «физической химии азотосодержащих коллоидов». Но такой взгляд отражает только одну сторону дела. Другая сторона, более важная — закономерности живой материи, которые хоть и определяются законами физики и химии, но не сводятся к ним. Для биологических процессов характерна финалистическая закономерность, отвечающая на вопрос «зачем». Физика же интересуется только вопросами «почему» и «как».

Правильное понимание биологии возможно только на основе дополнительности физико-химической причинности и биологической целенаправленности. По мнению историков науки, Бор, размышляя об этом, как бы выполнял сыновний долг: работы его отца, известного физиолога Христиана Бора, дали в свое время толчок оживленным дискуссиям на одну из главных философских тем начала XX века — о витализме, признающем наличие в организмах нематериальной сверхъестественной силы (души, жизненной силы) и механицизме, объясняющем развитие природы и общества законами механической формы движения материи. Понятие дополнительности позволяет строить описание живых процессов на основе взаимодополняющих подходов.

В статье «Свет и жизнь» Бор замечает, что «непрерывный обмен веществ между организмом и окружающей средой необходим для поддержания жизни, вследствие чего четкое выделение организма как физико-химической системы не представляется возможным. Поэтому можно считать, что любая попытка провести резкую грань, позволяющую осуществить исчерпывающий физико-химический анализ, вызовет изменение обмена веществ в несовместимой с жизнью организма степени...»

Выступая в 1938 году на Конгрессе по антропологии и этнографии в Копенгагене с докладом «Философия естествознания и культуры наро-

дов», Бор говорил о дополнительности разных культур: «...каждая культура представляет собой гармоничное равновесие традиционных условностей, при помощи которых скрытые потенциальные возможности человеческой жизни могут раскрыться так, что обнаружатся новые стороны ее безграничного богатства и разнообразия». Он развил идею равноправия и дополнительности наций в человеческом сообществе.

Нильс Бор усиленно размышлял над применением понятия дополнительности в психологии: «Всем известно старое высказывание, которое гласит, что мы, пытаясь анализировать свои переживания, перестаем их испытывать. В этом смысле оказывается, что между психологическими опытами, которые описываются такими понятиями, как «мысли» и «чувства», существует соотношение дополнительности, подобное тому, какое существует между данными о поведении атомов...»

Непрерывность и скачкообразность физических явлений — дополнительные понятия. Измерения всегда приводят к непрерывным функциям. Скачки сглажены, хоть и на малом интервале. В атоме сглаживание определяется конечной шириной спектральных линий; в фазовых переходах — конечностью числа атомов образца. В этом смысле утверждение «природа не делает скачков» правильно. Но вместе с тем такое заглаживание не отменяет скачкообразной закономерности, которая остается в виде разумного приближения, точность которого растет по мере исключения сглаживающих явлений.

Физическая картина явления и его математическое описание дополнительные. Создание физической картины требует пренебрежения деталями и уводит от математической точности. И наоборот — попытка точного математического описания явлений затрудняет ясное понимание.

Однажды знакомый лингвист мне пожаловался, как трудно примирить два направления, существующие в его науке. Одни утверждают, что смысл фразы целиком определяется совокупностью входящих в нее слов. Другие, и в том числе мой собеседник, считают слова только символами, намекающими на содержание. В пример он привел фразу: «У кого была в 1978 году А. П. Иванова со своим пульпитом?» Ясно, что врач спрашивает, у какого специалиста раньше лечилась его пациентка. Но как построить машину, которая правильно передала бы смысл?

Я предложил ознакомиться с рассуждениями Бора насчет дополнительности, и через какое-то время получил от него письмо: «Ваша мысль о принципе дополнительности Бора применительно к двум сторонам языка хороша и пришлась очень кстати. Она позволяет осмыслить противоречивость, как благо, а не как занозу. Спасибо. Соответствующий тезис войдет в работу, которую я сейчас готовлю, надеюсь Вас с ней ознакомить».

В физике идея Бора приводит к количественным соотношениям, что и доказывает ее ценность. Принцип дополнительности порой кажется почти тривиальным, но его значение доказывается тем, что он помогает найти направление развития, в частности, в приведенном примере, выработать рациональные способы машинного перевода.

Бор однажды сказал: «Нельзя одновременно смотреть глазами любви и справедливости», — понимая, что не способен наказать за провинность любимого сына; а на вопрос, что дополнительно понятию истины, ответил: «Ясность». Таков же смысл одного из любимых им шиллеровских высказываний: «Только полнота порождает ясность, но истина скрывается в бездне»...

### **Физический смысл волновой функции**

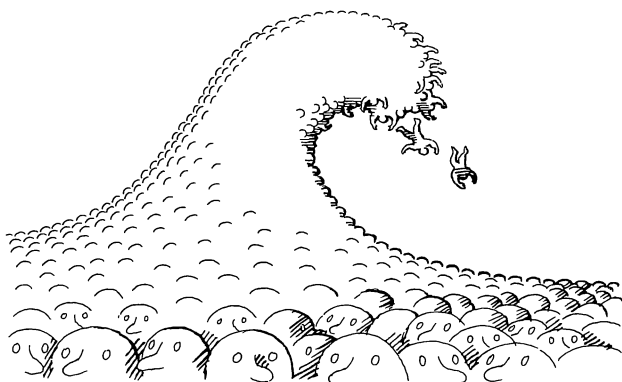
Вернемся к нашему опыту с отверстием в экране. Поставим далеко за экраном фотопластинку. Электрон, попадая на нее, вызовет почернение какого-нибудь зерна эмульсии, после чего его координата определится с точностью до размеров зерна. Пучок электронов после дифракции на отверстии зачернит круг с радиусом  $R = \lambda/d$ . Теперь уменьшим интенсивность пучка электронов так, чтобы каждый электрон падал на пластинку, скажем, раз в минуту. После долгого ожидания получится та же картина, что и при интенсивном пучке. Но электроны падают поодиночке, значит, уже одному электрону следует приписать вероятность попасть в то или иное место. Уже для одного электрона эта вероятность распределена вблизи пластинки так, что она максимальна в центре, слегка убывает от центра к радиусу  $R$ , а затем за пределами дифракционного пятна начинает резко убывать.

Проследим, как осуществляется соотношение неопределенности в нашем опыте. На экран падают электроны с очень точно определенным импульсом — их поперечный импульс равен нулю, следовательно, поперечная координата полностью неопределенна; теперь можно сказать точнее: вероятность до прохождения отверстия найти электрон в любой точке экрана одинакова. После прохождения отверстия поперечный импульс делается неопределенным, зато поперечная координата становится более определенной. Вероятность найти электрон на фотопластинке вне дифракционного пятна мала, неопределенность поперечной координаты  $\Delta q \sim R$ .

Анализ подобных опытов привел Макса Борна в 1926 году к мысли, что волновая функция описывает вероятность того или иного значения координаты или импульса электрона в зависимости от типа поставленного опыта. При этом вероятность определяется квадратом волновой функции. Что помогло прийти к такому заключению?

Вспомним, что теория волновых явлений света — интерференции и дифракции — была разработана задолго до уравнений Максвелла, до того, как была понята электромагнитная природа света. Предполагалось только, что источник света испускает волны неизвестной природы, а интенсивность света пропорциональна квадрату той величины, которая колеблется. В современном представлении колеблются во времени и пространстве электрические и магнитные поля; интенсивность света пропорциональна их квадрату. Но почти все волновые проявления не зависят от природы света.

Естественно считалось, что и в случае волн, связанных с частицами, есть некий волновой процесс, а интенсивность — в нашем случае вероятность — пропорциональна квадрату волновой функции.



Сначала предполагалось, что волновым свойствам частицы соответствует некое реальное физическое поле, подобное электромагнитному полю в световой волне.

Но тогда уже один электрон давал бы в одном акте всю дифракционную картину. Между тем он чернит одно зерно. Это только один из доводов — от такого взгляда на природу волнового процесса пришлось отказаться по многим причинам. Таким образом, волновая функция частицы не есть какое-либо физическое поле, она представляет собой запись потенциальных возможностей исхода того или иного последующего наблюдения.

Волновая функция есть максимально полное допустимое описание состояния частицы. Она заменяет классическое состояние, которое задается координатами и скоростями.

Волновая функция, описывающая состояние электромагнитного поля, имеет ту же природу; она не есть электромагнитное или какое-либо другое физическое поле, а только определяет вероятность того или иного значения поля в каждой точке.

Применению квантовой механики к полю посвящен конец этой главы.

### Нарушается ли причинность?

Предсказания квантовой механики не дают однозначного ответа, они дают лишь вероятность того или иного результата. С какой бы точностью ни определять состояние электрона до падения на экран, нельзя предсказать, в какой именно точке фотопластинки он окажется. Можно указать только распределение вероятности найти его в той или иной точке.

Не означает ли эта неоднозначность нарушения причинности? Классическая физика не знала неопределенности. Успехи небесной механики в XVII—XVIII веках внушили глубокую веру в возможность однозначных предсказаний. Эту гордость неограниченными возможностями науки выразил Пьер Лаплас (1749—1827): «Дайте мне координаты и скорости всех частиц — и я предскажу будущее Вселенной!» Появление электродинамики не изменило этой веры. Хотя начальное состояние в электродинамике задается не только координатами и скоростями частиц, но и распределением полей, ее предсказания однозначны.



Предсказания классической статистической физики носят вероятностный характер. Она отвечает, например, на вопрос, какова вероятность найти частицы нагретого газа с той или иной энергией, или, иными словами, предсказывает распределение частиц по энергии. Но здесь есть важное отличие от квантовой механики. Вероятность в статистической физике — результат сложности системы, неточного определения начального состояния. Кроме того, механическая система должна обладать важным свойством — она должна быть «размещиваемой». Это означает, что малая неточность начальных условий за короткое время приводит к размещиванию системы по всей области ее возможных состояний. Но за всем этим стоит однозначность механических законов.

В квантовой механике неопределенность принципиальная, она следует из дополнителности квантово-механических свойств и классического описания. Кроме того, она проявляется уже для самых простых объектов, для индивидуальных наблюдений за одной частицей.

Главное открытие квантовой механики — вероятностный характер законов Вселенной. На некоторые вопросы нельзя однозначно ответить.

Как мы уже знаем, «задать координаты и скорости всех частиц» невозможно. Самое большее, что можно сделать, — задать в начальный момент волновую функцию. Квантовая механика позволяет однозначно найти волновую функцию в любой более поздний момент. Вместо восклицания Лапласа можно с такой же гордостью произнести: «Дайте мне волновую функцию всех частиц — и я предскажу будущее!»

Впрочем, невозможность предсказывать будущее в практической жизни не связана с квантовой неопределенностью. Мы имеем дело с такими сложными системами, в которых определить начальную волновую функцию так же невозможно, как координаты и скорости.

Нильс Бор отмечал, что попытка определить волновую функцию живого объекта немедленно приведет к его гибели. Наше будущее зависит от таких сложных и неопределенных систем, как люди... Но вернемся к физическим законам.

Итак, невозможно проследить траектории отдельных частиц; причинность в лапласовом смысле нарушена, но в более точном смысле она соблюдается. Из максимально полно определенного начального состояния однозначно следует единственно возможное конечное состояние. Изменился только смысл слова «состояние». Что же делать, если выяснилось, что понятие «состояния», принятое в классической физике, принципиально неосуществимо?

### **Состояние частицы можно изменить, не прикасаясь к ней!**

Невозможность однозначно предсказать исход единичного опыта была настолько непривычной, что вызвала множество возражений. Является ли квантово-механическое описание полным, или необходимо создать более точную теорию, где все было бы однозначно? Не надо ли изменить интерпретацию волновой функции?

Эйнштейн писал в 1936 году: «Это мнение логично и не приводит

к противоречиям, но оно настолько противоречит моему научному инстинкту, что я не могу отказаться от поисков более полного понимания».

Многолетний спор Бора с Эйнштейном привел к углублению и уточнению теории измерений в квантовой физике. Дальнейшее развитие до сих пор подтверждало мнение Бора о полноте квантово-механического описания реальности.

Чтобы понять суть затруднений, нужно разобраться в особенностях квантово-механических наблюдений.

Прежде всего свойства микроскопических объектов нельзя изучать, отвлекаясь от способов наблюдения. В зависимости от него электрон проявляет себя либо как волна, либо как частица, либо как нечто промежуточное. Разумеется, есть и свойства, не зависящие от способа наблюдения: масса, заряд, спин частицы, барионный заряд, магнитный момент... Но всякий раз при желании измерить какие-то величины, не имеющие определенного значения, результат будет зависеть от способа наблюдения. Это свойство квантовых объектов В.А. Фок называл «относительностью к средствам наблюдения». Доквантовая физика знала только относительность, связанную с движением, — относительность скорости, относительность формы. Быстро движущееся колесо из-за сокращения Лоренца имеет вид эллипса. В квантовой теории результат зависит от того, как и что измерять в одной и той же системе координат.

Мы уже говорили, что причины этого неустранимы — мы вынуждены описывать квантовые объекты на классическом языке. Но так же, как объективность явлений природы не умаляется, а выявляется теорией относительности, относительность к средствам наблюдения в квантовой теории несколько не затрудняет определения объективных свойств микрообъектов. История развития Вселенной не делается менее объективной от того, что мы ее описываем на своем человеческом языке. Язык классической физики, на котором говорят наши средства наблюдения, и на котором мы формулируем свои мысли, позволяет полностью охарактеризовать свойства микрообъектов. Мы неминуемо, но без потерь пользуемся субъективными инструментами для описания объективного. Карл Вейцекер — немецкий физик, много сделавший в теории ядра, — сказал: «Природа существовала до человека, но человек был до естествознания». И вместе с тем слишком частое упоминание слова «наблюдатель» при описании измерений в квантовой механике оставляет неприятное чувство. Мне кажется, от этого легко избавиться — можно не говорить о наблюдателе, а под словом «наблюдение» понимать способ выяснить тот или иной вопрос, сформулированный на классическом языке. Мы как бы узнаем форму предмета, изучая его проекции, — рассекая ножом по разным плоскостям.

Вернемся к нашему измерительному прибору — экрану с дыркой. После прохождения отверстия поперечный импульс делается неопределенным. Это и приводит к дифракционному пятну. А что получится, если уточнять импульс отдачи электрона? Для этого нужно сделать такое устройство, чтобы экран вместе с отверстием мог свободно перемещаться в поперечном направлении. Измеряя изменение импульса экрана, мы по закону сохранения количества движения найдем и поперечный импульс

электрона. Если импульс отдачи определен очень точно, то положение экрана будет полностью неопределенным, и дифракционная картина исчезнет — любое зерно на фотопластинке может почернеть с одинаковой вероятностью. Электрон будет такой же плоской волной, как и до экрана, только с новым определенным значением импульса.

Теперь вы видите, как работает относительность к средствам наблюдения! От наблюдения за движением экрана зависит характер почернения пластинки. Допустим, экран и пластинка находятся в разных городах. Получается, что, проводя измерения в одном городе, можно повлиять на результат измерений в другом... Не мистика ли это? Нельзя ли использовать подобное явление для экстрасенсорной связи? Это так важно, что надо задуматься. А лучший способ думать — получить то же самое другим способом.

Сделаем еще один мысленный эксперимент. Просверлим в экране второе отверстие на большем расстоянии от первого. И опять посмотрим, что получится, когда на экран падает пучок света. На втором экране мы увидим хорошо известную в оптике интерференционную картину. Помимо двух светлых пятен, против каждого из отверстий получится система светлых и темных кривых, заполняющих плоскость между пятнами. Светлые места будут там, где волны, идущие от каждого отверстия, складываются, а темные там, где они вычитаются. Это и есть интерференция. Если одно из отверстий закрыть, вся эта красивая картина исчезнет.

Разумеется, то же самое будет и с электронами. Как бы редко они ни падали, на фотопластинке, в конце концов, получится интерференционная картина. Если сделать заслонку, закрывающую одно отверстие, на фотопластинке не будет интерференции — лишь одно дифракционное пятно.

Еще одна важная особенность квантовой механики — «принцип суперпозиции» — волновая функция складывается из волновых функций взаимоисключающих событий. Закроем заслонкой одно из отверстий — тогда электрон обязательно идет через другое, и на его волновую функцию заслонка не влияет. Обозначим эту функцию через  $\varphi_1$ . Перенесем заслонку на другое отверстие и обозначим новую функцию через  $\varphi_2$ . Если оба отверстия открыты, волновая функция  $\varphi$  равна сумме  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ :  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ . Вероятность найти электрон в какой-либо точке пластинки будет

$$P = |\varphi|^2 = |\varphi_1 + \varphi_2|^2.$$

Если в какой-нибудь точке  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  равны, мы получим вероятность  $P = 4|\varphi_1|^2 = 4P_1$ , а если они отличаются по знаку, то  $P = 0$  — в эти места электроны не попадают. Если отверстия открываются попеременно, будут складываться вероятности, а не волновые функции. Соответствующая вероятность будет

$$P' = |\varphi_1|^2 + |\varphi_2|^2 = P_1 + P_2.$$

Интерференция исчезнет, величины  $P_1$  и  $P_2$  — положительные и друг друга не погашают. Эти простые формулы поясняют то, что мы получили и без них.

Мы видим, что любая попытка уточнить траекторию, отбирая слу-

чаи, когда электрон проходит через одно отверстие, уничтожает интерференцию. И в этом случае наблюдение, сделанное в Москве, как будто влияет на результаты опытов в Париже.

Есть еще одна особенность: после каждого измерения волновая функция изменяется скачком. В самом деле, пусть электрон имеет определенный импульс. В таком состоянии до падения на фотопластинку электрон можно было с одинаковой вероятностью найти в любом месте; после почернения зерна неопределенность положения электрона изменилась скачком за ничтожное время — теперь она задается размерами зерна. Происходит «редукция волновой функции» или «редукция волнового пакета».

Именно эта странная возможность изменить волновую функцию частицы без воздействия на нее была главным аргументом знаменитой статьи Эйнштейна, Подольского и Розена «Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?» (1935). Они писали, рассматривая две подсистемы: «...поскольку эти системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций на первой системе во второй системе уже не может получиться никаких реальных изменений».

Проследим это явление на очень простом примере, где оно станет тривиальным. Допустим, мы знаем импульсы двух частиц до столкновения, а после столкновения одна из них пролетает через лабораторию в Дубне, а вторая — через измерительные установки Сакле близ Парижа. Если дубнинский физик получит определенное значение импульса, то по закону сохранения количества движения рассчитает импульс парижской частицы. Следовательно, волновая функция этой частицы определилась в результате измерения в Дубне — она соответствует определенному импульсу.

Но здесь нет ничего странного, это обычный случай изменения вероятности предсказаний с каждой новой информацией. Мы спрашиваем: какова вероятность, что парижанин найдет то или иное значение импульса при условии, что в Дубне нашли определенный импульс? Это означает, что надо взять весь набор многократных измерений импульса в двух этих лабораториях и отобрать из него те случаи, когда в Дубне получался заданный импульс. После такого отбора все парижские измерения тоже окажутся с определенным импульсом. В сущности, это просто подтверждение закона сохранения импульса. Бывают и более сложные ситуации, но влияние измерений в одной из подсистем на результаты измерений в другой, удаленной от нее, всегда нужно понимать именно в смысле отбора случаев, соответствующих определенному условию. Вероятность события при выполнении какого-либо условия называется «условной вероятностью».

