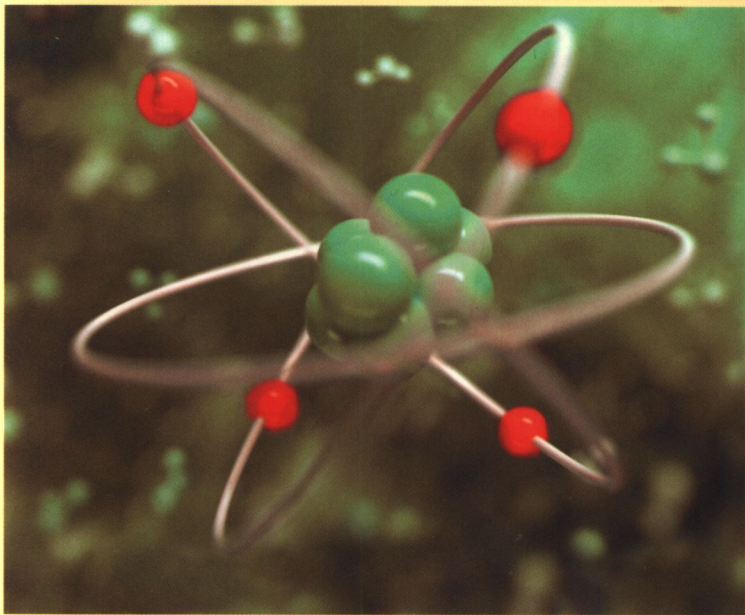




**ФЕЙНМАНОВСКИЕ**

# ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ

*СОВРЕМЕННАЯ НАУКА  
О ПРИРОДЕ*

*Книги, изменившие мир.  
Писатели, объединившие  
поколения.*

Э К С К Л Ю З И В Н А Я    К Л А С С И К А

# **ФЕЙНМАНОВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ**

---

*СОВРЕМЕННАЯ НАУКА О ПРИРОДЕ*



**ИЗДАТЕЛЬСТВО АСТ**  
**МОСКВА**



УДК 53(73)  
ББК 22.3г  
Ф36

Серия «Эксклюзивная классика»

# THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS: THE NEW MILLENNIUM EDITION (1-7)

Перевод с английского  
*А. Ефремова, Г. Копылова, О. Хрусталева*

Под редакцией *Я. Смородинского*

Серийное оформление *А. Фереца, Е. Фerez*

Компьютерный дизайн *Е. Фerez*

Печатается с разрешения Basic Books, an imprint of Perseus Books, LLC, a subsidiary of Hachette Book Group, Inc. (USA) при содействии Агентства Александра Корженевского (Россия)

**Ф36 Фейнмановские лекции по физике. Современная наука о природе / [пер. с англ. А. Ефремова, Г. Копылова, О. Хрусталева]. — Москва : Издательство АСТ, 2025. — 256 с. — (Эксклюзивная классика).**

ISBN 978-5-17-113087-9

В свое время преподаватели Калифорнийского технологического университета задумались о том, как можно было бы перестроить курс физики, чтобы сделать его более занимательным и современным. Изложение материала в старых учебниках было настолько скучным, что отбивало охоту к учению даже у самых усердных студентов. Ричард Фейнман с энтузиазмом подхватил эту идею и разработал новый, авторский курс лекций по общей физике. Читая эти лекции, он, по его собственным словам, ориентировался на самых сообразительных и одаренных, однако постарался учесть интересы и того студента, которого весь этот фейерверк мыслей может встревожить и отпугнуть, и выстроил материал таким образом, чтобы даже у этого студента осталось в голове основное ядро и понимание того, что он может получить в перспективе, продолжив изучение физики на более серьезном уровне.

В настоящее издание включена вступительная часть лекций, посвященная общим законам природы.

УДК 53(73)  
ББК 22.3г

© California Institute of Technology, Michael A. Gottlieb, and Rudolf Pfeiffer, 1963, 2006, 2013  
© Перевод. А. Ефремов, 2018  
© Перевод. Г. Копылов, наследники, 2019  
© Перевод. О. Хрусталева, наследники, 2019  
© Предисловие. Я. Смородинский, наследники, 2019  
© Издание на русском языке AST Publishers, 2025

## От редакции Neoclassic

«Фейнмановские лекции по физике» — одна из интеллектуальных вершин XX века. Это не просто учебник, а точнее — не только учебник. Ведомый гениальным ученым читатель постигает философию естественных наук, самую суть научного метода и научной картины мира.

Данное издание «Лекций» в основном повторяет «мировское» издание 1976—77 гг. В VII-ой том добавлена глава, посвященная эйнштейновской теории тяготения (общей теории относительности), которая отсутствовала в первых изданиях.

Для серии «Эксклюзивная классика» мы взяли первые семь глав лекций, представляющие собой краткий очерк современной науки о природе и доступные даже неподготовленному читателю.

В добрый путь!



## **Предисловие**

### **к первому русскоязычному изданию**

Это лекции по общей физике, которые читал физик-теоретик. Они совсем не похожи ни на один известный курс. Это может показаться странным: основные принципы классической физики, да и не только классической, но и квантовой, давно установлены, курс общей физики читается во всем мире в тысячах учебных заведений уже много лет и ему пора превратиться в стандартную последовательность известных фактов и теорий, подобно, например, элементарной геометрии в школе. Однако даже математики считают, что их науке надо учить по-другому. А уж о физике и говорить нечего: она столь интенсивно развивается, что даже лучшие педагоги все время сталкиваются с большими трудностями, когда им надо рассказывать студентам о современной науке. Они жалуются, что им приходится ломать то, что принято называть старыми, или привычными, представлениями.

Но откуда берутся привычные представления? Обычно они попадают в молодые головы в школе от таких же педагогов, которые потом будут говорить о недоступности идей современной науки. Поэтому прежде чем подойти к сути дела, приходится тратить много времени на то, чтобы убедить слушателей в ложности того, что было ранее внушено им как очевидная и непреложная истина. Было бы дико сначала рассказывать школьникам «для простоты», что Земля плоская, а потом, как открытие, сообщать о ее шарообразности. А так ли далек от этого абсурдного примера тот путь, по которому будущие специалисты входят в современный мир идей теории относительности и квантов? Осложняет дело также то обстоятельство, что большей частью лектор и слушатели — люди разных поколений, и лектору очень трудно уйти от соблазна вести слушателей той знакомой и надежной дорогой, по которой он сам в свое время дошел до желанных высот. Однако старая дорога не вечно остается лучшей. Физика развивается очень быстро, и, чтобы не отставать от нее, надо менять пути ее изучения. Все согласны с тем, что физика — одна из самых интересных наук. В то же время многие учебники физики никак не назовешь интересными. В таких учебниках изложено все, что следует по программе. Там обычно объясняется, какую пользу приносит физика и как важно ее изучать,



но из них очень редко можно понять, почему заниматься физикой интересно. А ведь эта сторона вопроса тоже заслуживает внимания. Как же можно сделать скучный предмет и интересным и современным? Об этом прежде всего должны подумать те физики, которые сами работают с увлечением и умеют передать это увлечение другим. Пора экспериментов уже наступила. Цель их — найти наиболее эффективные способы обучения физике, которые позволили бы быстро передать новому поколению весь тот запас знаний, который накоплен наукой за всю ее историю. Поиски новых путей в преподавании также всегда были важной частью науки. Преподавание, следуя развитию науки, должно непрерывно менять свои формы, ломать традиции, искать новые методы. Здесь важную роль играет то обстоятельство, что в науке все время происходит удивительный процесс своеобразного упрощения, который позволяет просто и кратко изложить то, что когда-то потребовало много лет работы.

Чрезвычайно интересная попытка в этом направлении была предпринята в Калифорнийском Технологическом институте (США), который сокращенно называют КАЛТЕХ, где группа профессоров и преподавателей после многочисленных дискуссий разработали новую программу по общей физике, а один из участников этой груп-

пы, крупный американский физик Ричард Фейнман, прочел лекции.

Лекции Фейнмана отличаются тем, что они обращены к слушателю, живущему во второй половине XX века, который уже многое знает или слышал. Поэтому в лекциях не тратится время на объяснение «ученым языком» того, что и так известно. Зато в них увлекательно рассказывается, как человек изучает окружающую его природу, о достигнутых сегодня границах в познании мира, о том, какие проблемы наука решает сегодня и будет решать завтра.

Лекции читались в 1961–1962 и 1962–1963 учебных годах; они записывались на магнитофон, а потом (и это оказалось само по себе трудной задачей) «переводились» на «письменный английский» профессорами М. Сэндсом и Р. Лейтоном. В этом своеобразном «перевode» сохранены многие особенности живой речи лектора, ее живость, шутки, отступления. Однако это очень ценное качество лекций отнюдь не было главным и самодовлеющим. Не менее важным были созданные лектором оригинальные методы подачи материала, в которых отразилась яркая научная индивидуальность автора, его точка зрения на пути обучения студентов физике. Это, разумеется, не случайно. Известно, что и в своих научных работах Фейнман всегда находил новые методы, которые очень быстро становились об-

щепринятыми. Работы Фейнмана по квантовой электродинамике, статистике принесли ему широкое признание, а его метод — так называемые диаграммы Фейнмана — используется сейчас практически во всех областях теоретической физики.

Что бы ни говорили об этих лекциях — восторгались стилем изложения или сокрушались по поводу ломки старых добрых традиций, — одно остается бесспорным: надо начинать педагогические опыты. Наверное, не все согласятся с манерой автора излагать те или иные вопросы, не все согласятся с оценкой целей и перспектив современной физики. Но это послужит стимулом к появлению новых книг, в которых получают отражение другие взгляды. Это и есть эксперимент.

Но вопрос состоит не только в том, что рассказывать. Не менее важен и другой вопрос — в каком порядке это надо делать. Расположение разделов внутри курса общей физики и последовательность изложения — вопрос всегда условный. Все части науки настолько связаны друг с другом, что часто трудно решить, что надо излагать сначала, а что потом.

Однако в большинстве вузовских программ и имеющихся учебников до сих пор сохраняются определенные традиции.

Отказ от привычной последовательности изложения — одна из отличительных особенностей

фейнмановских лекций. В них рассказано не только о конкретных задачах, но и о месте, которое занимает физика в ряду других наук, о путях описания и изучения явлений природы. Вероятно, представители других наук — скажем, математики — не согласятся с тем местом, которое отводит этим наукам Фейнман. Для него, как физика, «своя» наука, конечно, выглядит самой главной. Но это обстоятельство не занимает много места в его изложении. Зато в его рассказе ярко отражаются те причины, которые побуждают физика вести тяжелую работу исследователя, а также те сомнения, которые у него возникают, когда он сталкивается с трудностями, кажушимися сейчас непреодолимыми.

Молодой естествоиспытатель должен не только понять, почему интересно заниматься наукой, но и почувствовать, какой дорогой ценой достаются победы и как порой бывают тяжелы дороги, к ним ведущие.

Надо также иметь в виду, что если сначала автор обходился без математического аппарата или использовал лишь тот, который изложен в лекциях, то от читателя, по мере продвижения его вперед, будет требоваться увеличение его математического багажа. Впрочем, опыт показывает, что математический анализ (по крайней мере, его основы) выучивается сейчас легче, чем физика.

Лекции Фейнмана вышли в США в трех больших томах. Первый содержит в основном лекции по механике и теории теплоты, второй — электродинамику и физику сплошных сред, а третий — квантовую механику. Чтобы книга была доступна большому числу читателей и чтобы ею было удобнее пользоваться, русское издание будет выходить небольшими выпусками. Первые четыре из них соответствуют первому тому американского издания.