Дополнительное условие заставляет нас отбирать другую последовательность событий. Естественно, что при этом вероятности изменяются, следовательно, изменяется и волновая функция.

Какова вероятность автомобильной аварии, или, иными словами, какая доля автомобилей попадает в аварию? Ответ зависит от многих условий. Так, предсказание скачком изменится, если добавить «при испорченных тормозах» или «с опытным водителем». Какова вероятность

высказать неверное суждение в квантовой механике? Она резко увеличится, если добавить: «не подумав». Вот довольно распространенное утверждение: «как бы далеко ни разошлись две подсистемы, они остаются жестко связанными». Это и есть та физическая бессмыслица, против которой правильно возражали Эйнштейн, Подольский и Розен. Разгадка такова: подсистемы на большом расстоянии, разумеется, физически никак не связаны, они независимы. Но условная вероятность для одной из них, безусловно, зависит от того, какое состояние второй подсистемы мы отбираем. И это явление, как мы видим, не специально квантовое, оно присутствует и в классической физике, и даже в повседневной жизни. Предсказание скачком изменяется при изменении условий отбора событий.

**«Исправить можно, но будет хуже...»  
(из разговора с портным)**

Нужно ли искать другую интерпретацию квантовой механики? Мне кажется, что главное — вероятностная природа предсказаний — сохранится при любых изменениях теории. Квантовая механика вместе с теорией измерений представляет собой логически замкнутую и необычайно красивую теорию. Все попытки ее «усовершенствовать» пока оказывались несостоятельными и в лучшем случае ограничивались вопросом: как не столь красивым и более сложным способом получить уже известные результаты квантовой механики? Сейчас мы увидим, что единственная более или менее последовательная попытка «исправления» противоречит опыту.

В период бурных споров о полноте квантовомеханического описания возникла идея: не объясняется ли неопределенность в поведении электрона тем, что его состояние зависит не только от импульса, координаты и проекции спина, но еще от каких-то внутренних скрытых параметров? Неопределенность, как и в статистической физике, возникает от



произвола в значении этих параметров. В принципе, если бы скрытые параметры можно было определить, предсказания сделались бы детерминированными (определенными), как в классической механике.

Конечно, это очень неуклюжий и неприятный способ спасения детерминизма столь дорогой ценой — введением лишних переменных. Тем более, что поначалу удавалось только подтверждать уже известные квантово-механические соотношения. Некоторое время казалось, что такой подход по своим следствиям неотличим от квантовой механики. Для единичного измерения игрой скрытых параметров удастся получать совпадения с квантовой механикой. Однако при повторных изменениях это не всегда возможно.

Первое измерение так ограничивает область возможных значений скрытых параметров, что их свободы ко второму измерению уже недостаточно для согласия с квантовой механикой. Наиболее убедительно это показал Джон Белл в 1960 году. Для доказательства ему было достаточно предположить, что значения скрытых параметров в разделенных подсистемах независимы. Но ведь эти параметры лишь для того и вводились, чтобы избежать вероятностной «зависимости» разделенных объектов квантовой механики.

Итак, было указано, при каких экспериментах можно увидеть различие между предсказаниями квантовой механики и теории скрытых переменных. Такой опыт провели в 1972 году Стюарт Фридман и Джон Клаузер. Они наблюдали свет, испускаемый возбужденными атомами кальция. В условиях их эксперимента кальций последовательно испускал два кванта видимого света, которые можно было отличать с помощью обычного цветного фильтра. Каждый квант попадал в свой счетчик, проходя через поляриметр, который отбирал определенное направление поляризации. Изучалось число совпадений счетчиков как функция угла между направлениями поляризации двух квантов. Теория скрытых переменных предсказывает провалы на кривой, изображающей эту зависимость. На опыте не только не оказалось никаких провалов, но вся экспериментальная кривая с поразительной точностью совпала с теоретической кривой, полученной из квантовой механики.

Итак, никаких скрытых параметров нет. Квантовая механика лишней раз подтвердилась. Для микрообъектов лапласовского детерминизма не существует.

Как ни удивительно, парапсихологи восприняли этот результат как возможное обоснование экстрасенсорных явлений. Но сначала признаюсь: о теореме Белла и опытах Фридмана и Клаузера я впервые услышал от американского парапсихолога. Большинство физиков, и я в том числе, были убеждены в справедливости квантовой механики и настолько не доверяли идее скрытых параметров, что перестали следить за событиями в этой области.

Неосторожная фраза «две подсистемы остаются жестко связанными после удаления на большое расстояние» оказалась не такой уж невинной. Если забыть о вероятностной природе волновой функции, то можно подумать, что связь между системами — физическая, тогда как она не материальная, а информативная, в смысле условной вероятности, о чем шла речь

выше. Физические же системы, жестко связанные на больших расстояниях, — прямой путь к объяснению многих чудесных явлений. Между тем опыт Фридмана и Клаузера только подтвердил квантовую механику, в которой нет никаких нарушений физических принципов. Причинность соблюдается — причина предшествует следствию, — нельзя осуществить физическое взаимодействие без того, чтобы какое-нибудь поле не распространилось от передающего объекта к принимающему; скорость распространения этого поля меньше или равна скорости света.

Еще один физический факт, который пытаются использовать некоторые парапсихологи, тоже не имеет ни малейшего отношения к экстрасенсорным явлениям. Из релятивистской квантовой механики следует — и наблюдается на опыте, что наряду с частицами существуют античастицы: вместе с электроном — позитрон, с протоном — антипротон. Античастицы — такие же физические объекты, как их партнеры, и, как полагается, движутся вперед по времени. Однако существует очень красивое, но не физическое, а математическое следствие их родства с частицами: античастицу можно рассматривать как частицу, движущуюся в сторону прошлого. Условность этого утверждения видна из того, что можно было бы с тем же успехом двигать вспять по времени частицы.

Если понимать этот математический факт как физическое явление, в голову может прийти физическая нелепость: раз позитрон — это электрон, пришедший к нам из будущего, нельзя ли с его помощью узнать, что с нами будет? Нельзя ли научно обосновать предсказания гадалок? Или, поскольку позитрон, родившийся рядом, это электрон, пришедший не только из будущего, но и издалека, нельзя ли увидеть удаленные предметы?

Должен разочаровать сторонников чудес: релятивистская квантовая механика, так же, как нерелятивистская, не дает никаких научных оснований для экстрасенсорных явлений. Будущее и в этих теориях вытекает из прошлого и определяется, в согласии с причинностью, событиями, которые происходили до предсказываемого момента. Видеть на расстоянии можно только с помощью прибора, аналогичного телевизору. Должен быть источник какого-то излучения, который передает информацию в приемник и распространяется со скоростью, не превышающей скорости света.

В квантовой физике, так же, как в классической, пока не видно никаких фактов, которые помогли бы понять или объяснить экстрасенсорные явления. Если такие явления существуют, их обоснование следует искать вне физики.

## ВЫЧИСЛЕНИЯ БЕЗ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Как работают физики-теоретики на первой, самой важной стадии работы, когда делается качественный анализ поставленной задачи? Как мы увидим, при этом почти без всяких вычислений получают грубые соотношения между входящими в задачу величинами, проясняется физическая картина явления, возникает проект ожидаемого решения. Следующая стадия — получение точных количественных соотношений с помощью математического аппарата теории — целиком и полностью опирается на первую. Не имея предположительного проекта решения, без качественного анализа,

нельзя приступать к поискам точного результата. Действительно удастся доказать только те утверждения, которые были заранее угаданы. Из этого правила почти не бывает исключений. Анри Пуанкаре писал: «Догадка предшествует доказательству. Нужно ли указывать, что именно так были сделаны все важные открытия?»

Один из главных элементов качественного анализа — решение задачи на упрощенных моделях, в которых отброшено все несущественное. Усложнять решенную задачу несравненно проще, чем сразу решать сложную.

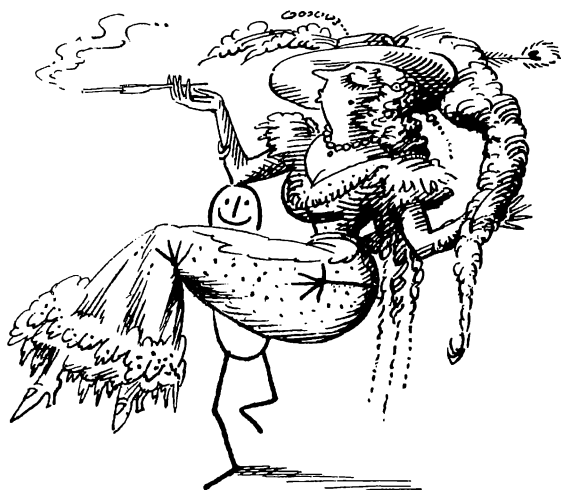
## Размерные оценки

В некоторых случаях многое проясняет простой размерный анализ — размерные оценки входящих в задачу величин и возможные соотношения между ними. Докажем, например, теорему Пифагора из размерных соображений. Из размерности следует, что площадь прямоугольного треугольника можно записать как квадрат гипотенузы  $c^2$ , умноженный на некую функцию угла  $f(a)$  (пусть для определенности  $a$  есть угол между гипотенузой и большим из катетов).

$$c^2 f(a) = a^2 f(a) + b^2 f(a).$$

Сокращая на  $f(a)$ , получаем теорему Пифагора.

Оценим период колебаний маятника. Предположим для простоты, что тяжелый груз с массой  $m$  подвешен на легком стержне, массой которого можно пренебречь. Прежде всего выясним, какие величины могут входить в выражение для периода колебаний. Поскольку маятник движется к положению равновесия под действием силы тяжести, период может зависеть от ускорения силы тяжести  $g$  и от массы маятника  $m$ . Кроме того, сюда может войти длина маятника  $l$ . Разумеется, такие величины, как температура и вязкость воздуха несущественны, если мы пренебрегаем затуханием маятника. Не войдет в задачу и скорость вращения Земли, если не учитывать ускорение Кориолиса, которое возникает от движения точки подвески маятника вместе с Землей. Ничего не поделаешь, чтобы упростить задачу, на-





до знать, чем можно пренебречь! Из трех оставшихся величин —  $g$ ,  $m$ ,  $l$  — можно составить только одну комбинацию, имеющую размерность времени. Эта величина равна  $\sqrt{l/g}$ , следовательно, период  $T$  равен  $T = a\sqrt{l/g}$ .

Масса  $m$  не вошла в задачу. Безразмерную константу  $a$  невозможно найти из размерных соображений, можно только сказать, что она не очень велика и не очень мала — порядка единицы. Действительно, эту величину необходимо найти из решения не написанного нами уравнения движения маятника, а числа, возникающие из решения уравнений, встречающихся в физике, как правило, оказываются порядка единицы. Точное вычисление дает для  $a$  величину  $2\pi$ . Таким образом, мы без вычислений, пользуясь только размерным анализом, получили, что период колебаний маятника не зависит от его массы и пропорционален корню квадратному из его длины. Кроме того, нашли и примерную величину периода колебаний.

### Обобщенный осциллятор

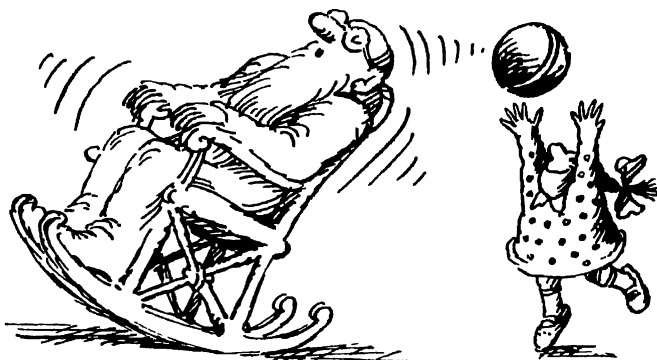
Во всех областях физики встречаются задачи, связанные с колебаниями около положения равновесия. Такая система независимо от ее устройства называется осциллятором — она осциллирует около положения равновесия. Простейший осциллятор — грузик на пружинке или маятник; более сложный — натянутая струна, у которой может быть много типов колебаний: колебания с пучностью посередине (основной тон), с одним узлом, двумя узлами и так далее (обертонами). Струна — набор осцилляторов разной частоты. Аналогичный пример — столб воздуха в органной трубе. Его можно заставить колебаться с наинизшей частотой (основной тон) или с более высокой, когда в некоторых точках воздушного столба частицы воздуха будут неподвижны — аналог узлов в колебаниях струны.

Общее свойство всех осцилляторов заключается в том, что энергия колебательной системы состоит из двух слагаемых. Одно пропорционально квадрату отклонения осциллятора от положения равновесия — это потенциальная энергия. Если  $q$  — величина отклонения от положения равновесия, то потенциальная энергия равна

$$U = \gamma q^2 / 2.$$

Коэффициент  $\gamma$  называется «жесткостью» осциллятора. Второе слагаемое — кинетическую энергию — можно записать в виде  $T = \beta q'^2 / 2$ , где  $q'$  — скорость изменения величины  $q$  по времени. Величину  $\beta$  можно назвать «массой осциллятора». Если отклонить осциллятор от положения равновесия на величину  $q_0$ , то запас потенциальной энергии будет  $U = \gamma q_0^2 / 2$ . Поскольку осциллятор стремится вернуться в состояние равновесия, эта потенциальная энергия начнет переходить в кинетическую, перейдя в нее полностью, когда осциллятор будет проходить положение равновесия. При этом скорость осциллятора  $q'$  максимальна. По инерции он проскочит положение равновесия, и в точке  $-q_0$  вся кинетическая энергия перейдет в потенциальную, после чего опять начнется движение в сторону равновесия. Как бы ни был устроен осциллятор, его угловая частота колебаний  $\omega$  ( $\omega = 2\pi/T$ ) выражается через жесткость  $\gamma$  и массу  $\beta$  следующим образом:

$$\omega = \sqrt{\gamma/\beta}, \text{ или } T = 2\pi\sqrt{\gamma/\beta}.$$



В случае маятника роль жесткости играла величина  $g$ , а «массы» — длина маятника  $l$ . Таким образом, можно рассмотреть сразу все осцилляторы, независимо от их физической природы.

Вот еще один осциллятор, совсем не похожий на предыдущие, но и к нему применимы те же формулы. Концы катушки из хорошо проводящей проволоки присоединены к конденсатору. Энергия такой системы состоит из двух слагаемых: энергии магнитного поля в катушке и энергии электрического поля, пропорциональной квадрату заряда  $Q$ , который в данный момент находится на обкладках конденсатора. Если заряд  $Q$  рассматривать как координату осциллятора, то энергия конденсатора будет играть роль потенциальной энергии. Энергия магнитного поля катушки пропорциональна квадрату силы тока, текущего в данный момент по катушке. Но сила тока равна скорости  $Q'$  изменения заряда конденсатора со временем. Энергия магнитного поля пропорциональна  $Q'^2$  и соответствует кинетической энергии. Такой осциллятор называется электрическим колебательным контуром.

Если в катушку вдвинуть, а потом вынуть магнит, в цепи возникнут электромагнитные колебания — магнитная энергия будет переходить в электрическую, и наоборот. Чем меньше сопротивление проволоки в катушке, тем медленнее будут затухать колебания. Если катушка сделана из сверхпроводника, колебания практически не будут затухать.

### Как угадать решение?

Иногда можно выяснить свойства решения до построения теории, до того, как найдены уравнения, описывающие явления. Это пример более сложного анализа размерностей, чем в случае осциллятора.

Одна из труднейших и нерешенных задач теоретической физики — связь гравитационных и электродинамических явлений.

Если такая связь существует, то в результате решения каких-то еще не найденных уравнений будет получено безразмерное число, дающее соотношение между гравитационной постоянной  $G$  и величинами, характеризующими электричество, такими, как скорость света  $c$ , заряд электрона  $e$ , его



масса  $m$ . Если существенны квантовые явления, в задачу может войти еще постоянная Планка  $h$ , которая, как мы видели, характеризует скачки электромагнитных колебаний. Зная размерности величин  $G$ ,  $c$ ,  $e$ ,  $m$ ,  $h$ , нетрудно убедиться, что из этих величин можно составить только две независимые безразмерные комбинации:

$$\alpha = e^2/hc \text{ и } \xi = hc/Gm^2.$$

Первая из них хорошо известна и называется «постоянной тонкой структуры». Подстановка числовых значений дает  $\alpha = 1/137$ ;  $\xi = 5 \cdot 10^{44}$ . Может ли такое большое число, как  $\xi$ , возникнуть в результате решения каких-нибудь разумных уравнений? Безразмерные числа, которые получаются в физических задачах, обычно имеют порядок нескольких единиц или долей единицы. Поэтому мы вправе ожидать, что величина  $\xi$  войдет в задачу в такой форме, чтобы в результате получилось число порядка единицы. Пока мы применяли здравый смысл. Теперь нужно сделать небольшой интуитивный скачок.

Правдоподобно, что в теорию войдет натуральный логарифм  $\xi$  ( $\ln \xi \sim 100$ ) в комбинации  $\alpha/\ln \xi \sim 1$ . В этом соотношении уже нет больших чисел. Знание такого соотношения облегчает поиски решения.

### Поправки к электродинамике в сильном поле

Эта более сложная задача даст некоторое представление о важном методе современной физики — графиках Фейнмана. Метод графиков или диаграмм совершил революцию в теоретических расчетах. Суть его состоит в том, что явления изображаются в виде рисунков, которые расшифровываются в конце работы. Даже без расшифровки, только как иллюстрация процессов, эти графики

многое разъясняют. Например, такой рисунок означает рождение и уничтожение пары электрон—позитрон

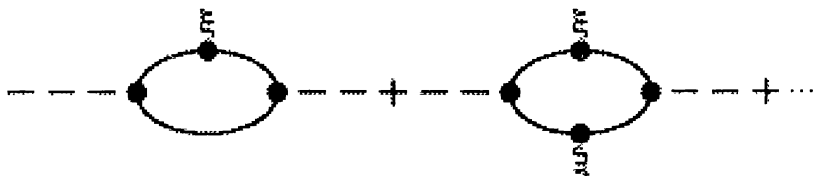


фотоном, если под пунктиром понимать квант, а под линиями с разными стрелками — электрон и позитрон. Точки на графике означают акт взаимодействия кванта с электроном. Каждый квант вносит множитель  $e$ , а весь график показывает, как изменяется закон распространения электромагнитного поля из-за временного рождения пары электрон—позитрон.

Вакуум представляет собой сложную среду, в которой могут виртуально — на время — рождаться пары частица—античастица. Особенно ясно это станет после прочтения следующей главы. Поэтому нет никаких оснований считать, что уравнения Максвелла останутся линейными для сколь угодно сильных полей. Оценим порядок величины поправок к этим уравнениям. Поправку к уравнениям Максвелла лучше всего оценивать по изменению безразмерной величины — диэлектрической постоянной, скажем, в электрическом поле.

Отчего в присутствии внешнего поля изменяется диэлектрическая постоянная, определяющая скорость распространения света в вакууме? Ведь внешнее поле на свет не действует. Механизм состоит в том, что свет на время рождает электрон-позитронную пару, а эти частицы уже взаимодействуют с внешним полем.

На рисунке процесс выглядит так:



Этот рисунок показывает, как изменяется во внешнем поле закон распространения фотона.

Квант на время рождает пару, а электрон и позитрон взаимодействуют с внешним полем (волнистая линия). Каждое включение внешнего поля вносит множитель  $eE$ , где  $E$  — напряженность внешнего поля.

Теперь нетрудно составить безразмерную комбинацию, содержащую поле  $E$ . Так как  $eE$  имеет размерность энергии, деленной на длину, а величина  $\hbar/mc$  — размерность длины, то выражение

$$\beta = \frac{eE\hbar/mc}{mc^2}$$

безразмерно.

Теперь, глядя на рисунок, нетрудно догадаться, как должна выглядеть поправка к диэлектрической постоянной:

$$\delta\epsilon = \frac{e^2}{hc} f\left(\frac{eEh}{m^2c^3}\right)$$

где  $f$  — произвольная функция. Заряд  $e$  входит в первый множитель квадратично, так как предварительно была рождена пара, а поле  $E$  входит в функцию в безразмерной комбинации  $\beta$ . При сравнительно малых полях функцию  $f$  можно разложить в ряд. Он начнется с члена  $\sim E^2$ , ведь  $E$  — вектор, а в ответ может входить только скалярная величина, то есть, квадрат вектора  $E$ .

Итак,

$$\delta\epsilon \sim \frac{e^2}{hc} \cdot \frac{E^2}{E_k^2}.$$

Первый множитель  $e^2/hc = 1/137$ . Величина же  $E_k = m^2c^3/eh$  имеет размерность напряженности поля. Она численно равна  $10^{16}$  В/см.

Даже если приложить громадное поле  $E \sim E_k$ , то и в этом случае поправка к уравнениям Максвелла будет  $\sim 1/137$ .

## КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ЧАСТИЦ И ПОЛЕЙ

Мы уже много раз поминали всеу знак  $h$  — постоянную Планка. Пора приступить к делу и показать не на словах, а на формулах, как эта величина участвует в квантовых явлениях. Одновременно это поможет лучше понять, что представляет собой качественный анализ и как он работает. Мы получим самые важные соотношения квантовой механики, пользуясь только качественными соображениями, отбрасывая несущественные трудности. Мы найдем уровни энергии атома, вращающегося тела, осциллятора, и обсудим следствия применения квантовой механики к электромагнитному и другим полям.

### Квантование атома

Согласно квантовой механике, энергия электрона в атоме может принимать только дискретные значения.

Возможные значения энергии электрона в поле ядра с зарядом  $Z$  (для водорода  $Z=1$ ) даются выражением

$$E_n = \frac{mZ^2e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{2n^2}.$$

Разности значений  $E_n$  для двух разных  $n$  ( $n=1, 2, 3...$ ) определяют с большой точностью возможные частоты наблюдаемых на опыте спектральных линий. Эта формула — результат точного решения уравнения Шрёдингера для волновой функции, описывающей движение электрона. Посмотрим, к чему приводит качественный анализ.

Как мы уже знаем, идея де Бройля состояла в том, что каждая частица, в данном случае электрон, характеризуется волновым процессом с длиной волны

$$\lambda = \frac{2\pi h}{mv},$$

где  $v$  — скорость частицы. Дискретные значения энергии электрона получаются из условия, чтобы на той длине, на которой движется электрон, укладывалось целое число волн. Если радиус орбиты  $r$ , то электрон движется на длине  $2\pi r$  и  $n$ -ному состоянию электрона соответствует условие  $2\pi r/\lambda = n$  или  $v = hn/mr$ . Отсюда нетрудно найти кинетическую энергию в  $n$ -ном состоянии:

$$T_n = \frac{mv^2}{2} = \frac{h^2 n^2}{2mr^2}.$$

Полная энергия электрона складывается из кинетической энергии и потенциальной энергии в поле ядра, которая отрицательна и равна  $-Ze^2/r$ . Полная энергия:

$$E_n(r) = \frac{h^2 n^2}{2mr^2} - \frac{Ze^2}{r}.$$

Длина  $r$  характеризует ту область радиусов, где в основном находится электрон; ее можно оценить из условия, чтобы полная энергия была минимальна. Нетрудно сообразить, что этому соответствуют такие  $r$ , при которых первое слагаемое приблизительно равно второму. Действительно, при малых  $r$ , когда первое слагаемое больше второго, энергия понижается при увеличении  $r$ , а при больших  $r$ , когда второе слагаемое много больше первого,  $r$  выгодно уменьшать. Точный расчет дает для минимума энергии условие  $2T = V$ . Таким образом, получаем:

$$\frac{h^2 n^2}{mr^2} = \frac{Ze^2}{r}, \text{ откуда } r = \frac{h^2 n^2}{mZe^2}.$$

При  $n=1$  это выражение дает правильную оценку для радиуса атома в наинизшем состоянии. Подставляя значение  $r$  в выражение для  $E_n(r)$ , получим:

$$E_n = \frac{mZ^2 e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{2n^2},$$

то есть, в точности то выражение, которое мы приводили. В действительности электрон может с разной вероятностью находиться на любом расстоянии от ядра. Наше упрощение состояло в предположении, что это расстояние определенное, равное  $r$ , и находится из условия минимально-

сти энергии. Разумеется, мы действовали грубо. Поэтому нельзя доверять численному множителю перед формулой. Но все остальное получилось верно! И множитель  $mZ^2e^4/h^2$ , и, что особенно важно, зависимость от «квантового числа»  $n$ .

Точное решение потребовало бы знания основного уравнения квантовой механики — уравнения Шрёдингера, — и очень сложной по школьным понятиям математики. То, что мы нашли, и есть качественное решение, когда результат получается с точностью до неизвестного численного множителя, в несколько раз отличающегося от единицы, но характер зависимости от параметров задачи передается правильно. Качественное решение чрезвычайно облегчает получение точного, поскольку выясняются главные черты явления. Больше того, если есть качественное решение, а точного не удастся получить аналитически, можно найти его с помощью вычислительных машин без особых потерь для понимания задачи.

### Квантование вращения

Как мы сейчас увидим, применение квантовой механики к вращающемуся телу приводит к тому, что момент количества движения может принимать не любые значения, как в классической механике, а значения, кратные величине  $\hbar$ . Это относится и к полному моменту, и к его проекции на какую-либо ось. Поэтому вращающееся тело может наклоняться не под всеми углами, а только под некоторыми. Мы уже говорили об этом в разделе о красоте науки, обсуждая внутренние симметрии.

Для больших тел скачкообразность незаметна из-за малости  $\hbar$ . Иное дело — атомы и молекулы, где момент невелик. Это удивительное явление, названное «пространственным квантованием», было обнаружено экспериментально еще до создания квантовой механики. В 1922 году Отто Штерн и Вальтер Герлах пропускали пучок атомов через неоднородное магнитное поле. Атом представляет собой магнитик с магнитным моментом, пропорциональным угловому моменту. Поэтому атомы с разными проекциями момента на направление магнитного поля отклоняются по-разному. Допустим, момент атома равен единице. Тогда возможны три проекции 1, 0, -1, и после отклонения пучок разобьется на три пучка в соответствии с этими значениями проекции момента. Так и получилось в опыте Штерна—Герлаха.

Получим пространственное квантование из простых рассуждений.

Камень у поверхности Земли может совершать три независимых движения: свободное по двум горизонтальным направлениям, и ускоренное по вертикали под действием силы тяжести. Спутник, огибающий Землю, тоже совершает три независимых движения — по меридиану, по параллели и по направлению к центру Земли.

Точно так же у частицы в поле, зависящем не от углов, а только от расстояния до центра (например, в кулоновском поле ядра), есть три независимых движения: по меридиану, по параллели и по радиусу. Все три эти движения можно квантовать независимо.

Рассмотрим движение по параллели, направив ось  $z$  от Южного полюса к Северному. Найдем соответствующую длину волны частицы. Обозначим расстояние до оси вращения через  $\rho$ . Тогда

$$\lambda = \frac{2\pi h}{mv} = \frac{2\pi h\rho}{M_z}.$$

Здесь  $M_z$  — момент количества движения вокруг оси  $z$ , или, что одно и то же — проекция полного момента на ось  $z$ . На длине  $2\pi\rho$  должно уложиться целое число волн, иначе не получится стоячей волны. Совершив полный оборот и придя в ту же точку на параллели, мы должны иметь то же самое значение волновой функции, что и до оборота. Таким образом,  $2\pi\rho = n\lambda$ , где  $n$  — целое число. Из выражения для  $\lambda$  получаем:

$$M_z = nh.$$

Проекция момента есть целое число, умноженное на  $h$ . Максимальное возможное значение проекции получается, когда полное вращение происходит по оси  $z$ . Тогда  $M_z = M = n_{\text{п}} h$ . Мы получили, что и полный момент квантовой системы есть целое число, умноженное на  $h$ .

Будем измерять момент и его проекцию в единицах  $h$ . Мы видим, что проекция момента принимает все возможные целые значения от  $-M/h$  до  $M/h$ . Для момента  $M/h = 1$ ,  $M_z/h = 1, 0, -1$ .

Есть частицы, которые благодаря внутреннему движению имеют полуцелый спин (момент, деленный на  $h$ ); например, спин электрона и протона равен  $1/2$ . Неудивительно, что для описания внутреннего движения частиц наша простая схема не годится. Но полученный результат мало изменится, если в полном моменте участвуют частицы со спином  $1/2$ , как в атоме водорода, где есть только один электрон, спин которого не скомпенсирован другими. Полный момент электрона и его проекция принимают не целые значения, а полуцелые. Так, для основного состояния спин электрона в атоме водорода равен  $1/2$ , а проекции:  $1/2, -1/2$ .

## Квантовый осциллятор

Для применения квантовой механики несущественно, как реализован осциллятор — представляет ли он собой груз, подвешенный на пружине, или колебательный контур.

Обозначим через  $q$  «обобщенную» координату осциллятора — это может быть величина смещения груза из положения равновесия или заряд на обкладках конденсатора в случае колебательного контура. Запишем энергию осциллятора в виде суммы кинетической и потенциальной энергии:

$$E = \frac{\beta q'^2}{2} + \frac{\gamma q^2}{2}.$$

Здесь  $q'$  — «обобщенная скорость», величина  $\beta$  — «масса», а величина  $\gamma$  — «жесткость» осциллятора. Можно представить, что осциллятор — некая «частица» с массой  $\beta$ , которая колеблется на пружине с жесткостью  $\gamma$ . Введем длину волны  $\lambda$  волнового процесса, связанного с нашей «частицей»,  $\lambda = 2h/\beta q'$ .

В знаменателе, как и в случае электрона, стоит произведение «массы» на «скорость» частицы. Поскольку «частица» движется в области от  $-q$  до  $q'$ , то для образования стоячей волны на «длине»  $2q$  должно



укладываться целое число полуволен:  $2q/(\lambda/2) = n + 1$ ;  $n = 0, 1, 2, 3$ . Сначала найдем скорость

$$q'_n = \frac{2\pi h}{\beta \lambda} = \frac{\pi h(n+1)}{2\beta q}.$$

Наинизшее значение  $n$  равно нулю — на длине  $2q$  укладывается половина длины волны — максимум посередине и нули на краях. В этом состоянии неопределенность импульса  $\Delta p \sim p \sim \beta q' \sim h/q$ , в согласии с соотношением неопределенности.

Подставляя выражение для скорости в кинетическую энергию, получим:

$$T_n = \frac{(\pi h)^2}{8\beta} \cdot \frac{(n+1)^2}{q^2}.$$

А для полной энергии получим:

$$E_n(q) = \frac{(\pi h)^2}{8\beta} \cdot \frac{(n+1)^2}{q^2} + \frac{\gamma q^2}{2}.$$

Значение  $q$ , дающее наименьшую энергию, получится, если приравнять кинетическую и потенциальную энергии:

$$q^2 = \frac{\pi h(n+1)}{2\sqrt{\beta \gamma}}.$$

Подставляя в выражение для энергии, найдем:

$$E_n = \frac{\pi h}{2} \sqrt{\gamma/\beta} (n+1) = \frac{\pi}{2} \hbar \omega (n+1); \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Действительно, величина  $\sqrt{\gamma/\beta} = \omega = 2\pi\nu$  представляет собой угловую частоту колебаний классического осциллятора. При точном расчете для энергии получается выражение:

$$E_n = \hbar \omega \left( n + \frac{1}{2} \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Таким образом, мы ошиблись только в численном множителе ( $\pi/2$  вместо 1) при  $n$ , а также в численном значении энергии наинизшего состояния, когда  $n=0$  ( $\pi\hbar\omega/2$  вместо  $\hbar\omega/2$ ). Все остальное получилось правильно! Теперь, когда результат получен, задумаемся над тем, что мы использовали для его получения, и что вытекает из полученных нами выражений для энергии осциллятора и для величины  $q^2$ .

Прежде всего мы применили к нашему осциллятору, не интересуясь его устройством, принципы квантовой механики, установленные перво-

начально для электронов. Конечно, естественно ожидать, что общие принципы должны быть такими же и для других частиц с массой, отличающейся от массы электрона. Такое обобщение с большой точностью подтвердилось опытом. Но почему эти же принципы приложимы и к колебательному контуру, где роль «координаты» играет заряд на обкладках конденсатора? Здесь мы использовали предположение, которое много раз применялось в теоретической физике XX века. Если две системы имеют энергию, одинаково зависящую от координат и скоростей, то все свойства таких систем совершенно одинаковы, какой бы смысл ни имели «координаты» и «скорости».

Не было ни одного примера, где это предположение противоречило бы опыту. Поэтому мы вправе считать, что решили задачу о применении квантовой механики сразу для всех возможных осцилляторов.

Что означают полученные результаты? Как они переходят в формулы классической механики? Прежде всего мы получили, что энергия изменяется не непрерывно, а порциями величины  $h$ . Правда, величина  $h$  очень мала (в системе CGS  $h = 10^{-27}$  эрг·с), и для обычных макроскопических осцилляторов эта скачкообразность практически ненаблюдаема. Правильность выражения для энергии осциллятора проверена с большой точностью для многих видов осцилляторов.

Но мы получили еще одно важное свойство квантового осциллятора. Когда энергия минимальна, классический осциллятор находится в покое в положении равновесия, между тем как квантовый в наинизшем состоянии при  $n=0$  совершает так называемые нулевые колебания. Кинетическая и потенциальная энергия этих колебаний порядка  $h\nu$ . Среднее значение координаты осциллятора равно нулю, а среднее значение квадрата координаты дается приведенной выше формулой. Это замечательное свойство квантовых осцилляторов хорошо проверено на опыте и чрезвычайно важно для современной физики.

Если рассматривать звуковые колебания твердого тела как набор квантовых осцилляторов, мы получим, что при абсолютном нуле температуры атомы твердого тела не неподвижны, а совершают нулевые колебания. Это подтвердили опыты по рассеянию света при низких температурах! Если же теперь мы рассмотрим электромагнитные волны как набор осцилляторов в пустом пространстве, то придем к заключению, что в пустоте, даже когда в ней нет ни частиц, ни квантов, должны происходить «нулевые колебания» электромагнитного поля. И эти колебания тоже обнаружены на опыте! Но этот вопрос требует более подробного обсуждения.

### Квантование поля

Что же такое квант? Теперь мы достаточно подготовлены, чтобы ответить на этот вопрос. Мы ввели без объяснения несколько терминов: квантование; волновой процесс, связанный с частицей; квантовый осциллятор... Начали действовать, не очень их понимая, и, тем не менее, знаем теперь, как зависит энергия уровней атома водорода от квантового числа  $n$ ; узнали, что квантовый осциллятор в наинизшем энерге-

тическом состоянии колеблется; даже стали применять результаты квантования осциллятора к такому объекту, как колебания электромагнитного поля в пустоте. А потом неожиданно обнаружили, что начали понимать! Это пример того, как понимание возникает в процессе работы. Ведь если бы мы попытались добиться полного понимания до того, как начали наши простые вычисления, ничего бы не вышло.

Но что же такой квант? Пусть имеются два металлических экрана, расположенных параллельно друг другу. Тогда между ними можно возбудить стоячую электромагнитную волну. Как это делается? Вы знаете, что от антенны радиопередатчика бегут электромагнитные волны, которые, попадая на антенну приемника, превращаются в конечном счете в звук в репродукторе или в изображение на экране телевизора. Представим себе, что такая волна попала в пространство между металлическими экранами и распространяется перпендикулярно им. Если между экранами укладывается целое число полуволн, то возникает стоячая волна. Такая волна возникает и в струне. Если дернуть закрепленную струну, по ней побегут волны, но после отражения от места закрепления установится стоячая волна или несколько стоячих волн разной длины.

Допустим, мы возбуждаем основной тон электромагнитной волны между экранами. Тогда в средней точке амплитуда напряженности электрического поля будет максимальна, и поле в этой точке будет периодически колебаться. Но если какая-то величина периодически колеблется, это означает, что мы имеем дело с осциллятором, надо только выбрать подходящую обобщенную координату. Для нашего осциллятора можно считать координатой напряженность электрического поля в средней точке, а роль скорости при этом будет играть магнитное поле, величина которого пропорциональна скорости изменения электрического поля. Вспомните пример колебательного контура, где потенциальная энергия осциллятора была пропорциональна квадрату заряда конденсатора, то есть, квадрату электрического поля, а кинетическая энергия — квадрату магнитного поля в катушке.

Ясно, что к этому осциллятору применимы те же принципы квантования, что и к любому другому. А раз так, то энергия нашей стоячей волны может изменяться порциями  $\hbar\omega$ .

Если расстояние между экранами  $l$ , то для основного тона имеем:

$$l = \frac{\lambda}{2}$$

Если волна находится в состоянии с  $n=0$  (наинизшее состояние), то говорят, что между экранами нет квантов. Если же волна перешла в состояние с  $n=1$ , то говорят, что появился один квант с длиной волны  $\lambda=2l$ .

Аналогичный результат можно получить для любого обертона, когда на расстоянии  $l$  укладывается  $m$  полуволн. Если  $n_m$  — номер возбужденного состояния  $m$ -той волны, то говорят, что имеется  $n_m$  квантов с длиной волны  $\lambda_m=2l/m$ . Таким образом, номер обертона, определяющего

длину волны, задает сорт квантов (квант с данной длиной волны), а номер возбуждения  $n_m$  дает число квантов данного типа. Обычно принято характеризовать кванты не длиной волны, а величиной, которая называется «волновым вектором».

Эта величина просто связана с длиной волны:  $k = 2\pi/\lambda$ .