Кому будет полезна эта книга? Прежде всего — преподавателям, которые ее прочтут целиком: она заставит их задуматься об изменении сложившихся взглядов на то, как начинать обучать физике. Далее, ее прочтут студенты. Они найдут в ней много нового в дополнение к тому, что они узнают на лекциях. Конечно, ее попытаются читать и школьники. Большинству из них будет трудно одолеть все, но и то, что они смогут прочесть и понять, поможет им войти в современную науку, путь в которую всегда бывает трудным, но никогда не бывает скучным. Тому, кто не верит, что может пройти его, не стоит браться за изучение этой книги! И наконец, ее могут читать все остальные. Читать просто так, для удовольствия. Это тоже очень полезно. Фейнман в своем предисловии оценивает результаты своего опыта не очень высоко: слишком малая

доля студентов, прослушавших его курс, усвоили все лекции. Но так и должно быть.

Первый опыт редко приносит полный успех. Новые идеи всегда находят вначале лишь немного сторонников и лишь постепенно становятся привычными.

*Я. Смородинский*  
*Январь 1965*

## **Предисловие**

### **Ричарда Фейнмана**

Это — лекции по физике, которые я читал в прошлом и позапрошлом годах в Калифорнийском Технологическом институте для студентов первого и второго курсов. Но это не дословная их запись. Их пригладили — местами очень сильно, а порой не очень. К тому же это лишь часть полного курса обучения. Дважды в неделю 180 слушателей собирались в большой аудитории и, прослушав лекцию, группами по 15–20 человек проводили еще семинары под руководством ассистентов. Вдобавок раз в неделю проводились и лабораторные работы.

Чего мы хотели добиться, читая эти лекции? Мы хотели утвердить интерес к физике у молодых ее энтузиастов, у вчерашних выпускников средней школы. Перед поступлением в институт они много слышали о том, как интересна и как увлекательна современная физика — теория относительности, квантовая механика и т.д. Но если бы этот курс читался так, как он читался

раньше, весь их энтузиазм за два года мало-помалу улетучился бы — чересчур уж редко при обычном обучении встречаются действительно величественные, новые, современные идеи. Студентов заставили бы изучать наклонную плоскость, электростатику и прочее в этом роде, и все их порывы были бы сведены на нет. И весь вопрос был в том, сможем ли мы так построить курс, чтобы у самых способных, самых горячих студентов сохранился и укрепился их энтузиазм.

Не считите эти лекции каким-то обзорным курсом. Нет, курс этот весьма серьезен. Читая его, я ориентировался на самых сообразительных, я хотел по возможности, чтобы даже самые сильные слушатели не были в состоянии до конца усвоить все, что есть в этих лекциях. Для этого я подкидывал им мысли о возможных применениях основных идей и понятий вне основной линии наступления. Для этой цели я старался поточнее формулировать все утверждения, указывать, где только можно, какие уравнения и идеи укладываются в физическую картину мира и как при дальнейшем углублении они могут измениться. Я понимал также, что таким студентам очень важно указать, что из изучаемого они (если, конечно, у них достанет соображения) могут сами вывести из уже известного, а что, наоборот, для них совершенно ново. Формулируя новые идеи, я пытался либо вывести их, если они мог-



ли быть выведены, либо объяснить, что это действительно новая идея, что на уже изученные понятия ее опереть никак нельзя и что поэтому нельзя ее считать доказуемой, а можно лишь включить со стороны.

Приступая к лекциям, я предполагал, что студенты все же кое-что вынесли из средней школы — разные там геометрические оптики, простенькие понятия из химии и тому подобное. Я не видел также смысла в том, чтобы устанавливать какой-то определенный порядок в лекциях, чтоб нельзя было упоминать о вещах, о которых подробно будет говориться только позже. Наоборот, я часто вкратце говорю о том, что студент по-настоящему изучит намного позднее, когда он будет лучше подготовлен. Например, понятие об индуктансе или об энергетических уровнях дается на первых порах очень приблизительное и только спустя много времени развивается как следует.

Рассчитывая курс на самого активного слушателя, я все же учел интересы и такого парня, которого все эти фейерверки мыслей и многосторонние приложения могут только встревожить и отпугнуть, от кого вообще нельзя ожидать, что он усвоит бóльшую часть материала. Я хотел, чтобы для него в лекциях оказалось по крайней мере основное ядро, или костяк, того, что он *может* получить. Я надеюсь, что он не очень будет нерв-

ничать, если не поймет в лекции всего. Пусть не понимает всего, пусть ухватит только самую суть, самое бьющее в глаза. Конечно, и для этого он должен проявить некоторую сообразительность, должен захотеть понять, какие теоремы и представления являются самыми главными, а что он сможет понять только позже и пока оставляет в стороне.

Была у меня одна серьезная трудность, когда я читал эти лекции: не работала обратная связь — от студента к преподавателю; я не видел, насколько хорошо эти лекции доходят. Это очень серьезная помеха, и я поныне не знаю, хороши ли эти лекции. Это по существу эксперимент, и, если бы мне пришлось его проделать еще раз, я бы его поставил иначе, но я надеюсь, что мне не придется браться за это дело вторично! И все же мне кажется, что для первого курса, по крайней мере в отношении физики, все выглядит вполне прилично.

А вот второй частью курса я не очень доволен. В начале этой части, говоря об электричестве и магнетизме, я не смог придумать какого-либо особого, отличного от общепринятого способа изложения, не смог найти такого подхода к теме, который возбуждал бы к ней интерес. С электричеством и с магнетизмом, таким образом, не много мне удалось сделать. После этой темы в конце второго курса я сначала собирался

прочитать несколько лекций о свойствах твердых тел, касаясь главным образом таких вещей, как нормальные колебания, решения уравнения диффузии, колебательные системы, ортогональные функции и т.д., т.е. изложить начала того, что обычно именуют «методами математической физики». Задним числом могу сознаться, что, если бы я решился читать этот курс вторично, то непременно вернулся бы к этому намерению. Но поскольку повторение этих лекций не планируется, а вместо этого мне сказали, что неплохо было бы дать введение в квантовую механику, то это вы и обнаружите в конце настоящего курса.

Совершенно ясно, что студентам, желающим хорошо разобраться в физике, можно было бы подождать с изучением квантовой механики и до третьего курса. Но, возражая, мне выдвинули довод, что многие студенты с моего курса изучают физику только в качестве основы для занятий другими науками. Обычный же способ изучения квантовой механики делает ее почти недоступной для большинства студентов, потому что у них нет возможности так долго изучать ее. А в то же время вся махина дифференциальных уравнений, весь такой подход к квантовой механике редко используется в ее приложениях, в частности в таких более сложных приложениях, как электроника и химия. Поэтому я попробовал описать принципы квантовой механики так, чтобы зна-

ния уравнений в частных производных вначале не требовалось. Даже физику, я думаю, будет интересно такое изложение квантовой механики (по причинам, которые станут ясны из самих лекций). И все же мне кажется, что эксперимент с квантовой механикой не очень удался главным образом из-за того, что мне не хватило времени и конец пришлось скомкать (мне бы нужно было еще 3—4 лекции, чтобы полней изложить такие вопросы, как энергетические полосы и пространственная зависимость амплитуд). Да и, кроме того, я никогда прежде не излагал материал таким способом и отсутствие обратной связи ощущал особенно остро. Теперь я думаю, что квантовую механику надо излагать все-таки позже. Не исключено, что у меня появится возможность еще раз прочесть этот курс. Тогда я сделаю это получше.

В этом курсе нет лекций, посвященных решению задач. Они решались на семинарах. Хотя на трех лекциях я решал задачи, но в курс они не вошли. После лекции о вращающихся системах была прочитана лекция об инерциальной навигации, но, к сожалению, при издании ее опустили. Пятую и шестую лекции прочитал Мэтью Сэндс (я уезжал тогда из города).

Возникает естественный вопрос, насколько этот эксперимент удался. Моя личная точка зрения, которую, впрочем, не разделяют работавшие

со студентами преподаватели, довольно пессимистична. Мне не кажется, что я хорошо поступил со студентами. Когда я наблюдал, как большинство студентов решают задачи на экзаменах, я подумывал о крахе всей моей системы преподавания. Правда, мои друзья напомнили мне, что среди студентов оказался десяток-другой разобравшихся, как это ни странно, почти во всем, активно трудившихся над материалом и подолгу с увлечением мучившихся над трудными вопросами. Эти ребята, на мой взгляд, обладают сейчас первоклассной подготовкой по физике, и я попытаюсь после всего заполучить их к себе на работу. Впрочем, «обучение редко приносит плоды кому-либо, кроме тех, кто предрасположен к нему, но им оно почти не нужно» (Гиббонс).

Тем не менее я не хотел бы бросать ни одного студента на произвол судьбы, как это, видимо, бывало при чтении курса. Как все-таки помочь студентам? Может быть, надо больше поработать над составлением комплекса задач, которые могли бы пролить свет на идеи, развиваемые в лекциях? Задачи дадут хорошую возможность расширить лекционный материал и помогут сделать идеи лекций более осязаемыми и полными, лучше уложить их в голове.

Все же я думаю, что самое лучшее решение проблемы образования — это понять, что самым превосходным обучением является прямая, лич-

ная связь между учеником и хорошим учителем, когда ученик обсуждает идеи, размышляет о разных вещах и беседует о них. Невозможно многому научиться, просто отсиживая лекции или даже просто решая задачи. Но в наше время такое множество студентов должно быть обучено, что для идеалов приходится подыскивать эрзацы. Может быть, мои лекции помогут в этом. Может быть, в тех краях, где можно найти отдельного учителя для каждого ученика, эти лекции смогут вдохновить учителя и подбросить ему кое-какие идеи. Может быть, поразмыслив над ними, он только позабавится, а может, и разовьет их дальше.

*Ричард Фейнман*  
*Июнь 1963*

## **Предисловие**

### **Роберта Б. Лейтона**

В основу этой книги легли лекции по общей физике, которые профессор Р. Фейнман читал в 1961—1962 академическом году в Калифорнийском Технологическом институте. Это — первая половина двухгодичного вводного курса, обязательного для всех студентов КАЛТЕХа. В 1962—1963 академическом году был прочитан второй цикл лекций, чем завершилась основная часть рассчитанной на четыре года работы по перестройке вводного курса физики.

Необходимость такого коренного пересмотра курса вызывалась не только быстрым развитием физики за последние десятилетия, но и тем, что в последние годы первокурсники приходили в КАЛТЕХ с более глубокой математической подготовкой, чем раньше, — результат улучшения преподавания математики в средней школе. Мы хотели, используя преимущества более прочного математического фундамента, изложить поболь-

ше современного материала, что сделало бы курс более интересным, наводящим на размышления и лучше отражающим физику наших дней.

Чтобы иметь представление о том, что надо включить в курс и как это сделать, преподавателям физического факультета было предложено высказать свои идеи в виде краткой программы курса. Возникло несколько проектов перестройки, которые были обсуждены подробно и с пристрастием. Почти все сошлись в одном: перестройку курса нельзя начинать ни просто с переделки уже существующих учебников, ни даже с создания нового учебника; новый курс должен строиться на основе лекций, лекции должны читаться два или три раза в неделю. Создание соответствующих печатных руководств — это будет уже следующий шаг; эти же лекции определяют и содержание будущих лабораторных работ. Вчерне были обрисованы общие контуры курса, но это был лишь предварительный набросок, многое в нем выглядело спорным и могло измениться по усмотрению того, кто взялся бы за чтение лекций.

Обсуждались и многочисленные варианты осуществления проекта. Первоначально предполагалось, что будет создана группа из  $N$  основных участников (лекторов), которые поровну распределят работу: каждый возьмет себе  $1/N$  часть материала, прочтет лекции и подготовит их к печати. Однако отсутствие необходимого числа участ-



ников и трудность выработки среди них единой точки зрения, связанная с индивидуальными вкусами, взглядами и даже характером каждого, сделали этот план неосуществимым.

Счастливая идея о том, как все же можно создать, быть может, не просто новый курс, отличный от других, а, возможно, уникальный, пришла профессору Сэндсу. Он предложил, чтобы профессор Р. Фейнман подготовил и прочел лекции, которые будут записаны на магнитофонную ленту. После обработки и издания этих лекций получился бы новый учебник. Вот суть принятого в конце концов плана.

Сначала ожидалось, что необходимая редакторская работа сведется к подбору рисунков, расстановке запятых и исправлению грамматических ошибок; этим могли бы заняться между делом один-два студента старших курсов. К несчастью, эти надежды жили недолго. Оказалось, что даже простое приведение записей лекций к пригодному для чтения виду, даже без переработки и пересмотра материала лекций, требует много времени. Такая работа не под силу техническому редактору или студенту, она требует пристального внимания физика-профессионала, причем над каждой лекцией он должен потрудиться часов десять-двадцать.

Трудность редакторской работы, а также необходимость как можно скорее передать лекции в руки студентов сильно затруднили окончатель-

ную «доводку» материала, и мы были вынуждены ограничиться созданием предварительного, но годного для издания варианта лекций, который можно было использовать немедленно, хотя и нельзя считать окончательным. Крайняя нужда в большом количестве экземпляров лекций для наших студентов, а также интерес к лекциям студентов и преподавателей других институтов заставили нас издать лекции в их предварительном виде, не дожидаясь окончательной редакции, которой, может быть, никогда и не будет. Мы нисколько не заблуждаемся относительно полноты, связности и логической стройности материала; более того, уже в ближайшем будущем мы собираемся вновь модернизировать курс и думаем, что ни форма, ни содержание его не останутся долго без изменений.

Кроме лекций — наиболее важной части курса, — нужно было позаботиться о задачах, развивающих опыт и умение студентов, и о лабораторных работах, чтобы студенты могли «потрогать руками» изложенный в лекциях материал. Ни то ни другое еще не достигло той законченности, которую имел материал лекций, хотя кое-что в этом направлении, конечно, сделано. Некоторые задачи были придуманы в ходе чтения лекций, они затем были улучшены, а число их увеличено при повторном чтении курса. Однако

мы еще не уверены в том, что эти задачи достаточно разнообразны и углубляют содержание лекций настолько, чтобы студенты могли сами полностью понять, каким мощным аппаратом они владеют. Поэтому задачи будут опубликованы отдельно и в таком виде, который бы допускал их более или менее частую переделку.

Профессор Г. Неер предложил включить в курс несколько новых опытов. Среди них опыты, основанные на использовании воздушных подшипников с чрезвычайно малым трением: новый линейный воздушный желоб, с помощью которого можно количественно изучить одномерное движение, соударения тел и гармоническое движение; а также поддерживаемый на воздушной подушке и движимый воздухом максвелловский волчок, с помощью которого можно изучить вращение с ускорением, прецессию и нутацию гироскопа. Разработка новых лабораторных опытов будет, по-видимому, продолжаться в течение значительного времени.

Этот пересмотр учебной программы возглавляли профессоры Р. Лейтон, Г. Неер и М. Сэндс. Официально в этой работе принимали участие профессоры Р. Фейнман, Г. Нойгебауер, Р. Саттон, Г. Стаблер, Ф. Стронг и Р. Фогт с кафедр физики, математики и астрономии, а также профессоры Т. Кофи, М. Плессет и К. Уилтс с ка-

федры технических наук. Мы сердечно благодарим за ценную помощь всех тех, кто принимал участие в пересмотре курса. Особенно мы обязаны фонду Форда, без финансовой помощи которого эта работа никогда не была бы осуществлена.

*Роберт Б. Лейтон*

*Июль 1963*

# Глава 1

## АТОМЫ В ДВИЖЕНИИ

---

*Введение. Вещество состоит  
из атомов. Атомные процессы.  
Химические реакции*

---

### § 1. Введение

Этот двухгодичный курс физики рассчитан на то, что вы, читатель, собираетесь стать физиком. Положим, это не так уж обязательно, но какой преподаватель не надеется на это! Если вы и впрямь хотите быть физиком, вам придется много поработать. Как-никак, а двести лет бурного развития самой мощной области знания что-нибудь да значат! Такое обилие материала, пожалуй, и не усвоишь за четыре года; вслед за этим нужно еще прослушать специальные курсы.

И все же весь результат колоссальной работы, сделанной за эти столетия, удастся сконденсировать — свести в небольшое число *законов*, которые подытоживают все наши знания. Однако и законы эти тоже нелегко усвоить, и просто нечестно по отношению к вам было бы начинать изучение такого трудного предмета, не имея под

рукой какой-нибудь схемы, какого-нибудь очерка взаимосвязи одних частей науки с другими. Первые три главы и представляют собой такой очерк. Мы познакомимся в этих главах с тем, как связана физика с остальными науками, как относятся эти остальные науки друг к другу, да и что такое сама наука. Это поможет нам «ощутить» предмет физики.

Вы спросите: почему бы сразу, на первой же странице, не привести основные законы, а после только показывать, как они работают в разных условиях? Ведь именно так поступают в геометрии: сформулируют аксиомы, а потом остается только делать выводы. (Неплохая мысль: изложить за 4 минуты то, что и в 4 года не уложишь.) Сделать это невозможно по двум причинам. Во-первых, нам известны *не все* основные законы; наоборот, чем больше мы узнаём, тем сильнее расширяются границы того, что мы должны познать! Во-вторых, точная формулировка законов физики связана со многими необычными идеями и понятиями, требующими для своего описания столь же необычной математики. Нужна немалая практика только для того, чтобы наловчиться понимать смысл *слов*. Так что ваше предложение не пройдет. Придется нам двигаться постепенно, шаг за шагом.

Каждый шаг в изучении природы — это всегда только *приближение* к истине, вернее, к тому,

что мы считаем истиной. Все, что мы узнаём, — это какое-то приближение, ибо *мы знаем, что не все еще законы мы знаем*. Все изучается лишь для того, чтобы снова стать непонятным или, в лучшем случае, потребовать исправления.

Принцип науки, почти что ее определение, состоит в следующем: *пробный камень всех наших знаний — это опыт*. Опыт, эксперимент — это *единственный судья* научной «истины». А в чем же источник знаний? Откуда приходят те законы, которые мы проверяем? Да из того же опыта; он помогает нам выводить законы, в нем таятся намеки на них. А сверх того нужно еще *воображение*, чтобы за намеками увидеть что-то большое и главное, чтобы отгадать неожиданную, простую и прекрасную картину, встающую за ними, и потом поставить опыт, который убедил бы нас в правильности догадки. Этот процесс воображения настолько труден, что происходит разделение труда: бывают физики-теоретики, они воображают, соображают и отгадывают новые законы, но опытов не ставят, и бывают физики-экспериментаторы, чье занятие — ставить опыты, воображать, соображать и отгадывать.

Мы сказали, что законы природы — это приближения; сперва открывают «неправильные» законы, а потом уж — «правильные». Но как опыт может быть «неверным»? Ну, во-первых, по самой простой причине: когда в ваших приборах

что-то неладно, а вы этого не замечаете. Но такую ошибку легко уловить, надо лишь все проверять и проверять. Ну а если не придирается к мелочам, *могут ли* все-таки результаты опыта быть ошибочными? Могут, из-за нехватки точности. Например, масса предмета кажется неизменной; вращающийся волчок весит столько же, сколько лежащий на месте. Вот вам и готов «закон»: масса постоянна и от скорости не зависит. Но этот «закон», как выясняется, неверен. Оказалось, что масса с увеличением скорости растет, но только для заметного роста нужны скорости, близкие к световой. *Правильный закон* таков: если скорость предмета меньше  $100 \text{ км/сек}$ , масса с точностью до одной миллионной постоянна. Вот примерно в такой приближенной форме этот закон верен. Можно подумать, что практически нет существенной разницы между старым законом и новым. И да, и нет. Для обычных скоростей можно забыть об оговорках и в хорошем приближении считать законом утверждение, что масса постоянна. Но на больших скоростях мы начнем ошибаться, и тем больше, чем скорость выше.

Но самое замечательное, что *с общей точки зрения любой приближенный закон абсолютно ошибочен*. Наш взгляд на мир потребует пересмотра даже тогда, когда масса изменится хоть на капельку. Это — характерное свойство общей кар-



тины мира, которая стоит за законами. Даже незначительный эффект иногда требует глубокого изменения наших воззрений.

Так что же нам нужно изучить сначала? Учить ли нам *правильные*, но необычные законы с их странными и трудными понятиями, например теорию относительности, четырехмерное пространство-время и т.д.? Или же начать с простого закона «постоянной массы»? Он хоть и приближенный, но зато обходится без трудных представлений. Первое, бесспорно, приятней, притягательней; первое очень соблазняет, но со второго начать легче, и потом ведь это первый шаг к углубленному пониманию правильной идеи. Этот вопрос встает все время, когда преподаешь физику. На разных этапах курса мы по-разному будем решать его, но на каждой стадии мы будем стараться изложить, что именно сейчас известно и с какой точностью, как это согласуется с остальным и что может измениться, когда мы узнаем об этом больше.

Давайте перейдем к нашей схеме, к очерку нашего понимания современной науки (в первую очередь физики, но также и прочих близких к ней наук), так что, когда позже нам придется вникать в разные вопросы, мы сможем видеть, что лежит в их основе, чем они интересны и как укладываются в общую структуру.

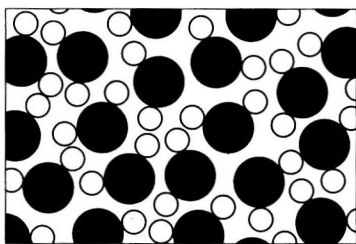
Итак, *как же выглядит картина мира?*

## § 2. Вещество состоит из атомов

Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались бы уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это — *атомная гипотеза* (можете называть ее не гипотезой, а фактом, но это ничего не меняет): *все тела состоят из атомов — маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому*. В одной этой фразе, как вы убедитесь, содержится *невероятное* количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения.

Чтобы показать силу идеи атома, представим себе капельку воды размером 0,5 см. Если мы будем пристально разглядывать ее, то ничего, кроме воды, спокойной, сплошной воды, мы не увидим. Даже под лучшим оптическим микроскопом при 2000-кратном увеличении, когда капля примет размеры большой комнаты, и то мы *все еще* увидим относительно спокойную воду, разве что по ней начнут шнырять какие-то

«футбольные мячи». Это парамедия — очень интересная штука. На этом вы можете задержаться и заняться парамедией, ее ресничками, смотреть, как она сжимается и разжимается, и на дальнейшее увеличение махнуть рукой (если только вам не захочется рассмотреть ее изнутри). Парамедиями занимается биология, а мы прошествуем мимо них и, чтобы еще лучше разглядеть воду, увеличим ее опять в 2000 раз. Теперь капля вырастет до 20 км, и мы увидим, как в ней что-то кишит; теперь она уже не такая спокойная и сплошная, теперь она напоминает толпу на стадионе в день футбольного состязания с высоты птичьего полета. Что же это кишит? Чтобы рассмотреть получше, увеличим еще в 250 раз. Нашему взору представится что-то похожее на фиг. 1.1.