Рассмотрим теперь бегущую волну. В этом случае тоже происходят периодические колебания, и энергия для каждого волнового вектора  $k$  имеет вид, полагающийся осциллятору. Энергия волны опять определяется формулой  $E_n = (n + 1/2) \hbar\omega$  и изменяется порциями величины  $\hbar\omega$ , но в отличие от стоячей волны бегущая обладает количеством движения, о чем свидетельствует то, что при поглощении крылышками радиометра она дает им импульс и заставляет вращаться. Поэтому когда номер возбуждения бегущей волны с волновым вектором  $k$  увеличивается на единицу, это означает появление кванта с энергией  $\epsilon = \hbar\omega$  и импульсом (количеством движения)  $p = \hbar\omega/c$ . Последнее соотношение представляет собой уже известную нам дебройлевскую связь импульса с длиной волны.

Таким образом, кванты бегущей волны можно считать дебройлевскими частицами, с которыми связан волновой процесс.

Разумеется, нам не удалось добиться полного понимания, но все-таки на вопрос, что такое световой квант, теперь можно дать ясный ответ. Это порция энергии квантового осциллятора электромагнитной волны с данным волновым вектором.

Кроме того, теперь нам понятно, что такое нулевые колебания электромагнитного поля — это нулевые колебания квантовых осцилляторов, которые соответствуют электромагнитным волнам со всевозможными волновыми векторами; каждому волновому вектору соответствует свой осциллятор.

Применение квантовой механики к другим полям дает аналогичные результаты. Существуют нулевые колебания всех возможных полей, состоящие в появлении и исчезновении электрон-позитронных, нуклон-антинуклонных и других пар, пионов и других мезонов. Как и фотон, эти частицы возникают как возбужденные состояния соответствующего поля. Кроме того, существуют поля, которые нельзя считать составленными из частиц, как, например, статическое электрическое или магнитное поле. Понятие поля шире понятия частиц.

Чтобы достичь более глубокого понимания, надо самому решать задачи физики. Пассивное изучение дает лишь слабое представление о тех красотах, которые открываются при самостоятельной работе.

# ПУСТОТА, ЯДРА, ЗВЕЗДЫ

---



**Т**ри далеких друг от друга объекта физического исследования в действительности теснейшим образом связаны между собой. Изучение свойств пустоты — пространства, свободного от частиц, — как физической среды позволяет предсказать неустойчивость вакуума в сильных полях. Из-за этой неустойчивости возникает перестройка вакуума, которая, в свою очередь, приводит к неустойчивости ядерного вещества при большой плотности, в результате чего могут образовываться аномальные ядра со свойствами, непохожими на свойства обычных атомных ядер. А это явление влечет за собой взрыв звезд, имеющих ядерную плотность, — материя звезды разбрасывается и может предохранить звезду от превращения в «черную дыру».

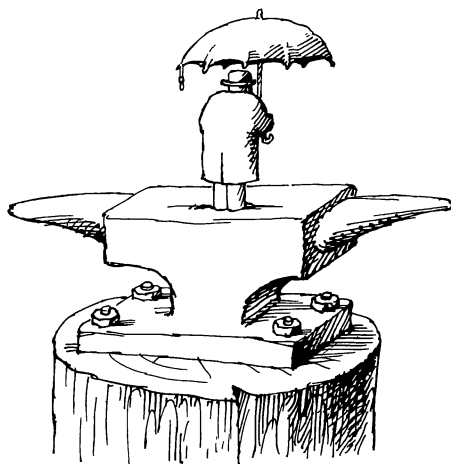
Так все области физики сплетаются в один клубок и являют конкретное воплощение того единства природы, о котором мы говорили в главе о красоте науки.

## КАК УСТРОЕНА ПУСТОТА

Как изменились наши представления о самом распространенном во Вселенной и, быть может, самом важном объекте физических исследований — пустоте?

Что такое пустота: абстрактное понятие, «ничто»,местилище для физических тел?

Что останется, если идеальный насос удалит из замкнутого объема все частицы?



Что находится в межзвездном пространстве, где почти нет вещества?

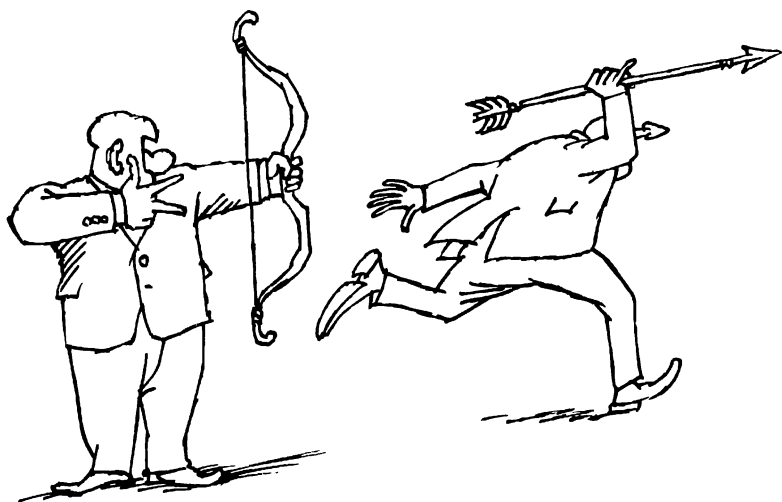
Развитие физики в последнее время показало, что наше физическое пространство — вакуум — не просто геометрический объект, не пространство, в котором ничего нет, а сложная система, обладающая интереснейшими свойствами, совершенно непохожими на свойства твердых сред, жидкостей или газов. Его изучение касается самых глубоких понятий, таких как причинность, связь геометрии с материей, симметрия пространства и времени, связь симметрий с законами сохранения...

### Нельзя толкнуть, не прикасаясь

Мы знаем, что тела действуют друг на друга при соприкосновении. Бросим в воду камень — от него побегит волна, всколыхнет плавающие ветки, — воздействие передается от точки к точке. Звук распространяется потому, что давление передается от одного объема среды к соседнему, и т.д. Если накрыть звучащий электрический звонок стеклянным колпаком и откачать воздух, то видно, как молоточек по-прежнему ударяет по колокольчику, но звон исчезает — в пустом пространстве звук не распространяется. В то же время период колебаний маятника, помещенного под колпак, не изменится при удалении воздуха (если пренебречь трением) — значит, не изменяется и сила тяжести.

В отличие от сил, возникающих при распространении звука, электрические, магнитные силы и гравитация действуют и в пустоте; в ней распространяется свет, поэтому мы видим Солнце и звезды.

Естественно предположить, что в пространстве вблизи магнита, заряженного или массивного тела состояние пустоты изменяется. Пространство, окружающее эти тела, находится в «напряженном» состоянии, которое описывается словами: «в пространстве имеется поле». Заряды создают электрическое поле, магнит — магнитное, массивное тело вызывает гравитационное поле. Электрическое поле действует на заряженное тело, магнитное — на магнит, поле силы тяжести — на камень, заставляя их



двигаться. Изменение скорости этих тел объясняется действием поля в той области пространства, где они в данный момент находятся. Сила передается через пустое пространство от точки к точке с помощью полей, как через невидимую жидкость. Такой механизм передачи воздействия называется близкодействием и принят современной физикой.

Но существовало и другое представление — «дальнодействие»: влияние одного тела на другое мгновенно передается на расстояние. На основе этого взгляда Ньютон построил свою теорию тяготения. Предположение о мгновенной передаче воздействия не помешало ему найти закономерности движения небесных тел, с огромной точностью совпадающие с данными наблюдений. Сейчас мы знаем, почему: небесные тела движутся со сравнительно малыми скоростями, а гравитационное взаимодействие распространяется со скоростью света и может считаться в этом случае мгновенным.

Идею дальнодействия трудно согласовать со свойствами света: было известно, что свет распространяется с конечной скоростью и проходит все промежуточные точки на линии светового луча. Особенно хорошо это видно, когда луч света проходит в тумане — он непрерывен. Ньютон предположил, что светящееся тело испускает передающие свет частицы — корпускулы. Тогда конечность скорости не противоречит идее дальнодействия, но остаются без объяснения волновые свойства света, доказанные опытами по интерференции и дифракции. Корпускулярная теория Ньютона так и не смогла справиться с объяснением этих явлений.

Через двести с лишним лет после Ньютона, в 1905 году, вышла замечательная работа Эйнштейна о квантовой природе света. Эйнштейн показал, что обнаруженные экспериментально закономерности фотоэффекта (вырывания электронов из атома при облучении) может объяснить только предположение, что свет представляет собой набор частиц — фотонов, — которые взаимодействуют с электронами, вырывая их из атомов. Представление о свете как о волне не могло объяснить главную особенность фотоэффекта, состоящую в том, что энергия вы-

летающего электрона зависит только от частоты, но не от интенсивности света.

В некотором смысле точка зрения Эйнштейна означала возврат к ньютоновой теории корпускул. И снова возник вопрос, на который не смог ответить Ньютон: как объединить оба представления — о волновой и о корпускулярной природе света? Возник важный парадокс, который разрешила квантовая теория, доказавшая, что свет — и волна, и частица, так же как электрон — и частица, и волна. Это представление получило название «квантово-волнового дуализма».

Сейчас нам известно, что в пустоте все взаимодействия — электрическое, магнитное, гравитационное, ядерное — передаются от точки к точке со скоростью, не превышающей скорости света. Если одно тело передвинуть, должна измениться сила тяготения, действующая с его стороны на другое тело. Но если другое тело находится далеко от первого, то пройдет заметное время, прежде чем оно получит воздействие. Где же находится возмущение, когда первое тело уже переместилось, а второе еще не имеет сведений о его новом положении?.. На этот вопрос теория дальнего действия не могла ответить, и многие физики от нее отказались еще в XIX веке.

Для объяснения передачи воздействия на расстояние была придумана специальная среда — эфир, — заполняющая все пространство между частицами вещества. Воздействие передается за счет того, что вокруг заряженных или намагниченных тел эфир деформируется и возникает сила, действующая на другое заряженное или намагниченное тело. Деформация эфира передается последовательно, от точки к точке. Свет распространяется в нем так же, как звук в среде.

Вплоть до начала XX века физики пытались строить эфир по образу и подобию известных твердых и жидких тел, тогда как его свойства следовало изучать сами по себе. Это среда особого рода. Следствием неверного представления о природе пустоты было возникновение интереснейших парадоксов, разрешение которых приводило к созданию новых физических теорий.

### Электромагнитные свойства пустоты

Джеймс Максвелл своими удивительными уравнениями, найденными в 1865 году, объединил разные разделы физики: оптику, электричество, магнетизм.

Начало на этом пути было положено его могучим предшественником Майклом Фарадеем, открывшим в 1831 году закон электромагнитной индукции. Если изменять магнитное поле, пронизывающее проводочное кольцо, то в проводнике возникает электрический ток — заряды в нем начинают двигаться под действием образующегося в пространстве кольцевого электрического поля. Итак, переменное магнитное поле рождает в пустоте переменное электрическое поле.

Еще в 1820 году другой предшественник Максвелла Ханс Эрстед обнаружил, что ток, текущий по проводнику, создает вокруг себя кольцевое магнитное поле. Если периодически изменять напряженность элект-



рического поля в проводнике, возникает переменный ток и переменное магнитное поле. Максвелл высказал гениальную догадку, что магнитное поле создают не только движущиеся заряды, но и само переменное электрическое поле.

Из этих двух замечательных свойств пустоты последовало третье, не менее важное — в пустоте распространяются электромагнитные волны. Когда вблизи антенны радиопередатчика возникает переменное электрическое поле, оно, согласно Максвеллу, образует вокруг себя переменное магнитное поле, а магнитное по закону Фарадея создает уже в соседнем месте переменное электрическое... Так возмущение передается все дальше и дальше.

Из уравнений Максвелла следовало, что электромагнитные колебания должны распространяться со скоростью света. Существование электромагнитных волн экспериментально доказал Генрих Герц в 1886—1889 годах. Естественно было прийти к заключению, что свет — тоже электромагнитная волна. Это предположение было проверено и подтверждено опытом.

Как абстрактно выглядели эти представления во времена Максвелла, и как быстро они стали основой почти всех благ современной цивилизации, от телефона и радио до средств космической связи... Невозможно перечислить всего, что родилось из опытов в маленьких лабораториях XIX века, из смутных догадок великих умов!

Теория Максвелла была триумфом близкодействия: все электромагнитные воздействия передаются через среду — эфир. Но тут же возникли новые противоречия.

Двигается ли эфир вместе с движущимся в нем телом? Эксперименты давали противоречивые результаты, некоторые опыты показывали частичное или полное вовлечение эфира в движение, другие — что эфир вовсе не увлекается движущимся телом. В 1851 году французский физик Арман Физо измерил скорость света в текущей воде и показал, что эфир частично захватывается движущейся средой. В 1881 году американский физик Альберт Майкельсон измерил скорость света вдоль и поперек направления орбитального движения Земли. Если бы эфир был неподвижен, то скорость света вдоль движения Земли складывалась бы из скорости света в эфире и скорости Земли относительно эфира. Оказалось, что скорость света одна и та же, то есть, она не зависит от скорости источника, и если свет действительно распространяется в эфире, значит, эфир полностью увлекается Землей...

Разрешить противоречия эфира предстояло теории относительности.

### **Эфир умер — да здравствует эфир!**

В начале XX века идея близкодействия получила дальнейшее развитие и обоснование в теории относительности и теории тяготения Эйнштейна. Оказалось, что не только электромагнитные, но и гравитационные взаимодействия распространяются в пустоте со скоростью света. Скорость света вошла не только в электродинамику, но и в механику, и в теорию тяготения.

Противоречие между опытом Физо и опытом Майкельсона было сня-

то новой формулой сложения скоростей, вытекавшей из теории относительности, свойства эфира роли здесь не играли. Отпала необходимость в самом понятии эфира, его заменил вакуум — новый непротиворечивый объект. Эфир умер.

Но в науке новое, как правило, не отменяет старого, новые и старые идеи переплетаются и проникают друг в друга. Это убедительно подтверждает история эфира.

В начале XX века казалось, что все свойства пустоты объясняются гравитационными и электромагнитными воздействиями. Но изучение атомных ядер показало, что существуют силы, удерживающие нейтроны и протоны в ядре — ядерные силы. И с точки зрения близкодействия их тоже нужно рассматривать как особое напряженное состояние вакуума. Вакуум обогатился еще одним свойством.

Когда к электромагнитному полю и к полям, описывающим, например, пары частиц электрон-позитрон, протон-антипротон и т.д., применили квантовую механику, оказалось, что в пустоте происходят непрерывные колебания этих полей, рождаются и исчезают элементарные частицы... При столкновениях нуклонов (нейтронов и протонов) из пустоты возникает целый сноп различных частиц. Вакуум полон частицами! Удивительно сложную и интересную среду — вакуум — можно было бы снова назвать эфиром, если бы не боязнь путаницы с наивным понятием XIX века.

### **Квантовая механика вакуумных полей**

Без некоторых минимальных сведений о квантовой механике нельзя составить даже грубую физическую картину явлений, происходящих в вакууме. Поэтому, прежде чем говорить об удивительных свойствах вакуумных полей, нам придется немного отвлечься и обратиться к результатам применения квантовой механики к системам, колеблющимся около положения равновесия, то есть, к осцилляторам, о которых мы уже говорили. Напомним, что, независимо от устройства, энергия осциллятора состоит из двух слагаемых: потенциальной энергии, пропорциональной квадрату некоторой величины, которую можно назвать «обобщенной координатой», и кинетической, пропорциональной квадрату скорости изменения этой «координаты». Для грузика на пружинке «обобщенной координатой» будет его смещение от положения равновесия, для колебательного контура — заряд на обкладках конденсатора. Коэффициент пропорциональности в кинетической энергии определяет «обобщенную массу». Мы называем эти величины «обобщенными», потому что они не зависят от конкретного устройства осциллятора — «координате» совсем не обязательно иметь размерность длины.

Остановим маятник — в положении равновесия его энергия минимальна: и кинетическая, и потенциальная энергия равны нулю. Так ведет себя классический осциллятор. Но вот что получилось, когда к осцилляторам применили квантовую механику.

Один из важнейших принципов квантовой механики — принцип не-

определенности, сформулированный Вернером Гейзенбергом в 1927 году, гласит: некоторые физические величины не могут одновременно принимать определенные значения. Именно такие величины и есть «обобщенная координата» и «обобщенный импульс» — произведение «обобщенной массы» на «обобщенную скорость». Прodelывая мысленные эксперименты, Гейзенберг пришел к заключению, что чем точнее измерять координату электрона, тем менее определенным становится его импульс, и наоборот. Это принципиальное ограничение, которое природа накладывает на понятия координаты и импульса.

Когда квантовую механику применили к осцилляторам, сразу стало ясно, что кинетическая и потенциальная энергия квантового осциллятора не может одновременно равняться нулю, иначе можно было бы определить и координату, и импульс, которые тоже одновременно равнялись бы нулю, что противоречит принципу неопределенности. Квантовый осциллятор, в отличие от классического, не покоится даже в состоянии с наименьшей энергией. Он совершает «нулевые колебания» около положения равновесия.

Это замечательное свойство квантовых осцилляторов хорошо проверено на опыте и чрезвычайно важно для современной физики.

Упругие колебания твердого тела, подобно колебаниям струны, описываются набором осцилляторов разных частот. Если учесть, что осцилляторы должны подчиняться квантовой механике, то получится, что при абсолютном нуле температуры происходят нулевые упругие колебания — атомы твердого тела не неподвижны, а участвуют в нулевых колебаниях. Это подтвердили опыты по рассеянию света в твердых телах при низких температурах.

Электромагнитные колебания в пустоте тоже можно рассматривать как результат колебаний набора осцилляторов. Представим себе, что между параллельными металлическими экранами, перпендикулярно им, образовалась стоячая электромагнитная волна — она получится, если между экранами укладывается целое число полуволн. Стоячая волна возникает в результате сложения бегущих волн, отражающихся от правого и левого экранов.

Напряженность электрического поля в стоячей электромагнитной волне будет периодически колебаться — перед нами снова осциллятор. В качестве «обобщенной координаты» такого осциллятора можно взять напряженность электрического поля в какой-либо точке (например, в той, где амплитуда колебаний напряженности максимальна). Импульсом должна быть величина, пропорциональная скорости изменения «координаты» — это напряженность магнитного поля. Но раз «координата» и «импульс» квантового осциллятора не имеют одновременно определенных значений, значит, энергия электрического («потенциальная») и магнитного («кинетическая») полей не может одновременно равняться нулю.

Даже если в пространстве нет ни одной частицы, ни одного кванта, электрические и магнитные поля совершают нулевые колебания. Последовательное применение квантовой механики к электромагнитному полю, взаимодействующему с электронами, было начато в конце 1920-х годов в работах Дирака и завершено через двадцать лет физиками-теоретиками Фейнманом, Швингером, Томонагой, Дайсоном. Возник раздел теоретической физики — квантовая электродинамика, позволяющая с большой точ-

ностью описывать все процессы взаимодействия электронов между собой и с электромагнитным полем.