**Фиг. 1.1.** Капля воды (увеличенная в миллиард раз).

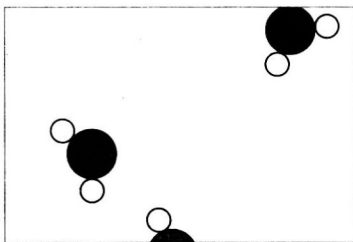
Это капля воды, увеличенная в миллиард раз, но, конечно, картина эта условная. Прежде

всего, частицы изображены здесь упрощенно, с резкими краями — это первая неточность. Для простоты они расположены на плоскости, на самом же деле они блуждают во всех трех измерениях — это во-вторых. На рисунке видны «кляксы» (или кружочки) двух сортов — черные (кислород) и белые (водород); видно, что к каждому кислороду пристроились два водорода. (Такая группа из атома кислорода и двух атомов водорода называется молекулой.) Наконец, третье упрощение заключается в том, что настоящие частицы в природе непрерывно дрожат и подпрыгивают, крутятся и вертятся одна вокруг другой. Вы должны представить себе на картинке не покой, а движение. На рисунке нельзя также показать, как частицы «липнут друг к другу», притягиваются, пристают одна к одной и т.д. Можно сказать, что целые их группы чем-то «склеены». Однако ни одно из телец не способно протиснуться сквозь другое. Если вы попытаетесь насильно прижать одно к другому, они оттолкнутся.

Радиус атомов примерно равен 1 или 2 на  $10^{-8}$  см. Величина  $10^{-8}$  см — это *ангстрем*, так что радиус атома равен 1 или 2 ангстремам (Å). А вот другой способ запомнить размер атома: если яблоко увеличить до размеров Земли, то атомы в яблоке сами станут размером с яблоко.

Представьте теперь себе эту каплю воды с ее частичками, которые приплясывают, играют в пятнашки и лнут одна к другой. Вода сохраняет свой объем и не распадается на части именно из-за взаимного притяжения молекул. Даже катясь по стеклу, капля не растекается, — опять-таки из-за притяжения. И все вещества не улетучиваются по той же причине. Движение частиц в теле мы воспринимаем как *теплоту*; чем выше температура, тем сильнее движение. При нагреве воды толчея среди частиц усиливается, промежутки между ними растут, и наступает миг, когда притяжения между молекулами уже не хватает, чтобы удержать их вместе, вот тогда они и *улетучиваются*, удаляются друг от друга. Так получают водяной пар: при повышении температуры усиливается движение и частицы воспаряют.

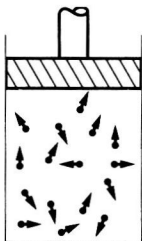
На фиг. 1.2 показан пар.



**Фиг. 1.2.** Пар под микроскопом.

Рисунок этот плох в одном — при выбранном нами увеличении на комнату придется всего несколько молекул, поэтому сомнительно, чтобы целых  $2\frac{1}{2}$  молекулы оказались на таком маленьком рисунке. На такой площадке скорее всего не окажется ни одной частицы. Но ведь надо что-то нарисовать, чтоб рисунок не был совсем пустым. Глядя на пар, легче увидеть характерные черты молекул воды. Для простоты на рисунке угол между атомами водорода взят  $120^\circ$ . На самом же деле он равен  $105^\circ 3'$ , а промежуток между центрами атомов кислорода и водорода равен  $0,957 \text{ \AA}$ . Как видите, мы довольно хорошо представляем себе эту молекулу.

Давайте рассмотрим некоторые свойства водяного пара или других газов. Разрозненные молекулы пара то и дело ударяются о стенки сосуда. Представьте себе комнату, в которой множество теннисных мячей (порядка сотни) беспорядочно и непрерывно прыгают повсюду. Под градом ударов стенки расходятся (так что их надо придерживать). Эту неумолкаемую дробь ударов атомов наши грубые органы чувств (их-то чувствительность не возросла в миллиард раз) воспринимают как *постоянный напор*. Чтобы сдержать газ в его пределах, к нему нужно приложить давление. На фиг. 1.3 показан обычный сосуд с газом (без него не обходится ни один учебник) — цилиндр с поршнем.



Фиг. 1.3. Цилиндр с поршнем.

Молекулы для простоты изображены теннисными мячиками, или точечками, потому что форма их не имеет значения. Они движутся беспорядочно и непрерывно. Множество молекул непрерывно колотит о поршень. Их непрекращаемые удары вытолкнут его из цилиндра, если не приложить к поршню некоторую силу — *давление* (сила, собственно, — это давление, умноженное на площадь). Ясно, что сила пропорциональна площади поршня, потому что если увеличить его площадь, сохранив то же количество молекул в каждом кубическом сантиметре, то и число ударов о поршень возрастет во столько же раз, во сколько расширилась площадь.

А если в сосуде число молекул удвоится (и соответственно возрастет их плотность), а скорости их (и соответственно температура) останутся прежними? Тогда довольно точно удвоится и число ударов, а так как каждый из них столь же «энергичен», как и раньше, то выйдет,

что давление пропорционально плотности. Если принять во внимание истинный характер сил взаимодействия атомов, то следует ожидать и не-большого спада давления из-за увеличения притяжения между атомами и легкого роста давления из-за увеличения доли общего объема, занятого самими атомами. И все же в хорошем приближении, когда атомов сравнительно немного (т.е. при невысоких давлениях), *давление пропорционально плотности.*

Легко понять и нечто другое. Если повысить температуру газа (скорость атомов), не меняя его плотности, что произойдет с давлением? Двигаясь быстрее, атомы начнут бить по поршню сильнее; к тому же удары посыплются чаще — и давление возрастет. Вы видите, до чего просты идеи атомной теории.

А теперь рассмотрим другое явление. Пускай поршень медленно двинулся вперед, заставляя атомы тесниться в меньшем объеме. Что бывает, когда атом ударяет по ползущему поршню? Ясно, что после удара его скорость повышается. Можете это проверить, играя в пинг-понг: после удара ракеткой шарик отлетает от ракетки быстрее, чем подлетал к ней. (Частный пример: неподвижный атом после удара поршня приобретает скорость.) Стало быть, атомы, отлетев от поршня, становятся «горячее», чем были до толчка. Поэтому все атомы в сосуде наберут

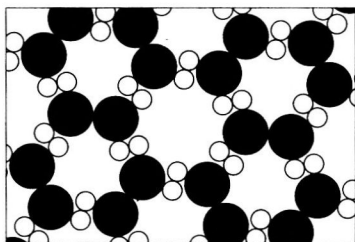


скорость. Это означает, что *при медленном сжатии газа его температура растет*. Когда медленно *сжимаешь* газ, его температура *повышается*, а когда медленно *расширяешь*, температура *падает*.

Вернемся к нашей капельке воды и посмотрим, что с ней будет, когда температура понизится. Положим, что толчея среди молекул воды постепенно утихает. Меж ними, как мы знаем, существуют силы притяжения; притянувшись друг к другу молекулам уже нелегко покачиваться и прыгать. На фиг. 1.4 показано, что бывает при низких температурах; мы видим уже нечто новое. Образовался *лед*. Конечно, картинка эта опять условна — у льда не два измерения, как здесь изображено, но в общих чертах она справедлива. Интересно, что в этом веществе у *каждого атома есть свое место*, и если каким-то образом мы расставим атомы на одном конце капли каждый на свое место, то за многие километры от него на другом конце (в нашем увеличенном масштабе) из-за жесткой структуры атомных связей тоже возникнет определенная правильная расстановка. Поэтому если потянуть за один конец ледяного кристалла, то за ним, противясь разрыву, потянется и другой — в отличие от воды, в которой эта правильная расстановка разрушена интенсивными движениями атомов. Разница между твердыми и жидкими

талами состоит в том, что в твердых телах атомы расставлены в особом порядке, называемом *кристаллической структурой*, и даже в том случае, когда они находятся далеко друг от друга, ничего случайного в их размещении не наблюдается — положение атома на одном конце кристалла определяется положением атомов на другом конце, пусть между ними находятся хоть миллионы атомов. В жидкостях же атомы на дальних расстояниях сдвинуты как попало. На фиг. 1.4 расстановка молекул льда мною выдумана, и хотя кое-какие свойства льда здесь отражены, но в общем она неправильна. Верно схвачена, например, часть шестигранной симметрии кристаллов льда. Посмотрите: если повернуть картинку на  $120^\circ$ , получится то же самое расположение.

Таким образом, лед имеет *симметрию*, вследствие которой снежинки все шестигранны. Из фиг. 1.4 можно еще понять, отчего, растаяв, лед занимает меньший объем.



Фиг. 1.4. Молекулы льда.

Смотрите, как много «пустот» на рисунке; у настоящего льда их тоже много. Когда система разрушается, все эти пустоты заполняются молекулами. Большинство простых веществ, за исключением льда и гарта (типографского сплава), при плавлении *расширяются*, потому что в твердых кристаллах атомы упакованы плотнее, а после плавления им понадобится место, чтобы колебаться; сквозные же структуры, наподобие льда, разрушаясь, становятся компактнее.

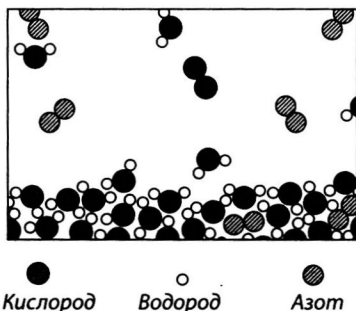
Но хотя лед обладает «жесткой» кристаллической структурой, его температура может тоже меняться, в нем есть запас тепла. Этот запас можно менять по своему желанию. Что же это за тепло? Атомы льда все равно не находятся в покое. Они дрожат и колеблются. Даже когда существует определенный порядок в кристалле (структура), все атомы все же колеблются «на одном месте». С повышением температуры размах их колебаний все растет, пока они не стронутся с места. Это называется *плавлением*. Наоборот, с падением температуры колебания все замирают, пока при абсолютном нуле температуры они не станут наименьшими из возможных (хотя полной остановки не наступит).

Этого минимального количества движения не хватает, чтобы растопить тело. Но есть одно исключение — гелий. Гелий при охлаждении тоже уменьшает движение своих атомов до предела,

но даже при абсолютном нуле в них оказывается достаточный запас движения, чтобы предохранить гелий от замерзания. Гелий не замерзает и при абсолютном нуле, если только не сжимать его под высоким давлением. Повышая давление, *можно* добиться затверждения гелия.

### § 3. Атомные процессы

Так с атомной точки зрения описываются твердые, жидкие и газообразные тела. Но атомная гипотеза описывает и *процессы*, и мы теперь рассмотрим некоторые процессы с атомных позиций. Первым делом речь пойдет о процессах, происходящих на поверхности воды. Что здесь происходит? Мы усложним себе задачу, приблизим ее к реальной действительности, предположив, что над поверхностью находится воздух. Взгляните на фиг. 1.5.



**Фиг. 1.5.** Молекулы воды, испаряющейся в воздух.

Мы по-прежнему видим молекулы, образующие толщу воды, но, кроме того, здесь изображена и ее поверхность, а над нею — различные молекулы: прежде всего, молекулы воды в виде *водяного пара*, который всегда возникает над водной поверхностью (пар и вода находятся в равновесии, о чем мы вскоре будем говорить). Кроме того, над водой витают и другие молекулы — то скрепленные воедино два атома кислорода, образующие *молекулу кислорода*, то два атома азота, тоже слипшиеся в молекулу азота. Воздух почти весь состоит из азота, кислорода, водяного пара и меньших количеств углекислого газа, аргона и прочих примесей.

Итак, над поверхностью воды находится воздух — газ, содержащий некоторое количество водяного пара. Что происходит на этом рисунке? Молекулы воды все время движутся. Время от времени какая-нибудь из молекул близ поверхности получает толчок сильнее остальных и выскакивает вверх. На рисунке этого, конечно, не видно, потому что здесь все *неподвижно*. Но попробуйте просто представить себе, как одна из молекул только что испытала удар и взлетает вверх, а с другой случилось то же самое и т.д. Так, молекула за молекулой вода исчезает — она испаряется. Если *закрыть* сосуд, мы обнаружим среди молекул находящегося в нем воздуха множество молекул воды. То и дело некоторые из

них снова попадают в воду и остаются там. То, что казалось нам мертвым и неинтересным (скажем, прикрытый чем-нибудь стакан воды, который, может быть, 20 лет простоял на своем месте), на самом деле таит в себе сложный и интересный, непрерывно идущий динамический процесс. Для нашего грубого глаза в нем ничего не происходит, но стань мы в миллиард раз зорче, мы бы увидали, как все меняется: одни молекулы взлетают, другие оседают.

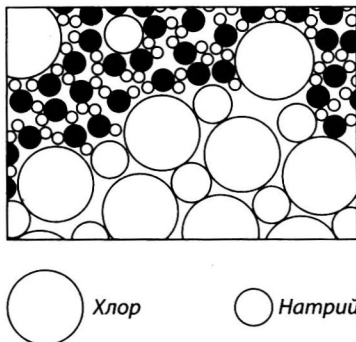
Почему же мы *не видим этих изменений*? Да потому, что сколько взлетает молекул, столько же и оседает! В общем-то там «ничего не происходит». Если раскрыть стакан и сдуть влажный воздух, на смену ему притечет уже сухой; число молекул, покидающих воду, останется прежним (оно ведь зависит только от движения в воде), а число возвращающихся молекул сильно уменьшится, потому что их уже над водой почти не будет. Число улетающих молекул превысит число оседающих, вода начнет испаряться. Поэтому, если вам нужно испарять воду, включайте вентилятор!

Но это еще не все. Давайте подумаем, какие молекулы вылетают из воды? Если уж молекула выскочила, то это значит, что она случайно вобрала в себя излишек энергии; он ей понадобился, чтобы разорвать путы притяжения соседей. Энергия вылетающих молекул превосходит сред-

нюю энергию молекул в воде, поэтому энергия остающихся молекул *ниже* той, которая была до испарения. Движение их уменьшается. Вода от испарения постепенно *остывает*. Конечно, когда молекула пара опять оказывается у поверхности воды, она испытывает сильное притяжение и может снова попасть в воду. Притяжение разгоняет ее, и в итоге возникает тепло. Итак, уходя, молекулы уносят тепло; возвращаясь — приносят. Когда стакан закрыт, баланс сходится, температура воды не меняется. Если же дуть на воду, чтобы испарение превысило оседание молекул, то вода охлаждается. Поэтому, чтобы остудить суп, дуйте на него!

Вы понимаете, конечно, что на самом деле все происходит гораздо сложнее, чем здесь описано. Не только вода переходит в воздух, но молекулы кислорода или азота время от времени переходят в воду и «теряются» в массе молекул воды. Попадание атомов кислорода и азота в воду означает растворение воздуха в воде; если внезапно из сосуда воздух выкачать, то молекулы воздуха начнут из воды выделяться быстрее, чем проникают в нее; мы увидим, как наверх поднимаются пузырьки. Вы, наверно, слышали, что это явление очень вредно для ныряльщиков.

Перейдем теперь к другому процессу. На фиг. 1.6 мы видим, как (с атомной точки зрения) соль растворяется в воде.

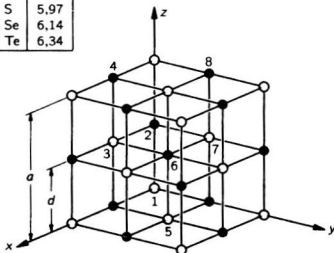


**Фиг. 1.6.** Молекулы соли, растворяющейся в воде.

Что получается, если в воду бросить кристаллик соли? Соль — твердое тело, кристалл, в котором «атомы соли» расставлены правильными рядами. На фиг. 1.7 показано трехмерное строение обычной соли (хлористого натрия).

| Кристалл                 | ●  | ○  | $a(\text{Å})$ |
|--------------------------|----|----|---------------|
| Каменная соль<br>Сильвин | Na | Cl | 5,64          |
|                          | K  | Cl | 6,28          |
|                          | Ag | Cl | 5,54          |
|                          | Mg | O  | 4,20          |
| Свинцовый блеск          | Pb | S  | 5,97          |
|                          | Pb | Se | 6,14          |
|                          | Pb | Te | 6,34          |

Расстояние до ближайшего соседа  $d=a/2$



**Фиг. 1.7.** Структура кристалла соли.



Строго говоря, кристалл состоит не из атомов, а из *ионов*. Ионы — это атомы с излишком или с нехваткой электронов. В кристалле соли мы находим ионы хлора (атомы хлора с лишним электроном) и ионы натрия (атомы натрия, лишенные одного электрона). Ионы в твердой соли скреплены друг с другом электрическим притяжением, но в воде некоторые из них, притянувшись к положительному водороду или отрицательному кислороду, начинают свободно двигаться. На фиг. 1.6 виден освободившийся ион хлора и другие атомы, плавающие в воде в виде ионов. На рисунке нарочно подчеркнуты некоторые детали процесса. Заметьте, например, что водородные концы молекул воды обычно обступают ион хлора, а возле иона натрия чаще оказывается кислород (ион натрия положителен, а атом кислорода в молекуле воды отрицателен, поэтому они притягиваются). Можно из рисунка понять: *растворяется* здесь соль в воде или же *выкристаллизовывается* из воды? Ясно, что *нельзя*; часть атомов уходит из кристалла, часть присоединяется к нему. Процесс этот *динамический*, подобный испарению; все зависит от того, много или мало соли в воде, в какую сторону нарушено равновесие. Под равновесным понимается такое состояние, когда количество уходящих атомов равно количеству приходящих. Если в воде почти нет соли, то больше атомов уходит в воду, чем

возвращается из воды: соль растворяется. Если же «атомов соли» слишком много, то приход превышает уход и соль выпадает в кристаллы.

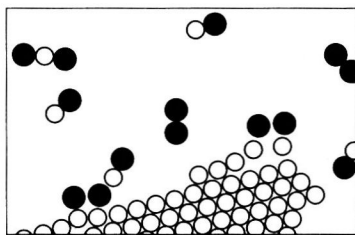
Мы мимоходом упомянули, что понятие *молекулы* вещества не совсем точно и имеет смысл только для некоторых видов веществ. Оно применимо к воде, в ней действительно три атома всегда скреплены между собой, но оно не очень подходит к твердому хлористому натрию. Хлористый натрий — это ионы хлора и натрия, образующие кубическую структуру. Нельзя естественным путем сгруппировать их в «молекулы соли».

Вернемся к вопросу о растворении и осаждении соли. Если повысить температуру раствора соли, то возрастет и число растворяющихся атомов и число осаждаемых. Оказывается, что в общем случае трудно предсказать, в какую сторону сдвинется процесс, быстрее или медленней пойдет растворение. С ростом температуры большинство веществ начинает растворяться сильнее, а у некоторых растворимость падает.

## **§ 4. Химические реакции**

Во всех описанных процессах атомы и ионы не меняли своих напарников. Но, конечно, возможны обстоятельства, в которых сочетания атомов меняются, образуя новые молекулы. Это показано на фиг. 1.8. Процесс, в котором атом-

ные партнеры меняются местами, называется *химической реакцией*. Описанные нами прежде процессы называются физическими, но трудно указать резкую границу между теми и другими. (Природе все равно, как мы это назовем, она просто делает свое дело.) На картинке мы хотели показать, как уголь горит в кислороде. Молекула кислорода состоит из *двух* атомов, сцепленных очень крепко. (А почему не из *трех* или даже не из *четырех*? Такова одна из характерных черт атомных процессов: атомы очень разборчивы, им нравятся определенные партнеры, определенные направления и т.д. Одна из обязанностей физики — разобраться, почему они хотят именно то, что хотят. Во всяком случае *два* атома кислорода, довольные и насыщенные, образуют молекулу.)



Фиг. 1.8. Уголь, горящий в кислороде.

Предположим, что атомы углерода образуют твердый кристалл (графит или алмаз\*). Одна из молекул кислорода может пробраться к углероду,

---

\* Алмаз тоже может сгореть в воздухе.

каждый ее атом подхватит по атому углерода и улетит в новом сочетании углерод — кислород. Такие молекулы образуют газ, называемый угарным. Его химическое имя СО. Что это значит? Буквы СО — это фактически картинка такой молекулы: С — углерод, О — кислород. Но углерод притягивает к себе кислород намного сильнее, чем кислород притягивает кислород или углерод — углерод. Поэтому кислород для этого процесса может поступать с малой энергией, но, схватываясь с неимоверной жадностью и страстью с углеродом, высвобождает энергию, поглощаемую всеми соседними атомами. Образуется большое количество энергии движения (кинетической энергии). Это, конечно, и есть *горение*; мы получаем *тепло* от сочетания кислорода и углерода. Теплота в обычных условиях проявляется в виде движения молекул нагретого газа, но иногда ее может быть так много, что она вызывает и *свет*. Так получается *пламя*.

Вдобавок молекулы СО могут не удовлетворяться достигнутым. У них есть возможность подсоединить еще один атом кислорода; возникает более сложная реакция: кислород в паре с углеродом столкнется с другой молекулой СО. Атом кислорода присоединится к СО и в конечном счете образуется молекула из одного углерода и двух кислородов. Ее обозначают  $\text{CO}_2$  и называют углекислым газом. Когда углерод сжигают

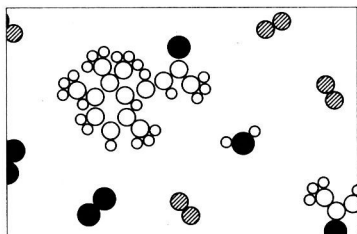
очень быстро (скажем, в моторе автомашины, где взрывы столь часты, что углекислота не успевает образоваться), то возникает много угарного газа. Во многих таких перестановках атомов выделяется огромное количество энергии, наблюдаются взрывы, вспыхивает пламя и т.д.; все зависит от реакции.

Химики изучили эти расположения атомов и установили, что любое вещество — это свой тип *расположения атомов*.

Чтобы объяснить эту мысль, рассмотрим новый пример. У клумбы фиалок вы сразу чувствуете их «запах». Это значит, что в ваш нос попали *молекулы*, или расположения атомов особого рода. *Как* они туда попали? Ну, это просто. Раз запах — это молекулы особого рода, то, двигаясь и сталкиваясь повсюду, они *случайно* могли попасть и в нос. Конечно, они не стремились попасть туда. Это просто беспомощные толпы молекул, и в своих бесцельных блужданиях эти осколки вещества, случается, оказываются и в носу.

И вот химики могут взять даже такие необычные молекулы, как молекулы запаха фиалок, проанализировать их строение и описать нам *точное расположение* их атомов в пространстве. Мы, например, знаем, что молекула углекислого газа пряма и симметрична:  $O-C-O$  (это легко обнаружить и физическими методами). Но и для

безмерно более сложных, чем те, с которыми имеет дело химия, расположений атомов можно после долгих увлекательных поисков понять, как выглядит это расположение. На фиг. 1.9 изображен воздух над фиалками.



Фиг. 1.9. Запах фиалки.