Нулевые колебания электромагнитного поля заставляют дрожать электрон, движущийся в атоме, — он как бы превращается в шарик с радиусом, равным амплитуде дрожания. Но шарик взаимодействует с ядром слабее, чем точечный электрон. В результате энергетические уровни атома слегка сдвигаются по сравнению со значением, вычисленным без учета дрожания. Это явление называется «лэмбовским сдвигом» по имени впервые наблюдавшего его экспериментатора Лэмба. Квантовая электродинамика позволяет рассчитать «лэмбовский сдвиг» с огромной точностью. Получилось удивительное совпадение с данными, найденными на опыте.

Еще одно свойство квантового осциллятора — его энергия изменяется дискретными порциями определенной величины: постоянной Планка. В применении к электромагнитному полю это означает, что энергия электромагнитного осциллятора с определенной длиной волны и частотой тоже изменяется такими же дискретными порциями. Когда энергия волны изменяется на одну порцию, говорят, что «появился квант электромагнитного поля». В бегущей электромагнитной волне одновременно с увеличением энергии увеличивается и импульс. Можно сказать, что квантовое поле описывает набор частиц-фотонов (квантов бегущей электромагнитной волны) с разными энергиями и импульсами. В этом и состояла гипотеза световых квантов, развитая Эйнштейном за двадцать лет до того, как ее доказала квантовая электродинамика.

В результате квантования поля само собой возникло понятие частицы как характеристики возбуждения электромагнитной волны с определенной длиной. (Так была решена проблема «дуализма волн-частиц»). Удивительная идея — воспринимать частицы как квантовые состояния осцилляторов некоего поля — оказалась на редкость плодотворной. Она пронизывает всю современную теоретическую физику. Поле оказалось первичным понятием. Элементарные частицы возникают в результате его квантования.

Применение квантовой механики к полям, описывающим не фотоны, а другие частицы, например, электроны и позитроны или пи-мезоны, приводит к очень похожему результату. В пустоте существуют нулевые колебания электрон-позитронного, пионного и вообще полей всех возможных частиц. Эти нулевые колебания проявляются в том, что в вакууме возникают и исчезают пары «частица-античастица»: электрон-позитрон, нуклон-антинуклон... Вакуум наполнен такими не вполне родившимися, образующимися и исчезающими частицами, которые называются «виртуальными», что по-латыни означает «возможные».

Но стоит в вакууме столкнуться двум нуклонам или электрону с позитроном, как виртуальные частицы могут превратиться в реальные — при столкновениях рождаются новые частицы.

Это лишь малая часть удивительных свойств пустоты. В последние годы стало известно, что в пустоте под влиянием внешних полей или высокой температуры могут происходить переходы в другое состояние, подобно плавлению твердых тел. Но самое замечательное — нулевые колебания геометрических свойств пространства, которые, возможно, дадут ключ к пониманию связи сил тяготения с другими силами природы.

### Ливни частиц

При достаточно большой энергии из вакуума рождаются снопы различных частиц и античастиц. Рассмотрим подробнее это явление.

Допустим, протоны падают на вещество и отклоняются от своего пути нуклонами ядер. На опыте измеряется число частиц, отклоненных под тем или иным углом. Чтобы сосчитать количество отклоненных частиц, достаточно знать, какую площадь затеняет каждый отдельный нуклон. Эта площадь называется «поперечным сечением». Зная число нуклонов в единице объема вещества и их поперечное сечение, нетрудно сосчитать и полную затененную площадь, а значит и число рассеянных частиц. И наоборот, из такого опыта можно узнать, как рассеивается протон на отдельном нуклоне. Поперечное сечение для рассеяния нуклона на нуклоне определяется радиусом той области, в которой эти частицы заметно взаимодействуют. (Вспомним, что ядерные силы очень быстро убывают с расстоянием). Квантовая механика иногда вносит серьезные изменения в эту наглядную картину. Медленные частицы имеют большую длину волны, ведь длина волны обратно пропорциональна количеству движения частицы. Мы уже говорили об этом в главе «Как работают физики». По этой причине сечение поглощения очень медленных нейтронов оказывается в сотни и тысячи раз больше геометрических размеров поглощающего их ядра. Однако сейчас это нас не должно беспокоить, мы будем рассматривать частицы с огромной энергией. Их длина волны гораздо меньше размеров эффективного взаимодействия.

Рассмотрим столкновение двух движущихся навстречу протонов с энергией, значительно превышающей энергию их покоя. Что произойдет при столкновении? Как показывает опыт, при столкновении возникают два снопа частиц, летящих в направлении каждого из протонов. Такие снопы в большом количестве наблюдаются на фотопластинках при изучении космических лучей. Их видят и в лабораторных условиях на ускорителях большой энергии.

Каково поперечное сечение при этом процессе? Поскольку длина волны сталкивающихся частиц очень мала, мы вправе ожидать, что сечение определяется геометрическими размерами области взаимодействия двух протонов. Но, как показывает опыт, сечение гораздо больше; оно растет с увеличением энергии и может как угодно превысить площадь геометрических размеров. В чем причина этого явления? Все объясняется виртуальными частицами, которыми наполнен вакуум.

Простые теоретические вычисления показывают, что реальную частицу большой энергии сопровождает облако виртуальных частиц. Чем больше энергия частицы, тем больше частиц в облаке, тем больше поперечные размеры скопища виртуальных частиц. Чем больше энергия частицы, тем легче сделать реальными сопровождающие частицы. Достаточно краем облака задеть другую реальную частицу, как все виртуальные частицы станут реальными. Поэтому и сечение растет с энергией.

## Мерцание геометрии

Теория тяготения Эйнштейна предсказывает еще одно замечательное свойство вакуума: гравитационное поле вблизи тяжелых тел изменяет геометрические свойства пространства — вблизи Солнца геометрия отклоняется от евклидовой, которую мы учим в школе: сумма углов треугольника хоть и мало, но отличается от 180 градусов, отношение длины к окружности — от  $2\pi$ , линия кратчайшего расстояния между двумя точками отличается от проходящей через них прямой. Эти изменения проявляются на опыте — лучи далеких звезд, проходящие вблизи Солнца, искривляются.

Что получится, если к гравитационному полю применить квантовую механику, как это было сделано для электромагнитного поля?

Существуют нулевые колебания гравитационного поля, аналогичные электромагнитным. Но присутствие гравитационного поля, как мы только что говорили, означает изменение геометрии пространства. Квантование тяготения приводит к нулевым колебаниям геометрических свойств. Отношение длины окружности к радиусу колеблется около евклидова значения: чем меньше масштаб, чем меньше радиус кружочка, тем больше отклонения. Колебания геометрии ничтожно малы даже для очень малых размеров. Но можно указать такой масштаб, при котором не останется ничего похожего на евклидову геометрию.

Оценим порядок длины волны нулевых гравитационных колебаний, при которой геометрия делается совсем непохожей на евклидову.  $\zeta$  — степень отклонения геометрии от евклидовой в гравитационном поле — определяется соотношением гравитационного потенциала  $\phi$  и квадрата  $c$ :  $\zeta = \phi/c^2$ . Когда  $\zeta \ll 1$ , геометрия близка к евклидовой; при  $\zeta \sim 1$  всякое сходство исчезает. Энергия колебания масштаба  $l$  равна  $E = \hbar\omega \sim \hbar c/l$  ( $c/l$  — порядок частоты колебаний). Гравитационный потенциал, создаваемый массой  $m$ , на такой длине есть  $\phi = Gm/l$ , где  $G$  — постоянная всемирного тяготения. Вместо  $m$  следует подставить массу, которой, согласно формуле Эйнштейна, соответствует энергия  $E$  ( $m = E/c^2$ ). Получаем  $\phi = GE/lc^2 = Gh/l^2c$ . Разделив это выражение на  $c^2$ , получим величину  $\zeta$ . Приравняв  $\zeta = 1$ , найдем ту длину, на которой полностью искажается евклидова геометрия:

$$P = \frac{\sqrt{Gh/c}}{c}.$$

Эта величина называется «планковской длиной». Подставляя значения  $c$ ,  $G$ ,  $h$  (в системе CGS  $c = 3 \cdot 10^{10}$ ;  $G = 6,7 \cdot 10^{-8}$ ;  $h = 10^{-27}$ ), получим:  $P = 2 \cdot 10^{-33}$  см.

Несмотря на такую малость, эта длина, по-видимому, сыграет важную роль в будущей теории, которая объединит гравитацию со всеми остальными взаимодействиями — электромагнитным, сильным и слабым.

У вакуума есть еще одно свойство: в сильных полях виртуальные частицы превращаются в реальные — вакуум перестраивается. Но об этом дальше.

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВАКУУМА И НЕОБЫЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЯДЕРНОГО ВЕЩЕСТВА

Явления, о которых пойдет речь, еще не обнаружены на опыте. Они пока существуют только на бумаге, как результат теоретических расчетов и оценок. Но эти оценки довольно правдоподобны, а явления настолько важны, что прилагаются серьезные усилия для подтверждения или опровержения предсказаний теории.

Согласно этой теории, ядерное вещество, то есть, вещество, состоящее из нейтронов и протонов, может находиться в различных состояниях — в обычном, в котором оно находится в атомных ядрах, и в необычном, более плотном состоянии (а, возможно, и в нескольких более плотных состояниях). Это могло бы означать, что наряду с обычными ядрами существуют аномальные ядра с другими свойствами (с другой плотностью, с другим отношением заряда к массе, с другой энергией связи нейтронов и протонов).

Как часто бывает в теоретической физике, это явление тесно связано с другим, на первый взгляд, очень далеким — с перестройкой вакуума в сильных полях.

В сильных полях вакуум перестраивается — в нем образуются частицы, или, точнее, появляется поле частиц определенного типа, в зависимости от характера внешнего поля. Такая перестройка подобна фазовому переходу в обычном веществе, например, переходу металла в сверхпроводящее состояние. Поэтому, прежде чем изучать такой сложный объект, как вакуум, полезно вспомнить, что такое обычные фазовые переходы.

### Фазовые переходы

Как известно, одно и то же вещество в зависимости от внешних условий (температуры, давления, магнитного или электрического поля, приложенного к телу, и т. д.) может находиться в разных состояниях (разных «фазах»). Соответствующий переход называется «фазовым переходом». Например, лед (твердая фаза воды) при температуре ниже нуля, но при достаточном давлении плавится — вода переходит из твердой фазы в жидкую. Помимо переходов из твердого в жидкое или из жидкого в газообразное состояние, существует множество самых разных фазовых переходов. Это, например, переходы металлов из нормального состояния в сверхпроводящее, из ферромагнитного — в парамагнитное; переходы в твердых телах, связанные с изменением симметрии кристаллической решетки; переход гелия из нормального в сверхтекучее состояние и т. д. И все это множество явлений описывается единой теорией, основы которой заложил Л. Д. Ландау в 1937 году. С тех пор теория фазовых переходов обогатилась многими новыми идеями и превратилась в одну из интереснейших областей теоретической физики с большим количеством практических применений.

Что же отличает одну фазу от другой и что объединяет все эти разнородные явления? Оказывается, всегда существует некая величина, кото-



рая называется «параметром порядка» и которая равна нулю в одной фазе и отлична от нуля в другой. В случае перехода из твердого состояния в жидкое в качестве параметра порядка можно взять отношение числа атомов, расположенных в правильном порядке (в кристаллической решетке), к полному числу атомов. Ниже точки плавления это отношение равно единице, выше — нулю. При этом переходе параметр порядка изменяется скачком.

В таких случаях переход называется «переходом 1-го рода».

Рассмотрим переход из ферромагнитного состояния в парамагнитное. Ферромагнитное состояние — то, в котором находится вещество в магните. При этом магнитные моменты отдельных атомов имеют преимущественное направление — большинство магнитных моментов расположено вдоль оси магнита. По мере нагревания магнита тепловое движение все больше и больше разбрасывает магнитные моменты по разным направлениям, и при некоторой температуре средний магнитный момент атомов вдоль оси магнита обращается в нуль. Значит, вещество перешло в парамагнитное состояние, в котором магнитные моменты атомов ориентированы беспорядочно. При переходе из ферромагнитного состояния в парамагнитное роль параметра порядка играет среднее значение проекции магнитного момента на ось намагничивания. В точке перехода эта величина обращается в нуль и остается нулем после перехода в парамагнитное состояние.

Таким образом, параметр порядка не испытывает скачка в точке фазового перехода. Такой переход называется «переходом 2-го рода».

Как мы увидим, перестройка вакуума во внешних полях тоже представляет собой фазовый переход 2-го рода. Роль параметра порядка играет величина конденсатного поля, которое возникает после перестройки.



## Фазовые переходы вакуума

Как изменяется вакуум в присутствии внешнего поля, то есть, поля, создаваемого внесенными в вакуум частицами? Небольшая перестройка вакуума происходит даже в слабых полях. Нас будет интересовать перестройка вакуума, внезапно наступающая при достижении некоторого критического значения внешнего поля, перестройка, вызываемая возможностью самопроизвольного рождения частиц определенного типа.

Как мы уже знаем, в вакууме непрерывно рождаются и исчезают всевозможные частицы — он заполнен виртуальными частицами.

Зададимся вопросом: что случится с виртуальными частицами, если в вакууме появится сильное поле? Не сделаются ли они реальными?

Допустим, что в некоторой области пространства создано сильное поле — электрическое, гравитационное или ядерное (поле, создаваемое нуклонами). Пусть поле имеет вид потенциальной ямы. Самый простой пример потенциальной ямы — впадина на поверхности Земли. Когда частица попадает извне в потенциальную яму, ее кинетическая энергия увеличивается, как у камня, скатывающегося с горы.

В вакууме у верхнего края ямы непрерывно рождаются и исчезают всевозможные частицы. Чтобы виртуальная частица стала реальной, ей, согласно формуле Эйнштейна, необходимо передать энергию, равную  $mc^2$ , где  $m$  — масса частицы, а  $c$  — скорость света. Энергия, передаваемая полем частице при ее падении на дно ямы, может пойти либо на увеличение кинетической энергии уже родившейся частицы, либо на превращение виртуальной частицы у верхнего края ямы в реальную частицу, находящуюся на дне.

Что произойдет, если глубина энергетической ямы превысит величину  $mc^2$ , то есть, энергию покоящейся частицы? Тогда при рождении частиц будет выигрываться энергия. Действительно, чтобы создать одну покоящуюся частицу, надо затратить энергию, равную  $mc^2$ , а энергия, выигрываемая при сбрасывании частицы в яму, превышает  $mc^2$ . Следовательно, в присутствии сильного внешнего поля возникает неустойчивость: в вакууме будут рождаться и накапливаться частицы до тех пор, пока они не создадут дополнительное поле, которое сделает дальнейшее рождение частиц энергетически невыгодным. Критические условия достигаются тем легче, чем меньше масса рождающихся частиц.

Наименьшую массу среди заряженных частиц имеют электроны. Однако они, как и все другие частицы со спином  $1/2$ , подчиняются «запрету Паули» и не могут накапливаться в большом количестве — в каждом состоянии может находиться только один электрон.

Гораздо более существенная перестройка вакуума должна происходить в таких полях, в которых возможно рождение частиц с целым спином. Тогда нет «запрета Паули», и частицы могут накапливаться в состоянии наинизшей энергии в любом количестве. Предел накопления определяется только отталкиванием частиц друг от друга. Наименьшую массу среди частиц такого типа имеют пи-мезоны, поэтому наиболее интересно исследование свойств пионного поля и выяснение условий, при которых

возникает пионная неустойчивость вакуума (неустойчивость по отношению к образованию пионного поля).

Такая неустойчивость может возникнуть в достаточно сильном электрическом поле. Вблизи ядра с числом протонов  $Z$  пионная неустойчивость возникает, как показывает расчет, при значениях  $Z > 1500$ .

Ядра с таким зарядом, если не принимать во внимание возможность перестройки вакуума, были бы неустойчивыми из-за громадного кулоновского отталкивания протонов. Однако расчет энергии, выигрываемой от перестройки вакуума, показывает, что этот выигрыш может превысить потерю энергии из-за кулоновского отталкивания. В результате такие «сверхзаряженные» ядра могут оказаться устойчивыми, и не исключено, что они возникли в процессе эволюции Вселенной. В таком случае их следует пытаться искать в космических лучах.

Наиболее интересна пионная неустойчивость вакуума, которая проявляется в достаточно плотной нуклонной среде (в среде, состоящей из нейтронов и протонов). Поскольку пи-мезоны сильно взаимодействуют с нуклонами, такая среда создает ту потенциальную яму, в которой при достаточной плотности возникает неустойчивость вакуума. Как мы увидим, неустойчивость пионного поля в нуклонной среде приводит к большому количеству важных физических следствий и может быть проверена экспериментально. Обсудим это явление подробнее.

### Пионная конденсация

Эффективная потенциальная яма для пионов, создаваемая нуклонным веществом с плотностью  $n$ , имеет глубину

$$U = nA,$$

где  $A$  — амплитуда рассеяния пиона на нуклоне (квадрат этой величины определяет сечение рассеяния). Величина  $A$  играет роль глубины ямы, создаваемой одним нуклоном. Неустойчивость вакуума относительно рождения пионов наступит при увеличении плотности, когда глубина ямы делается больше, чем энергия покоя пиона:

$$U = nA \geq m_\pi c^2.$$

Критическая плотность, при которой начинается перестройка вакуума:

$$n_c = m_\pi c^2 / A.$$

В действительности все обстоит не так просто. Во-первых, амплитуда рассеяния мала при малом импульсе пионов (напомним, что количество движения — импульс — это масса, помноженная на скорость). И неустойчивость возникает не для покоящихся пионов, а для пионов с импульсом, для которого амплитуда рассеяния максимальна. Этот импульс порядка  $m_\pi c$ . Кроме того, при большой плотности нуклонов в этой простой формуле появляются дополнительные слагаемые, которые пока можно найти только приближенно. Поэтому значение критической плотности известно не очень точно: можно только сказать, что она близка к равновесной плотности ядерного вещества (к плотности атомных ядер). Мы будем обозначать эту плотность  $n_0$ . Таким образом,  $n_c \approx n_0$ .

Итак, в нуклонной среде с плотностью большей, чем  $n_c$ , возникает пионное поле. Когда оно делается достаточно большим, отталкивание меж-

ду пионами уменьшает яму и процесс останавливается. Когда плотность нуклонного вещества заметно превышает критическое значение, глубина ямы делается больше энергии покоя — при конденсации выигрывается энергия. Энергия  $E_\pi$ , которая освобождается при конденсации, пропорциональна квадрату превышения плотности над критическим значением:

$$E_\pi = \alpha(n - n_c)^2.$$

Это явление называется «пионной конденсацией». Пионное поле, возникающее при конденсации, называют «конденсатом».

Пионная конденсация приводит к возможному существованию сверхплотных ядер, о которых мы уже говорили, а также ко многим другим физическим следствиям.