Снова мы находим здесь азот, кислород, водяной пар... (А он-то откуда здесь? От *влажных* фиалок. Все растения испаряют воду.)

Среди них, однако, витает «чудовище», сложенное из атомов углерода, водорода и кислорода, облюбовавших для себя особого вида расположение. Это расположение намного сложнее, чем у углекислоты. К сожалению, мы не можем его нарисовать: хотя оно известно химикам очень точно, но оно ведь трехмерное, а как его изобразишь в двух измерениях?! Как нарисовать шесть углеродов, которые образуют кольцо, но не плоское, а «гармошкой»? Все углы, все расстояния в ней известны. Так вот, химическая *формула* — это просто картина такой молекулы. Когда химик

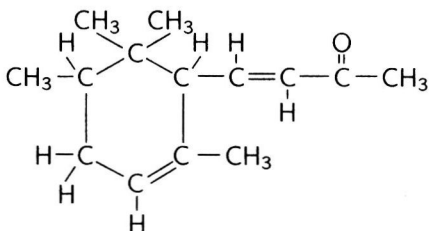
пишет формулу на доске, он, грубо говоря, пытается нарисовать молекулу в двух измерениях. Например, мы видим кольцо из шести углеродов; углеродную цепочку, свисающую с одного конца; кислород, торчащий на конце цепочки; три водорода, привязанные вон к тому углероду; два углерода и три водорода, прилепленные вот здесь, и т.д.

Как же химик узнает, что это за расположение? Возьмет он две пробирки с веществом, сольет их содержимое и смотрит: если смесь покраснела, значит, к такому-то месту молекулы прикреплен один водород и два углерода; если посинела, то... то это ничего не значит. Органическая химия может поспорить с самыми фантастическими страницами детективных романов. Чтобы узнать, как расположены атомы в какой-нибудь невероятно сложной молекуле, химик смотрит, что будет, если смешать два разных вещества! Да физик нипочем не поверит, что химик, описывая расположение атомов, понимает, о чем говорит. Но вот уже больше 20 лет, как появился физический метод, который позволяет разглядывать молекулы (не такие сложные, но по крайней мере родственные) и описывать расположение атомов не по цвету раствора, а по *измерению расстояний между атомами*. И что же?

Оказалось, что химики почти никогда не ошибаются!

Оказывается, что действительно в запахе фиалок присутствуют три слегка различные молекулы, они отличаются только расстановкой атомов водорода.

Одна из проблем в химии — это придумать такое название для вещества, чтобы по нему можно было бы узнать, какое оно. Найти имя для его формы! Но оно должно описывать не только форму, а указывать еще, что здесь стоит кислород, а вон там — водород, чтобы было точно отмечено, где что стоит. Теперь вы понимаете, почему химические названия так сложны. Это не сложность, а полнота. Название молекулы запаха фиалок поэтому таково: 4-(2,2,3,6-тетраметил-5-циклогексан)-3-бутен-2-он. Оно полностью описывает строение молекулы (изображенной на фиг. 1.10), а его длина объясняется сложностью молекулы.



**Фиг. 1.10.** Структурная формула запаха фиалки.



Дело, значит, вовсе не в том, что химики хотят затуманить мозги, просто им приходится решать сложнейшую задачу описания молекулы словами!

Но откуда мы все-таки *знаем*, что атомы существуют? А здесь идет в ход уже описанный прием: мы *предполагаем* их существование, и все результаты один за другим оказываются такими, как мы предскажем, — какими они должны быть, если все *состоит* из атомов. Существуют и более прямые доказательства. Вот одно из них. Атомы так малы, что ни в какой микроскоп их не увидишь (даже в *электронный*, а уж в световой и подавно). Но атомы все время движутся, и если бросить в воду большой шарик (большой по сравнению с атомами), то и он начнет подрагивать. Все равно как в игре в пушбол, где большой мяч толкают с разных сторон две команды. Толкают в разных направлениях, и куда мяч покатится, не угадаешь. Точно так же будет двигаться и «большой мяч» в воде: в разные моменты времени с разных сторон на него будут сыпаться неодинаковые удары. Поэтому когда мы глядим в хороший микроскоп на мельчайшие частички в воде, то видим их непрерывное метание — итог бомбардировки их атомами. Называется это *броуновским движением*.

Другие доказательства существования атомов можно извлечь из строения кристаллов. Во мно-

гих случаях их строение, определенное из опытов по прохождению рентгеновских лучей через кристаллы, согласуется по своему пространственному расположению с формой самого природного кристалла. Углы между разными гранями кристалла согласуются с точностью не до градусов, а до секунд дуги с углами, высчитанными в предположении, что кристалл сложен из множества «слоев» атомов.

*Все состоит из атомов.* Это самое основное утверждение. В биологии, например, самое важное предположение состоит в том, что *все, что делает животное, совершают атомы.* Иными словами, *в живых существах нет ничего, что не могло бы быть понято с той точки зрения, что они состоят из атомов, действующих по законам физики.* Когда-то это не было еще ясно. Потребовалось немало опытов и размышлений, прежде чем высказать это предположение, но теперь оно повсеместно принято и приносит огромную пользу, порождая новые идеи в области биологии.

Да посудите сами! Если уж стальной кубик или кристаллик соли, сложенный из одинаковых рядов одинаковых атомов, может обнаруживать такие интересные свойства; если вода — простые капельки, неотличимые друг от друга и покрывающие миля за милей поверхность Земли, — способна порождать волны и пену, гром прибоя и странные узоры на граните набережной; если

все это, все богатство жизни вод — всего лишь свойства сгустков атомов, то *сколько же еще в них скрыто возможностей?* Если вместо того, чтобы выстраивать атомы по ранжиру, строй за строем, колонну за колонной, даже вместо того, чтобы сооружать из них замысловатые молекулы запаха фиалок, если вместо этого располагать их *каждый раз по-новому*, разнообразя их мозаику, не повторяя того, что уже было, — представляете, сколько необыкновенного, неожиданного может возникнуть в их поведении. Разве не может быть, что те «тела», которые разгуливают по улице и беседуют с вами, тоже не что иное, как сгустки атомов, но такие сложные, что уже не хватает фантазии предугадывать по их виду их поведение; Когда мы называем себя сгустками атомов, это не значит, что мы — *только* собрание атомов, потому что такой сгусток, который никогда не повторяется, прекрасно может оказаться способным и на то, чтобы сидеть у стола и читать эти строки.

## Глава 2

# ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВОЗЗРЕНИЯ

---

*Введение. Физика до 1920 года.  
Квантовая физика. Ядра и частицы*

---

### § 1. Введение

В этой главе будут рассмотрены самые основные представления о физике; здесь будет идти речь о том, как теперь мы представляем себе природу вещей. Я не буду рассказывать историю того, как стало известно, что эти представления правильны; это мы отложим до другого раза.

Предмет науки предстает перед нами во множестве проявлений, в обилии признаков. Спуститесь к морю, взгляните в него. Это ведь не просто вода. Это вода и пена, это рябь и набегающие волны, это облака, солнце и голубое небо, это свет и тепло, шум и дыхание ветра, это песок и скалы, водоросли и рыба, их жизнь и гибель, это и вы сами, ваши глаза и мысли, ваше ощущение счастья. И не то ли в любом другом месте, не такое ли разнообразие явлений и влия-

ний? Вы не найдете в природе ничего простого, все в ней перепутано и слито. А наша любознательность требует найти в этом простоту, требует, чтобы мы ставили вопросы, пытались ухватить суть вещей и понять их многоликость как возможный итог действия сравнительно небольшого количества простейших процессов и сил, на все лады сочетающихся между собой.

И мы спрашиваем себя: отличается ли песок от камня? Быть может, это всего лишь множество камешков? А может, и Луна — огромный камень? Тогда, поняв что такое камни, не поймем ли мы тем самым природу песка и Луны? А ветер — что это такое? Может, это всплески воздуха, как вон те всплески воды у берега? Что общего между всяким движением? А есть ли что-нибудь общее между всевозможными звуками? Сколько получится, если пересчитать все цвета? И так далее и так далее. Вот так мы постепенно пробуем проанализировать все вокруг, связать то, что кажется несвязуемым, в надежде, что удастся *уменьшить* количество *различных* явлений и тем самым их лучше понять.

Способ получать частичные ответы на подобные вопросы был придуман еще несколько сот лет назад. *Наблюдение, размышление и опыт* — вот что составляет так называемый *научный метод*. Мы ограничимся здесь только голым описанием фундаментальных идей физики, основ

мировоззрения, возникшего в физике от применения научного метода.

Что значит «понять» что-либо? Представьте себе, что сложный строй движущихся объектов, который и есть мир, — это что-то вроде гигантских шахмат, в которые играют боги, а мы следим за их игрой. В чем правила игры, мы не знаем; все, что нам разрешили, — это *наблюдать* за игрой. Конечно, если посмотреть подольше, то кое-какие правила можно ухватить. Под *основными физическими воззрениями*, под *фундаментальной физикой* мы понимаем *правила игры*. Но, даже зная все правила, можно не понять какого-то хода просто из-за его сложности или ограниченности нашего ума. Тот, кто играет в шахматы, знает, что правила выучить легко, а вот понять ход игрока или выбрать наилучший ход порой очень трудно. Ничуть не лучше, а то и хуже обстоит дело в природе. Не исключено, что в конце концов все правила будут найдены, но пока отнюдь не все они нам известны. То и дело тебя поджидает рокировка или какой-нибудь другой непонятный ход. Но, помимо того, что мы не знаем всех правил, лишь очень и очень редко нам удастся действительно объяснить что-либо на их основе. Ведь почти все встречающиеся положения настолько сложны, что нет никакой возможности, заглядывая в правила, проследить за планом игры, а тем более предугадать

очередной ход. Приходится поэтому ограничиваться самыми основными правилами. Когда мы разбираемся в них, то уже считаем, что «поняли» мир.

Но откуда мы знаем, что те правила, которые мы «ощущаем», справедливы на самом деле? Ведь мы не способны толково разобрать ход игры. Существует, грубо говоря, три способа проверки. Во-первых, мыслимы положения, когда природа устроена (или мы ее устраиваем) весьма просто, всего из нескольких частей; тогда можно точно предсказать все, что случится, проверив тем самым правила. (В углу доски может оказаться всего несколько фигур, и все их движения легко себе представить.)

Есть и второй, довольно неплохой, путь проверки правил: надо из этих правил вывести новые, более общие. Скажем, слон ходит только по диагонали; значит, сколько бы он ни ходил, он всегда окажется, например, на черном поле. Стало быть, не вникая в детали, наши представления о движении слона всегда можно проверить потому, остается ли он все время на черном поле. Конечно, не исключено, что внезапно слон очутится на *белом* поле: после того как его побиили, пешка прошла на последнюю горизонталь и превратилась в белопольного слона. Так же и в физике. Долгое время мы располагаем правилом, которое превосходно работает повсюду, даже ко-

гда детали процесса нам неизвестны, и вдруг иногда всплывает *новое правило*. С точки зрения физических основ самые интересные явления происходят в *новых* местах, там, где правила не годятся, а не в тех местах, где они *действуют*! Так открываются новые правила.

Есть и третий способ убедиться, что наши представления об игре правильны; мало оправданный по существу, он, пожалуй, самый мощный из всех способов. Это путь *грубых приближений*. Мы можем не знать, почему Алехин пошел *именно этой фигурой*. Но в *общих чертах* мы можем понимать, что он, видимо, собирает все фигуры для защиты короля, и сообразить, что в сложившихся обстоятельствах это самое разумное. Точно так же мы часто более или менее понимаем природу, хотя не знаем и не понимаем *каждого хода отдельной фигуры*.

Когда-то все явления природы грубо делили на классы — теплота, электричество, механика, магнетизм, свойства веществ, химические явления, свет (или оптика), рентгеновские лучи, ядерная физика, тяготение, мезонные явления и т.д. Цель-то, однако, в том, чтобы понять *всю природу* как разные стороны *одной совокупности* явлений. В этом задача фундаментальной теоретической физики нынешнего дня: *открыть законы, стоящие за опытом, объединить эти классы*. Исторически всегда рано или поздно удавалось



их слить, но проходило время, возникали новые открытия, и опять вставала задача их включения в общую схему. Однажды уже возникла было слитная картина мира — и вдруг были открыты лучи Рентгена... Со временем произошло новое слияние... и тут обнаружили существование мезонов. Поэтому на любой стадии игра выглядит беспорядочно, незаконченно. Многое бывает объяснено с единой точки зрения, но всегда какие-то проволочки и нитки все же болтаются, всегда где-нибудь торчит что-то несуразное. Таково сегодняшнее положение вещей, которое мы попытаемся описать.

Вот взятые из истории примеры слияния. Во-первых, *теплоту* удалось свести к механике. Чем сильнее движение атомов, тем больше запас тепла системы; выходит, что *теплота, да и все температурные эффекты, могут быть поняты с помощью законов механики*. Другое величественное объединение было отпраздновано, когда обнаружилась связь между электричеством, магнетизмом и светом. Оказалось, что это разные стороны одной сущности; сейчас мы называем ее *электромагнитным полем*. А химические явления, свойства различных веществ и поведение атомных частиц объединились *квантовой химией*.

Возникает естественный вопрос: будет ли возможно в конце концов *все* слить воедино и обнаружить, что весь наш мир есть просто различ-

ные стороны какой-то *одной* вещи? Этого никто не знает. Мы только знаем, что по мере нашего продвижения вперед то и дело удастся что-то с чем-то объединить, а после опять что-то перестает укладываться в общую картину, и мы заново принимаемся раскладывать части головоломки, надеясь сложить из них что-нибудь целое. А сколько частей в головоломке и будет ли у нее край — это никому не известно. И не будет известно, пока мы не сложим всей картины, если только когда-нибудь это вообще будет сделано. Здесь мы хотим только показать, насколько далеко зашел процесс слияния, как сегодня обстоит дело с объяснением основных явлений за счет наименьшего количества принципов. Или, выражаясь проще, *из чего все состоит и сколько всего таких элементов!*

## § 2. Физика до 1920 года

Нам было бы нелегко начать прямо с сегодняшних взглядов. Посмотрим лучше, как выглядел мир примерно в 1920 г., а затем сотрем с этой картины лишнее.

До 1920 г. картина была примерно такова. «Сцена», на которой выступает Вселенная, — это трехмерное *пространство*, описанное еще Евклидом; все изменяется в среде, называемой *временем*. Элементы, выступающие на сцене, — это

*частицы*, например атомы; они обладают известными свойствами, скажем свойством инерции: когда частица движется в каком-то направлении, то делает она это до тех пор, пока на нее не действуют *силы*. Следовательно, второй элемент — это *силы*; считалось, что они бывают двух сортов. Первый, чрезвычайно запутанный тип — сила взаимодействия, т.е. сила, скрепляющая атомы в разных их комбинациях; она, например, и решает, быстрее или медленнее начнет растворяться соль при нагревании. Другой же сорт сил — это взаимодействие на далеких расстояниях — притяжение, спокойное и ровное; оно меняется обратно пропорционально квадрату расстояния и именуется *тяготением*, или *гравитацией*. Закон ее известен и прост. Но *почему* тела остаются в движении, начав двигаться, или *отчего* существует закон тяготения — это было неизвестно.

Продолжаем наше описание природы. С этой точки зрения газ, как, впрочем, и *все* вещество; это мириады движущихся частиц. Таким образом, многое из увиденного нами на морском берегу теперь запросто увязывается в единое целое. Давление сводится к ударам атомов о стенки; снос атомов (их движение в одну сторону) — это ветер; *хаотические* внутренние движения — это *теплота*. Волны — избыток давления, места, где собралось слишком много частиц; разлетаясь,

они нагнетают в новых местах такие же скопления частиц; эти волны избытка плотности суть *звуки*. Понять все это было немаловажным достижением (кое о чем мы уже писали в предыдущей главе).

Какие *сорта* частиц существуют? В то время считалось, что их 92; восемьдесят девять типов атомов были к тому времени открыты. Каждый тип имел свое название.

Дальше возникала проблема: *что такое силы близкодействия*. Почему атом углерода притягивает один, в лучшем случае два атома кислорода, но не более? В чем механизм взаимодействия между атомами? Уж не тяготение ли это? Нет. Оно чересчур слабо для этого. Надо представить себе силу, сходную с тяготением, тоже обратно пропорциональную квадрату расстояния, но несравненно более мощную. У нее есть еще одно отличие. Тяготение — это всегда притяжение; допустим теперь, что бывают «предметы» *двоякого сорта*, и эта новая сила (имеется, конечно, в виду электричество) обладает таким свойством, что одинаковые сорта *отталкиваются*, а разные — *притягиваются*. «Предмет», несущий с собой это сильное взаимодействие, называется *зарядом*.

Что же тогда получается? Положим, что два различных сорта (плюс и минус) приложены друг к другу вплотную. Третий заряд находится вдалеке. Почувствует ли он притяжение? *Практически*

нет, если первые два одинаковы по величине: притяжение одного и отталкивание другого уравниваются. Значит, на заметных расстояниях сила незаметна. Но когда третий заряд *приблизится вплотную*, то возникнет *притяжение*: отталкивание однородных зарядов и притяжение разнородных будут стремиться свести между собой разнородные заряды и удалить друг от друга однородные. В итоге отталкивание окажется слабее притяжения. По этой причине атомы, состоящие из положительных и отрицательных зарядов, мало влияют друг на друга на заметных расстояниях. Зато уж если они сблизятся, то свободно могут «разглядывать изнутри» друг друга, перестраивать расположение своих зарядов и сильно взаимодействовать. В конечном итоге именно *электрическая* сила объясняет взаимодействие атомов. Сила эта столь велика, что все плюсы и минусы обычно вступают в предельно тесную связь друг с другом: они стянуты насколько возможно. Все тела, даже наши собственные, состоят из мельчайших плюс- и минус-долек, очень сильно взаимодействующих друг с другом. Количество плюсов и минусов хорошо сбалансировано. Только на мгновение случайно можно соскрести несколько плюсов или минусов (обычно минусы соскребать легче); тогда электрическая сила окажется *неуравновешенной* и можно почувствовать действие электрического притяжения.

Чтобы дать представление о том, насколько электричество сильнее тяготения, расположим две песчинки размером в миллиметр в 30 м одна от другой. Пусть все заряды только притягиваются и их взаимодействие друг на друга внутри песчинок не погашается взаимно. С какой силой эти две песчинки притягивались бы? С силой в *три миллиона тонн!* Понимаете теперь, почему *малейшего* избытка или нехватки положительных или отрицательных зарядов достаточно, чтобы произвести заметное электрическое действие? По той же причине заряженные тела не отличаются ни по массе, ни по размеру от незаряженных: нужно слишком мало частиц, чтобы зарядить тело, чтобы почувствовалось, что оно заряжено.

Зная все это, легко было представить себе и устройство атома. Считалось, что в центре его положительно заряженное электричеством очень массивное «ядро», оно окружено некоторым числом «электронов», очень легких и заряженных отрицательно. Забегая вперед, заметим, что впоследствии в самом ядре были обнаружены два рода частиц — протоны и нейтроны, весьма тяжелые и обладающие близкими массами. Протоны заряжены положительно, а нейтроны не заряжены вовсе. Когда в ядре атома имеется шесть протонов и ядро окружено шестью электронами (отрицательные частицы обычного мира материальных тел — все электроны, они намного легче

протонов и нейтронов), то этот атом в химической таблице стоит под номером 6 и называется углеродом. Атом, имеющий номер 8, называется кислородом, и т.д. Химические свойства зависят от внешней *оболочки* — электронов, а точнее, только от того, *сколько* их там; все *химические* особенности вещества зависят от одного-единственного числа — количества электронов. (Список названий элементов, составленный химиками, на самом деле может быть заменен нумерацией 1, 2, 3 и т.д. Вместо того чтобы говорить «углерод», можно было бы сказать «элемент шесть», подразумевая шесть электронов. Но, конечно, когда открывали элементы, не подозревали, что их можно так пронумеровать; к тому же именовать их по номерам не очень удобно. Лучше, чтобы у каждого из них было собственное имя и символ.)

И еще многое другое стало известно об электрической силе. Естественным было бы толковать электрическое взаимодействие как простое притяжение двух предметов, положительно и отрицательно заряженных. Однако выяснилось, что такой подход плохо помогает уяснению природы электрической силы. Толкование, более отвечающее положению вещей, таково: когда где-то имеется положительный заряд, то он искривляет в каком-то смысле пространство, создает в нем некоторое условие для того, чтобы

минус-заряд, помещенный в это пространство, ощутил действие силы. Эта возможность порождать силы называется *электрическим полем*. Когда электрон помещен в электрическое поле, мы говорим, что он «притягивается». При этом действуют два правила: а) заряды создают поле и б) на заряды в поле действуют силы, заставляя их двигаться. Причина этого станет ясна, когда мы разберем следующее явление. Если мы зарядим тело, скажем расческу, электричеством, а затем положим рядом заряженный клочок бумаги и начнем водить расческой взад и вперед, то бумага будет все время поворачиваться к расческе. Ускорив движение расчески, можно обнаружить, что бумага несколько отстает от ее движения, возникает *запаздывание действия*. (Сперва, когда мы водим расческой медленно, дело усложняется *магнетизмом*. Магнитные влияния появляются, когда заряды *движутся друг относительно друга*, так что магнитные и электрические силы в действительности могут оказаться проявлениями одного и того же поля, двумя сторонами одного и того же явления. Изменяющееся электрическое поле не может существовать без магнитного действия.) Если бумагу отодвинуть, запаздывание возрастет. И тогда наблюдается интересная вещь. Хотя сила, действующая между двумя заряженными телами, изменяется обратно *квадрату* расстояния, при



колебаниях заряда его влияние *простирается намного дальше*, чем можно было ожидать. Это значит, что оно уменьшается медленнее, чем по закону обратных квадратов.

Что-то похожее на это происходит, если в бассейн с водой брошен поплавок; можно подействовать на него «непосредственно», бросив в воду поблизости другой поплавок; при этом если вы смотрели *только на поплавки* (не на воду), то вы увидите лишь, что один из них сместился в ответ на движения другого, т.е. что между ними существует какое-то *взаимодействие*. А ведь дело только в том, что вы взволновали *воду*: это *вода* шевельнула второй поплавок. Из этого можно даже вывести «закон»: если шевельнуть чуть-чуть поплавок, все соседние поплавки зашевелиятся. Будь поплавок подальше, он бы едва покачнулся, ведь мы возмутили поверхность воды один раз и *в одном месте*. Но когда мы начнем непрерывно покачивать поплавок, возникнет новое явление: побегут *волны* и влияние колебаний поплавок распространится *намного дальше*. Это будет колебательное влияние, и уж его не объяснить прямым взаимодействием поплавков. Мысль о непосредственном взаимодействии придется заменить предположением о существовании воды или, для электрических зарядов, того, что называется *электромагнитным полем*.