Пока такие ядра не обнаружены. Их поисками заняты физические лаборатории многих стран. Теоретическое исследование пионной конденсации и ее следствий началось в 1971 году с работы автора этой книги и продолжается во многих научных центрах.

### **Неустойчивость ядерного вещества при большой плотности**

Самое важное следствие пионной конденсации — неустойчивость нуклонного вещества, которая может возникнуть в результате конденсации. Поясним, в чем физическая причина этой неустойчивости. Пусть критическая плотность нуклонов  $n_c$ , соответствующая пионной конденсации, превышает равновесную плотность  $n_0$  ядерного вещества. Пока нет конденсации, энергия ядерного вещества возрастает с увеличением плотности по сравнению с равновесным значением.

Однако при появлении конденсата, то есть, при  $n > n_c$ , выигрывается энергия. Если выигрыш энергии нарастает с увеличением плотности быстрее, чем проигрыш от сжатия, наступает неустойчивость ядерного вещества. Иными словами, при возникновении пи-конденсата жесткость ядерного вещества уменьшается. Если она делается отрицательной, ядерное вещество станет неустойчивым.

Можно ли вычислить изменение жесткости ядерного вещества при конденсации, и тем самым установить, возможно ли существование более плотного равновесного состояния ядер? К сожалению, в расчеты входят недостаточно хорошо известные в настоящее время величины, характеризующие взаимодействие нуклонов и пи-мезонов в ядерном веществе. Предварительные оценки говорят в пользу того, что одновременно с возникновением конденсации наступает и неустойчивость ядерного вещества. Если эти оценки подтвердятся дальнейшим развитием теории и эксперимента, то отсюда будет следовать, что ядерное вещество должно сделаться неустойчивым уже при плотностях, близких к плотности ядерного вещества в атомных ядрах.

Эта неустойчивость может означать, что наряду с обычным состоянием ядерного вещества, которое существует в атомных ядрах, есть еще одно (или больше, чем одно) необычное устойчивое состояние с большей плотностью. Иными словами, возможны аномальные ядра.

Нет ли пионного конденсата в обычных ядрах? Расчеты дают недоста-

точно точные значения интересующих нас величин. В частности, неточность в вычислении критической плотности  $\rho_c$  такова, что можно допустить обе возможности: критическая плотность  $\rho_c$  может быть как меньше, так и больше равновесной ядерной плотности  $\rho_0$ . Если критическая плотность  $\rho_c > \rho_0$ , то пионный конденсат должен существовать в обычных ядрах.

Присутствие конденсата в обычных ядрах привело бы к большому числу интересных физических следствий, которые можно обнаружить на опыте. Как показывает расчет, конденсатное поле в ядерном веществе должно периодически изменяться в пространстве. Эти периодические изменения передаются нуклонам и приводят к периодической структуре плотности нейтронов и протонов. Периодическая структура плотности протонов, то есть, плотности заряда, могла бы проявиться в рассеянии электронов на ядрах или повлиять на вращательные свойства ядер. Особенно чувствительны к существованию периодической структуры такие процессы рассеяния, которые не происходят в однородном ядерном веществе. Эксперименты подобного рода, по-видимому, показывают, что конденсата в ядрах нет, то есть,  $\rho_c > \rho_0$ . Однако есть много ядерных явлений, которые можно объяснить только близостью к пионной конденсации.

### Пионная степень свободы

В критической точке энергия, которую нужно затратить на рождение пиона, обращается в нуль. В случае, когда плотность меньше критической, но близка к ней, конденсата нет. Но при этом для превращения виртуального пиона в ядре в реальный нужна энергия гораздо меньшая, чем для рождения пиона в пустоте. Конечно, пион в яме не настоящий, его называют «возбуждением с квантовыми числами пиона». Вблизи критической точки эти возбуждения имеют малую энергию; на физическом жаргоне их называют «мягкими».

Таким образом, близость ядерной и критической плотности проявляется в том, что в ядре возникает «мягкая» степень свободы — возбуждения, напоминающие пи-мезон, но с малой энергией («пионная степень свободы»). Взаимодействие между нуклонами в ядре сильно изменяется, благодаря возможности «обмена» такими «мягкими» пионами. Появляется новый механизм взаимодействия нуклонов: один нуклон испускает мягкий пион, другой его поглощает. Обмен мягким пионом заменяет происходящее в пустоте взаимодействие за счет обмена обычным «жестким» пионом. В результате положение некоторых уровней ядра существенно изменяется. Расчет положения уровней с учетом «пионной степени свободы» приводит к хорошему согласию с экспериментом и тем самым подтверждает правильность выбранных при расчете констант. Расчеты позволяют заключить, что ядра находятся в состоянии, очень близком к пионной конденсации. Но даже такие величины, как энергия связи ядра, на которые пионная степень свободы влияет только косвенно, нельзя точно рассчитать без ее учета. Учет пионной степени свободы — необходимый элемент современных ядерных расчетов. После того, как теория подвергается экспериментальной проверке, многое приходится изменять. Оставшееся на жаргоне физиков называется «сухим остатком». Даже если

предсказание об аномальных состояниях ядерного вещества не подтвердится на опыте, обнаружение пионной степени свободы останется «сухим остатком» теории.

### **Возможное существование сверхплотных и нейтронных ядер**

Как мы видели, однородное ядерное вещество при плотности  $n > n_c$ , по-видимому, делается неустойчивым и должно сжиматься. Это заключение можно считать достаточно правдоподобным, поскольку оно сохраняется при варьировании констант теории в широких пределах. Однако отсюда еще не следует, что должны существовать сверхплотные ядра. Для устойчивости таких ядер требуется выполнение ряда условий. Прежде всего энергия такого ядра должна быть меньше суммы энергий покоя нейтронов и протонов, иначе оно распадется на отдельные частицы. Кроме того, ядро должно быть устойчиво относительно деления, то есть, не должно делиться на две и более частей. И, наконец, для того, чтобы аномальные ядра можно было наблюдать в космических лучах, они должны жить достаточно долго для прохождения космических расстояний, то есть, должны быть устойчивы относительно  $\beta$ -распада. Для количественной формулировки этих условий необходимо знать, как изменится энергия ядра от малых плотностей нуклонов  $n \sim n_0$  до плотностей, при которых ожидаются устойчивые аномальные ядра (как показывает расчет, эта плотность в 3—6 раз превышает  $n_0$ ).

Энергия ядра складывается из чисто нуклонной энергии, выигрываемой при образовании конденсата. Так как чисто нуклонная энергия минимальна, при плотности  $n = n_0 \sim n_c$ , то при  $n > n_c$  она растет с ростом  $n$ . Энергия же, освобождающаяся при пионной конденсации, частично или полностью компенсирует возрастание нуклонной энергии.

Энергия ядра, отсчитанная от суммы энергий покоя нуклонов, в зависимости от плотности может иметь два минимума. Первый соответствует обычным ядрам. Второй, если он существует при энергии, меньшей нуля, соответствует аномальным ядрам. Сверхплотные ядра могут оказаться устойчивыми как при  $N \cong Z$ , так и при  $N \gg Z$  («нейтронные ядра»). Расчет показывает, что при некоторых допустимых предположениях о константах взаимодействия нейтронные ядра могут оказаться устойчивыми относительно деления и  $\beta$ -распада. В зависимости от выбора недостаточно хорошо известных параметров нуклон-нуклонного взаимодействия второй минимум может либо отсутствовать, либо лежать ниже нуля, что соответствует устойчивым сверхплотным ядрам; либо лежать выше нуля, и тогда система будет рассыпаться на отдельные нуклоны.

Следует заметить, что расчет нуклонной энергии и энергии, освобождающейся при конденсации при больших плотностях, — очень сложная задача. Ее решение стало возможным только в последние десятилетия XX века, благодаря усилиям советских и зарубежных физиков-теоретиков. Пока получены очень грубые результаты, причем к неточности в выборе параметров взаимодействия добавляется еще и неточность самой теории.

Таким образом, нельзя сделать определенного заключения о существо-

вании аномальных ядер; можно только сказать, что их существование достаточно правдоподобно, чтобы предпринимать самые серьезные усилия для доказательства или опровержения этого предположения.

### **Возможные пути обнаружения аномальных ядер**

Если сверхплотные ядра существуют и имеют большую энергию связи, чем нормальные, то последние должны были бы переходить в сверхплотное состояние. Кроме того, если бы аномальные ядра имелись в природе вместе с нормальными, их можно было бы наблюдать по большой энергии  $\gamma$ -квантов, испускаемых при захвате нейтронов. Пока опыты такого рода давали отрицательный результат.

Представляют интерес поиски стабильных, или короткоживущих  $\beta$ -активных аномальных ядер в продуктах деления обычных ядер.

Возможно, сверхплотные ядра могут образовываться при столкновениях тяжелых ионов с энергиями порядка нескольких сот МэВ на нуклон. Возникающая при этом ударная волна может привести к значительному уплотнению ядерного вещества. Если при этом плотность превысит критическое значение  $\rho_c$ , то начнет образовываться сверхплотная фаза. Независимо от того, существуют устойчивые сверхплотные ядра или нет, пионная конденсация должна существенно повлиять на динамику столкновений.

Можно надеяться обнаружить аномальные ядра в космических лучах. Интересны поиски сверхплотных ядер космического происхождения, накопившихся за космологические времена в поверхностных слоях лунного грунта и в метеоритах.

Наконец, возможность образования сверхплотного вещества в результате пионной конденсации оказывает решающее влияние на эволюцию нейтронных звезд при плотностях, превышающих ядерную. Об этом речь пойдет в следующем разделе.

Трудно сказать, что чаще случалось в истории физики — сначала обнаруживался экспериментальный факт, давая толчок развитию теории, или сначала возникала теория, требующая экспериментальной проверки. Эксперимент и теория постоянно стимулируют друг друга. Если следствия этой теории подтверждаются на опыте, будет сделан существенный шаг в понимании природы. Если же не подтверждаются, теория сохранит свою методическую ценность и послужит основой для более успешных теорий. Как всегда, последнее слово остается за экспериментом.

## **СУДЬБА НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД**

Я попытаюсь рассказать о сверхмощных взрывах звезд и о том, как возникают звезды, состоящие из нейтронов. Теория предсказывает, что в таких звездах может происходить еще не обнаруженный на опыте вид ядерных превращений — образование ядерного вещества с плотностью намного большей, чем плотность атомных ядер (плотность атомных ядер — порядка  $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>).

Для того, чтобы разобраться в этих явлениях, нам придется обращаться

ся ко многим областям физики. Здесь астрономия и теория тяготения переплетаются с физикой элементарных частиц и ядерной физикой.

### Ярче ста миллиардов солнц

Уже в древности астрономы заметили, что время от времени внезапно вспыхивают новые сверхъяркие звезды. Такая вспышка была, например, отмечена китайскими астрономами в 1054 году в Крабовидной туманности, входящей в состав нашей галактики. Сейчас «вспышки сверхновых» хорошо изучены и обнаружены не только в нашей галактике, но и в других звездных скоплениях. За несколько месяцев сверхновая испускает столько же света, сколько целая галактика, в которую входят десятки или сотни миллиардов солнц. По интенсивности и длительности излучения можно было установить, что полная энергия, выделяющаяся при вспышке сверхновой, составляет  $10^{43}$ — $10^{45}$  джоулей. Между тем тепловая энергия звезды в тысячу раз меньше. Значительно меньше и энергия, которая могла бы выделиться при химических превращениях. Откуда же берется громадная энергия сверхновой? Этот вопрос долго оставался без ответа. Надежды объяснить вспышки сверхновых появились только после открытия ядерных реакций, освобождающих энергию в миллионы раз большую, чем химические превращения.

Итак, источником энергии сверхновой могли бы быть ядерные реакции, протекающие внутри звезды. Существует, впрочем, еще более мощный источник — гравитационная энергия звезды. Однако освободить эту энергию можно только с помощью ядерных превращений. Если в ходе ядерных реакций плотность центральной части звезды увеличится, то под действием сил тяготения вещество наружных областей начнет падать к центру, приобретая кинетическую энергию. Иными словами, потенциальная энергия тяготения превратится в кинетическую энергию звездного вещества.

Плотность звезды определяется равновесием между силой тяжести и силой давления вещества звезды. Для того, чтобы звезда сжалась, давление должно уменьшиться. Очень сильное уменьшение давления могло бы произойти при образовании нейтронного вещества, когда протоны и электроны превращаются в нейтроны. Попробуем в этом разобраться.

Давление пропорционально кинетической энергии частиц, из которых состоит вещество. При понижении температуры падает кинетическая энергия частиц и поэтому падает давление. Однако даже при абсолютном нуле температуры кинетическая энергия звезды не равна нулю. Дело в том, что нейтроны, протоны и электроны подчиняются «запрету Паули» — две одинаковые частицы со спином  $1/2$  не могут находиться в одном и том же состоянии. По этой причине даже при абсолютном нуле температуры частицы не покоятся и обладают разными скоростями — как говорится, разбросаны по скоростям. При этом наибольшую кинетическую энергию имеют легкие частицы. Таким образом, главный вклад в давление в звезде вносят электроны, масса которых приблизительно в две тысячи раз меньше массы протона или нейтрона. Неудивительно, что сила тяжести сжимает нейтронное вещество до гораздо большей плот-

ности, чем обычное вещество — ведь при этом легкие частицы заменяются тяжелыми, и давление резко падает.

Если бы в результате ядерных превращений звезда могла превратиться в нейтронную, то это привело бы к резкому сжатию звезды, и за короткое время высвободилась бы громадная энергия. Достаточно ли она для объяснения вспышки сверхновой? Этот вопрос пока остается без ответа. При таком внезапном сжатии звезды должны возникать могучие упругие волны, идущие от центра. Под их действием наружная часть звезды могла бы сбрасываться, превращаясь в горячий газ, который разлетается с громадной скоростью. Свечение этого газа и объясняло бы длительность вспышек сверхновой.

Итак, вспышки сверхновых перестали казаться загадочным явлением — появились надежды объяснить их, как следствие сжатия звезд в ходе ядерных превращений.

Но от догадки до прочно установленного утверждения нужно пройти долгий путь сомнений и доказательств.

В 1932 году Джеймс Чедвик открыл нейтрон. Уже два года спустя астрономы Карл Бааде и Вальтер Цвики сделали предположение, что вспышки сверхновых возникают в процессе рождения нейтронной звезды. Для подтверждения или опровержения этой догадки следовало изучить свойства нейтронного вещества и выяснить, может ли оно образоваться внутри звезды. На это ушло около тридцати лет экспериментального и теоретического исследования ядерной материи.

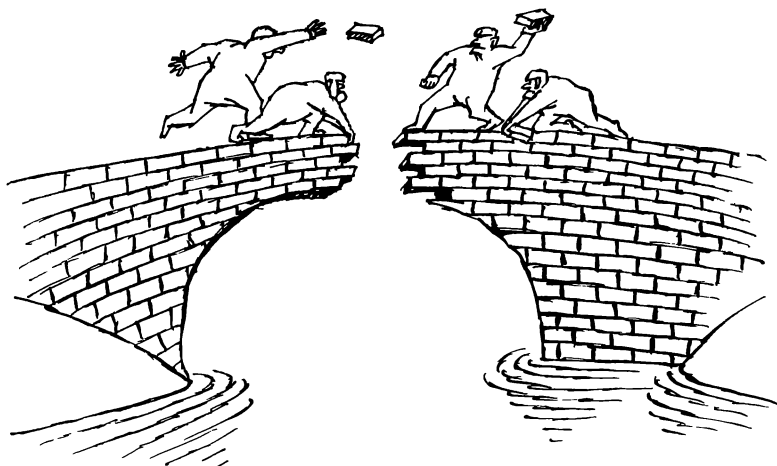
Что же в результате стало известно?

### Нейтронная жидкость

В 1937 году Л. Д. Ландау высказал мысль, что звезда достаточно большой массы должна состоять из нейтронного вещества. Для образования нейтронного вещества атомные ядра и электроны должны превратиться в нейтроны. Допустим, что звезда состоит из кислорода. В ядре каждого атома кислорода имеется восемь нейтронов и восемь протонов. Восемь протонов ядра и восемь электронов, окружающих атомное ядро кислорода, должны превратиться в восемь нейтронов. Эта реакция энергетически невыгодна — на образование каждого нейтрона надо израсходовать несколько миллионов электрон-вольт. Если масса звезды достаточно велика, процесс образования нейтронов с избытком обеспечивается энергией, выделяющейся при сжатии звезды. В 1937 году Ландау показал, что превращение кислорода в нейтронное вещество делается энергетически возможным уже при массе звезды, составляющей малую долю массы Солнца. Однако такое превращение не может произойти сразу, а только через целую цепь ядерных реакций. Каждая из этих реакций требует сравнительно небольшой затраты энергии, которая берется из энергии теплового движения частиц звезды.

Для убедительного доказательства возможности образования нейтронной звезды понадобились детальные сведения о ядерных реакциях и особенно о свойствах нейтронного вещества. Эти сведения были получены из анализа свойств атомных ядер и из опытов по рассеянию нейтронов и протонов на ядрах. Стало, например, известно, что на малых расстоя-





ниях притяжение между нуклонами (нейтронами и протонами) сменяется отталкиванием, что затрудняет сжатие нейтронного вещества до плотности, в несколько раз превышающей ядерную. Некоторые из энергетических уровней ядра связаны с его вращением вокруг собственной оси. Измеряя энергии спектральных линий, испускаемых при переходах между такими уровнями, можно определить моменты инерции ядер.

Моменты инерции оказались значительно меньше, чем они должны быть у шарика того же радиуса и той же плотности, что и ядро. Это значит, что во вращение вовлекается не все вещество ядра. Следовательно, отдельные части ядра могут двигаться без трения друг относительно друга — иначе обязательно завращалось бы все вещество. Теоретический анализ экспериментальных данных по моментам инерции ядер позволил автору этой книги в 1959 году сделать утверждение о том, что нейтронное вещество при ядерной плотности должно быть сверхтекучим, то есть, двигаться без трения вплоть до температур  $T \sim 10^{10}$  К.

Итак, физики пришли к выводу, что под большим давлением из обычного вещества должна образоваться нейтронная сверхтекучая жидкость, которая будет сжиматься в звезде до ядерных плотностей. Однако все заключения о свойствах нейтронного вещества были абстрактной игрой ума, поскольку само существование нейтронных звезд оставалось только правдоподобным предположением вплоть до 1968 года.

### Открытие пульсаров

В 1968 году группа астрономов из Кембриджа открыла звезду с пульсирующим излучением — пульсар. Уже через год десятки пульсаров были обнаружены многими обсерваториями земного шара. Это открытие стало возможным благодаря развитию радиоастрономии, позволяющей обнаруживать объекты со светимостью в  $10^{10}$  меньшей, чем у тех, которые доступны оптическим телескопам.

Пульсары — это звезды, испускающие импульсы радиоизлучения дли-

тельностью в  $10 \div 30$  мкс., следующие строго периодически с периодом порядка  $10^{-2} \div 1$  с. Строжайшая периодичность излучения вместе со сложной формой импульсов навели астрономов, открывших первый пульсар, на мысль о сигналах внеземной цивилизации. Однако после того, как десятки пульсаров обнаружались в разных областях Вселенной, эта мысль отпала сама собой. В самом деле, возникновение жизни — событие крайне маловероятное, и Вселенная не может быть заселена так густо. Предположение же, что все инопланетяне дают о себе знать одинаковым способом, просто нелепо. Чем же объясняется поразительно точная периодичность импульсов радиоизлучения пульсаров?

Детальный анализ всех возможных типов периодических движений привел астрофизиков к однозначному заключению: период пульсара соответствует обращению звезды вокруг своей оси.

Следовательно, пульсар — это звезда, вращающаяся с громадной скоростью: за земные сутки она совершает миллионы оборотов. Сейчас мы увидим, что из этого вытекает важнейшее следствие.

### Пульсары — нейтронные звезды

Чтобы материя звезды не разлеталась при таком быстром вращении, сила тяжести на поверхности звезды должна превосходить центробежную силу. А это возможно только при очень большой плотности звезды. Простой расчет показывает, что пульсар с периодом обращения 0,1 с должен иметь плотность больше  $10^{10}$  г/см<sup>3</sup>. Обычное вещество нельзя сжать до такой громадной плотности. Только нейтронное вещество, которое сжимается до ядерной плотности при массе звезды порядка массы Солнца, может вращаться с угловой скоростью пульсара, не разлетаясь при этом.

Таким образом, физики пришли к заключению, что пульсары и есть те самые нейтронные звезды, существование которых предсказал Ландау.

Подтвердилось и предсказание о сверхтекучести вещества нейтронных звезд. Оказалось, что в некоторых случаях период пульсара внезапно уменьшается. Это явление было названо «сбоем». Уменьшение периода естественно объяснить звездотрясением. Если при звездотрясении звезда делается менее сплюснутой, то ее момент инерции уменьшится, значит, уменьшится и период вращения.

Однако после начала «сбоя», когда звездотрясение уже кончилось, период продолжает уменьшаться еще долгое время: в одном случае несколько суток, в другом — несколько лет. Объяснить столь длительное изменение периода можно, только предположив, что после того, как наружная часть звезды, состоящая из обычного вещества, ускорила свое движение, нейтронная сердцевина продолжает вращаться с прежней скоростью, и лишь через длительное время скорости сравниваются. Но это означает, что нейтронная сердцевина находится в сверхтекучем состоянии! Ведь при обычном трении скорости выровнялись бы за несколько секунд.

Связано ли образование нейтронных звезд со вспышками сверхновых, как предполагали Бааде и Цвики?

Некоторые пульсары расположены там, где вспыхивали сверхновые, — например, пульсар в Крабовидной туманности. Но в большинстве случаев такой связи нет.

Это означает, что иногда нейтронные звезды рождаются без образования сверхновых; и наоборот, некоторые вспышки возникают в результате ядерных реакций, не приводящих к образованию нейтронной звезды с пульсирующим излучением, или, может быть, проявляются после взрыва нейтронной звезды. Но об этом речь пойдет дальше.

Теперь можно приступить к рассказу о судьбе нейтронной звезды, масса которой растет. Масса звезды может увеличиваться от падения на нее небесных тел и за счет притока вещества от соседних звезд меньшей массы. Рост массы приводит к увеличению плотности в центре звезды.

Как мы увидим, при достаточно большой плотности нейтронная жидкость скачком переходит в новое сверхплотное состояние. При этом выделяется громадная энергия и звезда взрывается. Причина этого перехода — неустойчивость вакуума в сильных полях, о которой мы говорили в предыдущем разделе. При большой плотности вещества возникает пионный конденсат.

Но как связана пионная конденсация с интересующей нас судьбой нейтронных звезд?

### **Пионная конденсация в нейтронной жидкости**

Когда плотность в центре нейтронной звезды достигает критического значения, соответствующего пионной конденсации, должен наступить драматический поворот в судьбе звезды. Сначала в центре звезды возникает зародыш нового сверхплотного состояния нейтронного вещества. Такая конфигурация оказывается неустойчивой — по мере увеличения радиуса зародыша освобождается энергия тяготения. В равновесном состоянии значительная часть звезды должна стать сверхплотной. Поэтому сверхплотный зародыш начинает расти — вещество наружных частей звезды с большой скоростью устремляется к границе зародыша. К тому времени, когда радиус сверхплотной сердцевины достигает величины, соответствующей равновесному состоянию, вещество наружных областей продолжает по инерции двигаться, и радиус сердцевины проскакивает свое равновесное значение. Поскольку равновесие нарушено, начинается обратное движение. Таким образом, радиус сверхплотного зародыша сначала резко возрастает, а затем колеблется около значения, сравнимого с радиусом нейтронной звезды. Процесс образования сверхплотной звезды занимает тысячные доли секунды. При этом переходе выделяется энергия, в несколько раз превышающая ту, которая освобождается при образовании нейтронной звезды. Можно ожидать, что под действием упругих волн, возникающих при колебании радиуса сверхплотной сердцевины, наружная часть звезды выбрасывается в сильно нагретом состоянии, и картина взрыва напоминает вспышку сверхновой.

Таким образом, помимо вспышек, вызванных ядерными реакциями

и предшествующих образованию нейтронной звезды, возможны вспышки другой природы, возникающие в результате пионной конденсации и последующего взрыва нейтронной звезды.

К каким последствиям может привести взрыв нейтронной звезды?

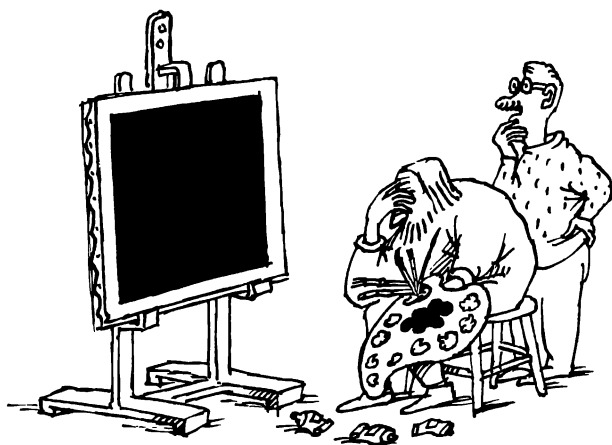
### Черные дыры

Если заключение о взрыве нейтронной звезды, вызванном пионной конденсацией, будет убедительно доказано теоретически или подтвердится наблюдениями, это будет означать, что нейтронные звезды не могут иметь плотность, превышающую критическое значение (как показывает расчет, оно имеет тот же порядок, что и ядерная плотность). Между тем принципиально важно знать, существуют ли звезды с плотностью, значительно превышающей ядерную.

Согласно общей теории относительности, при массе звезды, превышающей 2—3 массы Солнца, возникает гравитационная неустойчивость — звезда начинает сжиматься и после того, как ее радиус делается меньше некоторого критического значения (гравитационный радиус), никакие силы отталкивания не смогут удержать материю от падения к центру — сжимающее давление сил тяжести превышает расталкивающее давление частиц вещества. Это явление называют коллапсом звезды. Оно заканчивается образованием нового объекта — черной дыры.

Черная дыра проявляет себя практически только как источник гравитационного поля. Тело, попадающее в поле черной дыры, падает к ее центру — ведь с увеличением энергии частицы, согласно Эйнштейну, увеличивается ее масса, а, следовательно, и притяжение к черной дыре. Из черной дыры нельзя не только отправить космический корабль, но даже подать световой сигнал.

В двойных звездах материя легкой звезды перетекает к более тяжелой. Анализ излучения перетекающего вещества позволяет в нескольких случаях заподозрить, что тяжелый партнер — черная дыра.



Но если бы оказалось, что нейтронные звезды в результате взрыва, вызванного пионной конденсацией, разбрасывают материю уже при ядерных плотностях, то черные дыры не могли бы образоваться.

Другое явление, вызывающее интерес к сверхплотной материи, состоит в том, что при достаточно большой плотности нейтронное вещество может перейти в новое состояние — кварковую материю.

### Кварковые звезды

Напомним, что говорилось в «Истории одной симметрии». Все сильно взаимодействующие элементарные частицы (именуемые адронами) состоят из нескольких типов кварков — частиц с дробным электрическим зарядом, равным  $-1/3$  или  $+2/3$  от заряда электрона. Нейтрон и протон (адроны) состоят из трех кварков, а пи-мезон — из кварка и антикварка. Кварки, по-видимому, не существуют как свободные частицы. До сих пор все попытки обнаружить отдельный кварк давали отрицательный результат. Но зато на малых расстояниях между ними их свойства настолько хорошо изучены, что сейчас у большинства физиков нет сомнений в реальности этих частиц. Из анализа опытов по рассеянию адронов друг на друге удалось установить, что при сближении кварков взаимодействие между ними уменьшается.

Это явление было названо асимптотической свободой.

При столкновении двух энергичных адронов содержащиеся в них кварки не вылетают, а превращаются в другие нуклоны или пи-мезоны.

Для наглядности можно представить, что адрон — это нечто вроде мешка, в котором кварки движутся свободно, но за пределы которого не могут удалиться. Если сблизить два нуклона на расстояние меньше размера мешка, то получится один общий мешок, где будет уже шесть кварков.

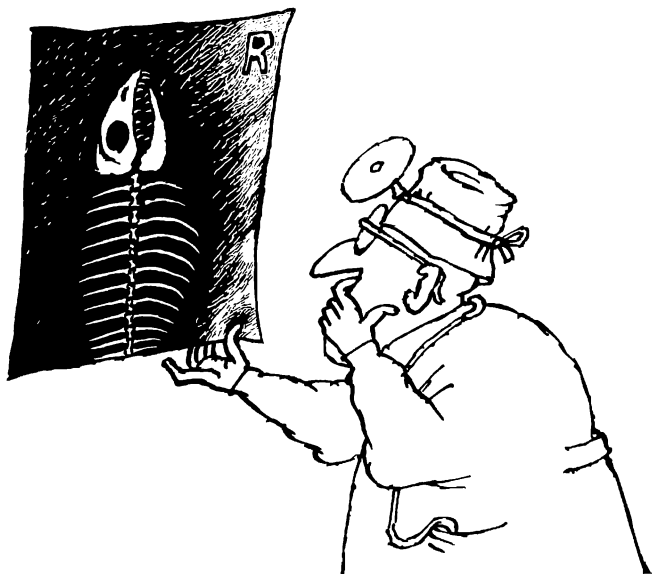
При большой плотности нейтронного вещества, когда расстояния между нейтронами сравнимы с радиусом мешка, нейтроны распадаются на свои составные части — нейтронная материя превращается в кварковую. Как показывают расчеты, звезда делается кварковой, когда ее плотность в 10—12 раз превышает ядерную. При этом переходе выделяется энергия, и может произойти еще один взрыв звезды.

Осуществляется ли в природе кварковое состояние звезды? Или нейтронная материя уже при ядерной плотности взрывается и разбрасывается? Возможно ли, несмотря на это, образование черных дыр? Уже тот факт, что мы можем ставить такие вопросы, показывает, как далеко продвинулась наука в понимании структуры нейтронных звезд.

У каждого из нас свое ощущение красоты Вселенной. Удалось ли мне добавить новые краски к вашей картине мира?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---



Теперь, когда прочитана книга, оглянемся назад, подведем итоги.

Основа работы в любой области науки — научный метод познания. Это не только совокупность технических приемов, как гаммы для музыканта, но и то, что в музыке называется теорией гармонии — фундамент мировоззрения ученого. Научный метод позволяет отличить достоверное от невозможного, отделить самую красивую и даже правдоподобную догадку от доказанного утверждения.

Главное в определении научной истины — эксперимент.

Эксперимент устанавливает факты. Но собрание фактов нужно превратить в стройную систему представлений — теорию, которая дает возможность предсказывать новые явления. И здесь ведущую роль играют интуиция и здравый смысл.

Как альпинисту необходимо не только владеть техникой восхождения, иметь хорошую физическую подготовку, но и обладать особыми личными психологическими качествами, так и ученому, кроме безупречного владения научным методом нужно воспитать себя для подвижнической работы.

Любопытство, желание узнать, как устроена природа, умение удивляться, радоваться любому малому открытию, способность чувствовать красоту — эти качества должны определять выбор научной профессии.

В награду тому, кто решился посвятить себя науке, открывается удивительная стройность, красота природы, скрытая от самого пристального взгляда — из разрозненных явлений возникает единая картина Вселенной.

Все это относится к работе в любой опытной науке — физике, химии, биологии, астрономии... Что же такое теоретическая физика и как рабо-

тают физики-теоретики? Они изучают природу с помощью бумаги и карандаша, выводя новые соотношения между наблюдаемыми величинами, опираясь на ранее найденные экспериментально и теоретически законы природы. Задача теоретической физики — нарисовать по возможности точную картину мира, используя все известные экспериментальные и теоретические факты, интуитивные догадки, которые в дальнейшем будут проверены на опыте. Мы проследили путь теоретиков на примере истории зарождения и развития квантовой теории — это все тот же трудный путь от смутной догадки к научной истине.

Конкретные технические приемы теоретика — качественный анализ, когда почти без вычислений получаются грубые соотношения между величинами, проясняется физическая картина явления, возникает проект решения; и затем получение количественных соотношений с помощью математического аппарата теории.

Подступая к тайнам мироздания, можно увидеть, как далекие друг от друга объекты физического исследования — пустота, ядра, звезды — теснейшим образом связываются между собой. Все области физики сплетаются в один клубок и являют конкретное воплощение единства природы.

Когда изучаешь чужой язык, после долгой зубрежки падежей и грамматических форм, после безнадежного непонимания приходит вдруг чудесный миг прозрения, и незнакомые слова превращаются в сонет Шекспира, комедию Мольера, строки Сервантеса. Такое же чудо ожидает тех, кто изучает язык Природы. Позади сомнения, ошибки, поиски, бесконечные загадки — нам открывается полный чудес, бесконечно прекрасный новый мир.

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

*Адроны* — частицы (барионы и мезоны), участвующие в сильных взаимодействиях.

*Альфа-распад* — радиоактивный распад атомных ядер, когда испускается альфа-частица; при этом заряд ядра уменьшается на 2 единицы, а массовое число на 4.

*Альфа-частица* — ядро атома гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов.

*Антинейтрино* — античастица нейтрино, отличающаяся от него знаком лептонного заряда и спиральностью.

*Античастицы* — отличаются от соответствующих частиц знаками электрического заряда, магнитного момента, барионного или лептонного заряда и странности (или в случае, например, очарованного кварка, знаками очарования).

*Ароматы кварков* — типы кварков. Имеется шесть ароматов — верхний, нижний, странный, очарованный, красивый и высший, еще не обнаруженный на опыте.

*Асимптотическая свобода* — свойство некоторых теорий сильных взаимодействий, состоящее в том, что силы между частицами убывают на малых расстояниях.

*Барионный заряд* (барионное число) — одна из внутренних характеристик барионов. У всех барионов барионный заряд  $+1$ , у антибарионов  $-1$ , у остальных частиц  $0$ .

*Барионы* — сильновзаимодействующие частицы с полуцелым спином.

*Безразмерные величины* — величины, не зависящие от выбора единиц измерения. Так, численное значение длины стола зависит от выбора единицы длины, отношение же длины к ширине — величина безразмерная.

*Бета-распад* — радиоактивное превращение ядер, сопровождающееся испусканием электрона и антинейтрино или позитрона и нейтрино.

*Близкодействие* — представление, согласно которому взаимодействие между удаленными телами осуществляется с помощью среды или каких-то других промежуточных звеньев, передающих взаимодействие от точки к точке с конечной скоростью.

*Больцмана постоянная* — физическая постоянная  $k$ , равная отношению универсальной газовой постоянной  $R$  к числу Авогадро  $N$ :  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  дж/К (Л. Больцман, 1872).



*Бора постулаты* — основные допущения в теории атома Нильса Бора (1913). Они устанавливают правила определения стационарных состояний атома, соответствующих фиксированным значениям его внутренней энергии. Частоты излучения связаны с разностью энергий стационарных состояний соотношением  $\omega_{nm} = (E_n - E_m)/h$ .

*Де Бройля формула* — любой частице с энергией  $E$  и импульсом  $p$  соответствует волна («волна де Бройля») с длиной  $\lambda = 2\pi h/p$  и с частотой  $\omega = E/h$  (Л. де Бройль, 1923).

*Вакуум* — физическое пустое пространство. В квантовой теории поля — наинизшее энергетическое состояние квантового поля. Среднее число частиц в вакууме равно нулю, но в нем происходит рождение и исчезновение виртуальных частиц, влияющих на физические процессы.

*Вектор* — отрезок определенной длины и направления. Векторами изображают «векторные величины» — силу, скорость, электрическое поле...

*Векторный потенциал* — вспомогательная величина, градиенты которой определяют электрические и магнитные поля в каждой точке пространства-времени.

*Великое объединение* — попытка единого объяснения электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий.

*Виртуальные частицы* — в квантовой теории поля частицы, возникающие на короткое время. Взаимодействие между частицами возникает в результате обмена различными виртуальными частицами.

*Внутренние симметрии* — симметрии, характеризующие свойства полей, частиц или явлений, не связанные с преобразованием пространственных координат, как, например, изотопическая симметрия.

*Волновая механика* — см. «квантовая механика».

*Волновая функция* — в квантовой механике основная величина, описывающая состояние системы и позволяющая находить вероятности и средние значения физических величин.

*Волновой вектор* — вектор, направленный вдоль скорости волны, величина которого  $k = 2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны.

*Гамма-квант* — фотон большой энергии, возникающий при квантовых переходах в атомных ядрах и в реакциях элементарных частиц.

*Глобальные симметрии* — симметрии, которым соответствуют операции, не зависящие от пространственной точки, например, когда во всем пространстве происходит одинаковый сдвиг или поворот.

*Глюодинамика* — теория глюонных полей, взаимодействующих между собой в отсутствие кварков. Рассматривается как ступень к изучению хромодинамики.

*Глюонное поле* — поле, осуществляющее взаимодействие между кварками и удерживающее их внутри адронов.

*Глюон* — квант одного из восьми глюонных полей; как и фотон, имеет массу 0 и спин 1.

*Гравитация* — универсальное притяжение между всеми телами. Гравитационное притяжение пропорционально произведению полных энергий взаимодействующих частиц (а не их массе — фотон, имеющий массу, равную 0, отклоняется гравитационным полем Солнца).

*Градиент* (какой-либо величины) — вектор, характеризующий изменения этой величины при перемещении в заданном направлении. Определяется как разность значений величины в двух близких точках, выбранных вдоль заданного направления, деленная на расстояние между этими точками.

*Графики Фейнмана (диаграммы)* — способ получения соотношений между величинами с помощью рисунков, которые иллюстрируют рассматриваемые процессы и расшифровываются в конце работы (Р. Фейнман, 1949).

*Дальнодействие* — представление, согласно которому действие тел друг на друга передается на расстояние без участия среды.

*Дирака уравнение* — квантово-механическое уравнение, описывающее частицы со спином  $1/2$  — электроны, позитроны, мюоны, кварки, — удовлетворяющее требованиям теории относительности (П. Дирак, 1928).

*Дифракция* — отклонение световых лучей при прохождении мимо препятствия, обусловленное волновой природой света.

*Длина волны* — расстояние между волновыми гребнями волнового процесса.

*Дополнительности принцип* — необходимость описывать свойства квантовых объектов на классическом языке измерительных приборов приводит ко многим парадоксам. Согласно принципу дополнительности, сформулированному Нильсом Бором (1927), разрешение этих парадоксов — в дополнительности классического описания и квантовых свойств микрообъектов. В зависимости от условий измерений электрон выступает либо как волна, либо как частица. Определение траектории частицы маскирует ее волновые свойства. Опыт, проявляющий интерференцию, оставляет неопределенной траекторию. Классическое описание и волновые свойства дополняют друг друга.

*Дуализм волн-частиц* — см. «корпускулярно-волновой дуализм».

*Законы сохранения* — некоторые физические величины не изменяются с течением времени при различных процессах — закон сохранения энергии, импульса, момента количества движения, электрического заряда...

*Зарядово-зеркальная симметрия* — инвариантность законов природы относительно зеркального отражения и одновременного изменения зарядов на обратные.

*Зеркальная симметрия* — приближенная инвариантность большинства законов природы относительно зеркального отражения. Грубое нарушение этой симметрии происходит только при переходах, вызванных слабыми взаимодействиями. При химических превращениях, когда возникают зеркально асимметричные молекулы, как правая и левая рука, число образующихся правых молекул равно числу левых.

*Изоспин (изотопический спин)* — внутренняя характеристика адронов, определяющая число частиц  $n$  с близкими свойствами:  $n = 2I + 1$ , где  $I$  — изоспин.

*Изотопическая инвариантность сильных взаимодействий* — независимость сильных взаимодействий от электрического заряда частиц, имеющих заданный изотопический спин.

*Изотропность пространства* — независимость свойств пространства от направления.

*Импульс* — см. «количество движения».

*Инвариантность* — неизменность величины при изменении физических условий или при каких-нибудь преобразованиях, например, при преобразованиях координат и времени при переходе от одной системы отсчета к другой.

*Интерференция* — взаимодействие волн, идущих разными путями от одного источника. В местах, где фазы колебаний совпадают, происходит усиление колебаний, а там, где фазы противоположны, колебания поглощают друг друга.

*Калибровочная инвариантность* — инвариантность электродинамических явлений при изменениях векторного потенциала, сохраняющих величину и направление электрического и магнитного полей в каждой точке. Это локальная симметрия, обеспечивающая, в частности, закон Кулона.

*Квант* — порция энергии электромагнитного поля.

*Квантование вращения* — применение квантовой механики к вращающемуся телу приводит к тому, что момент количества движения и его проекции на какую-либо ось могут изменяться дискретными порциями, равными  $\hbar$ .

*Квантовая механика (волновая механика)* — теория, описывающая законы рассеяния и движения микрочастиц во внешних полях. Ее отличительные черты — вероятностный характер предсказания результатов некоторых измерений и дискретность возможных значений физических величин — энергии электрона в атоме, момента количества движения и его проекции на произвольное направление... Квантовая механика впервые позволила понять структуру атомов и их спектры, природу химической связи; объяснить периодическую систему элементов; понять сверхпроводимость, сверхтекучесть... На ее основе строится теория атомного ядра.

*Квантовая электродинамика* — квантовая теория электромагнитного поля и его взаимодействия с заряженными частицами. Описывает все виды взаимодействия излучения с веществом и электромагнитное взаимодействие с заряженными частицами.

*Квантовые числа* — числа, характеризующие состояния или внутренние свойства частиц — момент, заряд, энергию.

*Кварки* — частицы, из которых состоят адроны. Спин кварков  $1/2$ , электрический заряд  $2/3$  и  $-1/3$ , барионный заряд  $1/3$ . Мезоны состоят из кварка и антикварка, а барионы из трех кварков. Предполагается существование шести типов — ароматов — кварков и соответствующих антикварков. Каждая из этих частиц может находиться в одном из трех цветных состояний.

*К-мезоны (каоны)* — частицы со странностью, нулевым спином и массой около 970 электронных. Имеются два заряженных и два нейтральных К-мезона.

*Количество движения (импульс)* — мера механического движения, равная для материальной точки произведению ее массы на скорость, векторная величина, направленная так же, как скорость точки.

*Коллапс звезды* — катастрофически быстрое сжатие звезды под действием гравитационных сил.

*Кориолиса ускорение* — ускорение, возникающее при переходе в систему координат, вращающуюся вместе с Землей.

*Корпускулярно-волновой дуализм* — представление о том, что любые микрообъекты материи (фотоны, электроны, протоны, атомы и др.) обладают свойствами и частиц, и волн. Квантовая механика снимает это противоречие. В зависимости от характера измерений проявляются либо те, либо другие свойства квантовых объектов.

*Лептоны* — элементарные частицы со спином  $1/2$ , не участвующие в сильном взаимодействии. Существуют три заряженных лептона: электрон  $e^+$  мюон  $\mu^-$  и тритон  $\tau^-$ , и три нейтральных: электронное нейтрино  $\nu_e$ , мюонное нейтрино  $\nu_\mu$ , и тау-нейтрино  $\nu_\tau$ .

*Лептонный заряд* — если приписать лептонам некоторое квантовое число — лептонный заряд, равный  $+1$ , а всем антилептонам лептонный заряд, равный  $-1$ , то так определенный лептонный заряд сохраняется во всех известных процессах.

*Локальная симметрия* — инвариантность законов природы относительно сдвигов, поворотов или других преобразований (см. «калибровочная инвариантность»), различных в разных пространственно-временных точках.

*Майкельсона опыт* — доказал независимость скорости света от движения Земли (1881).

*Мезоны* — адроны с целым спином, не имеющие барионного заряда ( $\rho$ -мезоны,  $K$ -мезоны,  $\pi$ -мезоны и др.), состоят из кварка и антикварка.

*Наблюдательности принцип* — принцип, согласно которому в науку нельзя вводить принципиально ненаблюдаемые величины.

*Нейтрино* — стабильная незаряженная частица со спином  $1/2$ , с нулевой или близкой к нулю массой, лептон, участвует только в слабых и гравитационном взаимодействиях. Существуют три типа нейтрино (см. «лептоны»).

*Нейтронная звезда* — звезда, центральная часть которой состоит из нейтронов (см. «пульсары»).

*Неопределенности принцип* — фундаментальный принцип квантовой теории, согласно которому некоторые («дополнительные») величины, например, координата и импульс, не могут одновременно иметь определенные значения. Для координаты  $q$  и для импульса  $p$  произведение неопределенностей больше или равно  $2\pi\hbar$  (В. Гейзенберг, 1927).

*Неупругое рассеяние* — процесс столкновения, при котором передается энергия, изменяется внутреннее состояние частиц, образуются новые частицы.

*Нуклон* — общее название нейтрона и протона.

*Нулевые колебания* — колебания координаты и скорости осциллятора в основном состоянии; колебания в вакууме полей, описывающих частицы (рождение и исчезновение виртуальных частиц).

*Основное состояние квантово-механической системы* — состояние с наименьшей энергией.

*Осциллятор* — система, колеблющаяся около положения равновесия.

*Параметр порядка* — величина, характеризующая изменение симметрии вещества до и после фазового перехода.

*Паули запрет (принцип)* — две или более тождественные частицы с полупелым спином не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии (В. Паули, 1925).

*Период колебаний* — наименьший промежуток времени, через который система возвращается к исходному состоянию.

*Пи-мезоны (пионы)* — положительный, отрицательный и нейтральный адроны с нулевым спином и нулевой странностью, с массой около 270 электронных.

*Пионная конденсация* — перестройка вакуума под действием электрического поля или в нуклонной среде с образованием дополнительного пионного поля — «конденсата».

*Пионная степень свободы* — ветвь возбуждений ядра с квантовыми числами пиона.

*Планка постоянная* — основная постоянная квантовой теории. Определяет возможные порции энергии осциллятора частоты  $\omega$ :  $E = (n + 1/2)\hbar\omega$  ( $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-27}$  эрг  $\cdot$  с).

*Планковская длина (P)* — длина, на которой квантовые нулевые колебания гравитационного поля полностью искажают евклидову геометрию ( $P = 2 \cdot 10^{-33}$  см).

*Потенциальная яма* — область пространства, в которой потенциальная энергия частицы меньше, чем вне ее.

*Причинности принцип* — принцип, согласно которому причина предшествует следствию.

*Пространства-времени симметрия* — инвариантность явлений природы относительно сдвигов, поворотов и отражений в четырехмерном пространстве-времени.

*Пси-функция* — см. «волновая функция».

*Пульсар* — космический источник периодических импульсов (пульсаций) электромагнитного излучения. Отождествляется с нейтронной звездой, вращающейся с периодом пульсаций.

*Размерность* — выражение, устанавливающее связь физической величины с величинами, положенными в основу физической системы единиц. Так, размерность скорости есть длина, деленная на время. Показывает, как изменяется величина при изменении системы единиц. Независимость физических законов от выбора единиц измерения проявляется в том, что все слагаемые физических уравнений имеют одинаковую размерность.

*Расширение Вселенной* — согласно космологической теории Эйнштейна, Вселенная расширяется (решение А. Фридмана, 1922). Это предсказание подтвердилось астрономическими наблюдениями — звездные скопления разбегаются (Э. Хаббл, 1923) в результате взрыва сверхплотной материи, который произошел приблизительно 14 миллиардов лет назад. Особенно убедительное подтверждение эта картина получила после открытия реликтового излучения.

*Резонансы* — адроны, которые могут распадаться за счет сильного взаимодействия и поэтому живут очень недолго:  $10^{-22} - 10^{-21}$  с.

*Реликтовое излучение* — электромагнитное излучение, оставшееся от того времени, когда Вселенная была сверхплотной, и охладившееся из-за расширения Вселенной.

*Рэлея—Джинса катастрофа* — физический парадокс. Применение статистической физики к стоячим электромагнитным волнам в ящике приводит к бесконечной энергии волн. Разрешение парадокса привело М. Планка (1900) к идее о скачкообразном изменении энергии осцилляторов, излучающих электромагнитные волны. Так впервые появилась величина  $h$  — постоянная Планка.

*Рэлея закон* — интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвертой степени длины световой волны, благодаря чему голубые лучи рассеиваются сильнее, чем красные, чем объясняется голубой цвет неба.

*Сверхновые* — внезапно вспыхивающие звезды с колоссальной энергией излучения. Сверхновые за несколько месяцев излучают столько же энергии, сколько целая галактика. Один из механизмов образования сверхновой состоит в том, что в результате гравитационного сжатия центральная часть звезды превращается в нейтронную звезду, а вещество внешних слоев выбрасывается со скоростью в несколько тысяч километров в секунду.

*Сверхпроводимость* — возникает у некоторых металлов (сверхпроводников) при охлаждении их ниже критической температуры и состоит в обращении в нуль электрического сопротивления и выталкивании магнитного поля из объема образца. Открыта Х. Каммерлинг-Оннесом (1911).

*Сверхтекучесть* — свойство квантовой жидкости протекать без внутреннего трения через узкие щели, капилляры и т.п.; связанное с переходом части атомов жидкости в состояние с нулевым импульсом. Открыта П. Л. Капицей в жидком гелии (1937).

*Связанное состояние* — состояние, например, частицы в потенциальной яме, с энергией, меньшей, чем энергия покоящейся частицы вне ямы. Энергия, которую нужно сообщить частице, чтобы освободить ее, называется энергией связи.

*Сечение рассеяния* — число рассеянных за единицу времени частиц, деленное на плотность падающего на мишень потока. Сечение рассеяния характеризует площадь, затененную рассеивающей частицей.

*Рассеяние* — проходя через вещество, частицы рассеиваются атомами или ядрами среды. Взаимодействие частиц со средой характеризуется числом частиц, рассеянных под заданным углом, деленным на единицу падающего потока частиц. Зная число атомов в единице объема вещества, можно сосчитать сечение отдельного атома или ядра, соответствующее заданному углу рассеяния.

*Сильное взаимодействие* — самое сильное из фундаментальных взаимодействий элементарных частиц, превосходит электромагнитное примерно в 100 раз, радиус действия  $10^{-13}$  см. В сильном взаимодействии участвуют адроны.

*Симметрия* — инвариантность физических объектов относительно каких-либо преобразований, например, относительно сдвигов и поворотов системы координат.

*Скаляр* — величина, не изменяющаяся при поворотах системы координат.

*Слабое взаимодействие* — одно из фундаментальных взаимодействий, в котором участвуют все элементарные частицы; обуславливает большинство распадов (слабые распады) элементарных частиц, взаимодействия нейтрино с веществом и др. В слабом взаимодействии нарушается пространственная четность (зеркальная симметрия) и временная обратимость.

*Соответствия принцип* — принцип, согласно которому теория должна переходить в предшествующую, менее общую, в тех условиях, при которых предшествующая была установлена.

*Спин* — собственный момент количества движения частицы, не связанный с ее движением как целого; измеряется в единицах постоянной Планка  $\hbar$  и может быть целым или полуцелым.

*Спинор* — величина, изменяющаяся по определенному закону при повороте системы координат. Из спинорных величин можно составить квадратичное выражение, не изменяющееся при поворотах (скаляр), а также величину, изменяющуюся как вектор.

*Спиральность* — проекция спина частицы на направление движения. Если спин направлен против движения частицы, спиральность отрицательная («левая»), если по движению — спиральность положительная («правая»). У электрона спиральность может иметь разные значения в зависимости от условий эксперимента. У частиц с массой, равной нулю, спиральность имеет определенное значение; так, у нейтрино она отрицательная: нейтрино — «левая» частица, а антинейтрино — «правая».

*Стационарное состояние* — устойчивое состояние квантово-механической системы, в котором все характеризующие систему физические величины не зависят от времени.

*Странность* — целое (в частности, нулевое) положительное или отрицательное квантовое число, характеризующее адроны. Странность частиц и античастиц отличается по знаку. Странность нарушается в слабом взаимодействии.

*Странные частицы* — элементарные частицы с неравной нулю странностью (например,  $\Xi$ -барион,  $K$ -мезон и др.).

*Тензорные величины* — величины, которые преобразуются при поворотах, как произведения векторов.

*Тонкой структуры постоянная* — определяет взаимодействие электрических зарядов с фотонами:  $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$ .

*Фазовый переход* — переход вещества из одного состояния в другое, отличающееся характером симметрии (параметром порядка). Например, переход жидкость — кристалл.

*Ферми-поля* — поля, описывающие частицы со спином  $1/2$ .

*Физо опыт* — измерение скорости света в движущейся жидкости (1851).

*Флуктуации* — случайные отклонения физических величин от их средних значений, вызываемые тепловым движением или квантово-механической неопределенностью.

*Фотон* — квант электромагнитного поля, нейтральная элементарная частица с нулевой массой и спином  $1$ ; переносчик электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами.

*Фотоэффект* — вырывание светом электронов из атома или протонов из ядра (ядерный фотоэффект).

*Хромодинамика* — теория, описывающая динамику взаимодействующих глюонов и кварков.

*Цвет* — квантовое число, характеризующее цветовое состояние кварка.

*Черная дыра* — космический объект, образующийся при гравитационном коллапсе массивных звезд. Излучение черной дыры заперто гравитацией, обнаружить ее можно лишь по тяготению или по тормозному излучению газа, падающего извне.

*Черное излучение* — равновесное излучение внутри замкнутого ящика с нагретыми стенками.

*Четность* — квантовое число, характеризующее симметрию волновой функции физической системы или элементарной частицы при зеркальном отражении; если при таком преобразовании волновая функция не меняет знака, четность положительна; если меняет — отрицательна.

*Шрёдингера уравнение* — основное уравнение нерелятивистской квантовой механики; позволяет определить возможные состояния системы, а также изменения состояния во времени (Э. Шрёдингер, 1926).

*Электродинамика* — описывает динамику электромагнитного поля, взаимодействующего с заряженными частицами.

*Электромагнитное взаимодействие* — взаимодействие заряженных частиц через электрические и магнитные поля. На квантовом уровне — взаимодействие за счет обмена виртуальными фотонами. Определяет силы между ядрами и электронами в атомах и молекулах, приводит к излучению и поглощению электромагнитных волн заряженными частицами.

*Эфир* — гипотетическая среда, вводившаяся в XVII—XIX веках для обозначения законов распространения света.

*Янга—Миллса уравнения* — уравнения, описывающие динамику глюонного поля.



НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЕ ИЗДАНИЕ  
*Серия «Твой кругозор»*

*Мигдал Аркадий Бенедиктович*

**От догадки до истины**

ДЛЯ СТАРШЕГО ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА

Зав. редакцией *В. И. Егудин*  
Редактор *Е. Г. Таран*  
Художественный редактор *Т. В. Глушкова*  
Компьютерная верстка *А. Н. Кильдин*  
Технический редактор *Р. С. Еникеева*  
Корректор *Е. В. Казакова*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано в печать с оригинал-макета 25.11.07. Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура Ньютон. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 12,34. Тираж 10 000 экз. Заказ № 25590.

Открытое акционерное общество «Издательство «Просвещение».  
127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, д. 41.

Отпечатано в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат».  
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, д. 59. [www.sarpk.ru](http://www.sarpk.ru)





Т В О Й      К Р У Г О З О Р

А. Б. Мигдал

# От догадки до истины

АВТОР, КРУПНЕЙШИЙ ФИЗИК-ТЕОРЕТИК, ПИШЕТ  
О ПСИХОЛОГИИ НАУЧНОГО ТВОРЧЕСТВА,  
О ПРЕВРАЩЕНИИ СМУТНОЙ ДОГАДКИ В ИСТИНУ,  
ОТРАЖАЮЩУЮ ТОТ ИЛИ ИНОЙ ЗАКОН ПРИРОДЫ.  
ПРОЧИТАВ КНИГУ, КАЖДЫЙ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫЙ  
ЧИТАТЕЛЬ ОЩУТИТ ВСЮ КРАСОТУ ЛОГИЧЕСКИХ  
ПОСТРОЕНИЙ И УЗНАЕТ, КАКИМИ МЕТОДАМИ  
РУКОВОДСТВУЕТСЯ НАУКА НА ПУТИ К ПОЗНАНИЮ.

«Твой кругозор» — это проверенные временем традиции научно-познавательной литературы для детей. В серию вошли лучшие книги по гуманитарным и естественно-научным предметам, написанные российскими и зарубежными авторами. Книги серии позволят вам расширить кругозор, повысить свой образовательный уровень и стать знатоками в различных областях знаний.

МАТЕМАТИКА РУССКИЙ ЯЗЫК ФИЗИКА ГЕОГРАФИЯ ИСТОРИЯ

ISBN 978-5-09-016005-6



9 785090 160056