**Таблица 2.1. Электромагнитный спектр**

| <b>Частоты,<br/>гц</b>              | <b>Название</b>                       | <b>Общее<br/>поведение</b> |
|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| $10^2$                              | Электрические возмущения              | Поле                       |
| $5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6$       | Радиоволны                            | Волны                      |
| $10^8$                              | Ультракороткие волны и телевидение    |                            |
| $10^{10}$                           | Радиолокация                          |                            |
| $5 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15}$ | Свет                                  |                            |
| $10^{18}$                           | Рентгеновские лучи                    | Частицы                    |
| $10^{21}$                           | Гамма-излучение (ядерное)             |                            |
| $10^{24}$                           | Гамма-излучение («искусственное»)     |                            |
| $10^{27}$                           | Гамма-излучение (в космических лучах) |                            |

Электромагнитное поле может передавать волны; одни волны — это *световые*, другие — *радиоволны*, общее же их название *электромагнитные волны*. Частота колебаний этих волн *разная*. Только этим они и отличаются одна от другой. Все чаще и чаще колебля заряд вверх-вниз и наблюдая затем, что получится, мы увидим разные эффекты; все они могут быть сведены в единую систему, если дать каждому свой номер — число колебаний в секунду. Обычные помехи от тока, текущего по проводам в жилых домах, имеют частоту порядка сотни колебаний в секунду. Повысив частоту до 500–1000 килогерц ( $1 \text{ кгц} =$

= 1000 колебаний в секунду), мы из квартиры выйдем «на воздух», потому что это — область радиочастот. (*Воздух* здесь, конечно, ни при чем! Радиоволны распространяются и в безвоздушном пространстве.) Увеличив еще частоты, мы доберемся до ультракоротких волн и телевидения. Затем пойдут совсем короткие волны, их назначение — *радиолокация*. Еще дальше, и нам уже не нужно приборов, чтобы регистрировать эти волны, их можно видеть невооруженным глазом. В полосе частот от  $5 \cdot 10^{14}$  до  $5 \cdot 10^{15}$  *гц* колебания заряженной расчески (если наловчиться колебать ее так быстро) предстали бы перед нами в зависимости от частоты как красный, голубой или фиолетовый свет. Частоты с одной стороны полосы называются инфракрасными, а с другой — ультрафиолетовыми. Тот факт, что мы способны видеть на определенных частотах, с физической точки зрения не делает эту часть электромагнитного спектра более впечатляющей, но с человеческой точки зрения это, конечно, самая интересная часть спектра. Продвигаясь по частоте еще дальше, мы получим рентгеновские лучи; это всего лишь высокочастотный свет. А еще дальше пойдет гамма-излучение (табл. 2.1). Гамма-излучение и рентгеновские лучи — почти одно и то же. Обычно те электромагнитные волны, которые исходят от ядер, называют гамма-излучением, а те, которые исходят от атомов, — рентгенов-

скими лучами, но если их частота совпадет, то физически эти волны уже не отличишь, каков бы ни был их источник. Волны еще более высоких частот, скажем  $10^{24}$  гц, можно, оказывается, получать искусственно, на ускорителях; на синхротроне в КАЛТЕХе умеют это делать.

И наконец, неслыханно высокие частоты (в тысячу раз больше) обнаруживаются далее в волнах, присутствующих в *космических лучах*. Эти волны мы уже не умеем контролировать.

### § 3. Квантовая физика

Мы описали электромагнитное поле и поняли, что оно может передаваться как волны. Сейчас мы увидим, что на самом деле эти волны ведут себя очень странно: они отнюдь не похожи на волны. На высоких частотах они гораздо больше смахивают на *частицы*! Наука, которая умеет объяснять такое странное поведение, — *квантовая механика* — была изобретена вскоре после 1920 г. Еще до этого привычную картину трехмерного пространства и отдельно существующего времени изменил Эйнштейн; сперва он превратил ее в сочетание, называемое «пространство-время», а потом, чтобы объяснить тяготение, — еще и в «*искривленное пространство-время*». Таким образом, «сценой» стало уже пространство-

время, а тяготение, по всей вероятности, это видоизмененное пространство-время.

А затем также выяснилось, что и законы движения частиц неверны. Механические законы «инерции» и «силы», законы Ньютона — все они оказались *непригодными* в мире атомов. Было обнаружено, что поведение мельчайших телец *ничем не напоминает* поведение обычных, больших тел. Конечно, физика от этого становится труднее, но зато намного интереснее. Труднее потому, что поведение малых телец совершенно «нестественно»; оно противоречит нашему опыту, оно вообще ни на что не похоже и его нельзя описать никаким иным путем, кроме аналитического; а ведь это требует большого воображения.

Много особенностей есть у квантовой механики. В первую очередь она запрещает считать, что частица может двигаться через определенное точно указанное место с определенной точно указанной скоростью. Чтоб показать, насколько ошибочна обычная механика, отметим, что в квантовой механике имеется правило, согласно которому никто в одно и то же время не может знать и место и быстроту движения частицы. Неопределенность в импульсе и неопределенность в положении частицы дополняют друг друга: их произведение постоянно. Мы пока напомним это правило в виде  $\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$ , не вникая в подробности. Это правило представляет собой объясне-

ние таинственного парадокса: раз атомы сделаны из плюс- и минус-зарядов, отчего бы минус-зарядам просто не усесться на плюс-заряды (они ведь притягиваются), отчего бы им не сблизиться до того тесно, что они погасят друг друга? *Почему атомы столь велики?* Почему ядро находится в центре, а электроны — вокруг него? Сперва объясняли это тем, что ядро очень велико; но ведь это не так, оно *очень мало*. Диаметр атома примерно  $10^{-8}$  см, а ядра — что-то около  $10^{-13}$  см. Чтобы увидеть ядро, надо было бы атом увеличить до размеров комнаты, и то ядро казалось бы малюсеньким, едва-едва различимым пятнышком; при этом все же почти *весь вес* атома приходился бы на бесконечно маленькое *ядро*. Но почему же электроны не падают на него? А вот из-за того же принципа неопределенности: если б электроны оказались в ядре, мы бы очень точно знали их положение и, следовательно, их импульс непременно должен был бы стать очень *большим* (но неопределенным), а, значит, *кинетическая энергия* тоже резко бы возросла. С такой энергией он бы выскочил из ядра. Немудрено, что ядро идет на соглашение с электронами: они оставляют себе какое-то место для этой неопределенности и затем колеблются с некоторым наименьшим запасом движения, лишь бы не нарушить этого правила. (Вспомните еще, что когда кристалл охлажден до абсолютного нуля, мы

считаем, что атомы все же не прекращают своего движения, они все еще колеблются. Почему? Да если бы атомы остановились, мы бы знали и то, что они стоят, и где стоят, а это противоречит принципу неопределенности. Мы не смеем знать и где они и сколь быстро движутся, вот атомы и вынуждены беспрерывно дрожать!)

А вот другое интереснейшее изменение в идеях и философии науки, осуществленное квантовой механикой: невозможно никогда предсказать *точно*, что произойдет в каких-то обстоятельствах. Например, можно приготовить атом, способный излучать свет; момент испускания света мы можем заметить, поймав фотон (будет время, мы поговорим об этом). Но мы не можем предсказать, *когда* он собирается излучить, или если атомов несколько, то *какой* из них испустит свет. Может быть, по-вашему, все это из-за того, что в атомах есть какие-то внутренние «колесики», которых мы еще не разглядели? Нет, в атоме *нет* потайных колес; природа, насколько мы ее сегодня понимаем, ведет себя так, что *принципиально невозможно* делать точные предсказания о том, *что именно произойдет* в данном опыте. Ужасно, не правда ли? Ведь философы прежде всегда нас учили, что одно из основных свойств науки, неотделимых от нее, — это требование, чтобы в одинаковых условиях всегда происходили одни и те же события. Но это просто *неверно*, это *вовсе*

не основное условие науки. На самом деле в равных обстоятельствах одинаковые события не происходят; предсказать их можно только в среднем, только статистически. И все-таки наука еще не совсем погибает.

Кстати, философы порой много говорят о вещах, *совершенно необходимых* науке; и это всегда, как можно в том убедиться, весьма наивно и, по всей видимости, ошибочно. К примеру, некоторые философы, и не только философы, утверждали, что для научных открытий существенно, чтобы один и тот же опыт, сделанный, скажем, в Стокгольме и в Кито, приводил к *одним и тем же* результатам. Но ведь это абсолютно неверно. Для науки это условие не обязательно; оно может быть *установлено после опыта*, но нельзя этого требовать до опыта. Если, например, в Стокгольме проделан опыт по наблюдению северного сияния, то с какой стати он должен удался в Кито? Вы там и сияния-то не увидите. «Но это ясно, — скажете вы. — Ничего иного и не могло быть, раз вы исследуете что-то внешнее, далекое от нас. А вот вы заберитесь в Стокгольме в ящик и закройте в нем шторы, получите ли вы тогда хоть какое-нибудь различие?» Бесспорно. Подвесьте в ящике маятник на шарнирном подвесе, его плоскость во время качаний начнет в Стокгольме медленно поворачиваться, а в Кито — нет, хотя шторы и там и там опущены. И этот факт



вовсе не приведет к гибели науки. Ведь *в чем* ее основное предположение, ее фундаментальная философия? Мы уже сказали об этом в гл. 1: *единственное мерило справедливости любой идеи — это опыт*. Если выясняется, что большинство экспериментов в Кито приводят к тому же, что и в Стокгольме, то из этого «большинства экспериментов» можно вывести общий закон, а про те эксперименты, которые не приводят к одинаковым результатам, мы скажем, что на них повлиял характер местности близ Стокгольма. Мы можем разными способами подытоживать опыты, но пусть нас прежде времени не учат, что это за способы. Если нам говорят, что одни и те же опыты всегда должны приводить к одним и тем же результатам, — это прекрасно; но когда проверка покажет, что это *не так*, стало быть, это *не так*. Верьте только своим глазам, а прочие свои идеи формулируйте уже на основе опыта.

Вернемся опять к квантовой механике и к основам физики. Мы не будем пока входить в детали квантово-механических принципов, их не так просто понять. Мы их просто примем, как они есть, а остановимся на кое-каких их следствиях. Вот одно из них: то, что мы обычно считаем волнами, может вести себя как частица; частицы же ведут себя как волны; то же относится и к любым телам. Между волной и частицей просто нет различия. Квантовая механика объ-

*единяет* идею поля, волн поля и частиц в одно. При низких частотах волновые свойства проявляются более явно и поэтому оказываются полезнее для приближенного описания в образах нашего повседневного опыта. Но по мере того, как частота возрастает, становится все очевиднее, что через приборы, измеряющие наше явление, проходит не волна, а частица. На самом деле, хоть мы и говорим о высоких частотах, волновые явления, если частота их превышает  $10^{12}$  гц, заметить уже нельзя. Мы только *приходим к выводу* о наличии высокой частоты, зная энергию частиц и предполагая, что верна идея квантовой механики о частице-волне.

Возникает к тому же и новый взгляд на электромагнитное взаимодействие. В добавление к электрону, протону и нейтрону появляется новая *частица*, называемая *фотоном*. Само это новое воззрение на взаимодействие электронов и протонов, т.е. электромагнитную теорию, правильную в квантово-механическом смысле, называют *квантовой электродинамикой*. Эту фундаментальную теорию взаимодействия света и вещества, или электрического поля и зарядов, следует считать крупнейшим достижением физики. В ней одной таятся главные правила всех обычных явлений, кроме тяготения и ядерных процессов. Например, из квантовой электродинамики выводятся все известные электрические,

механические и химические законы, законы соударений бильярдных шаров, движения проводников в магнитном поле, удельной теплоемкости угарного газа, цвета неоновых букв, плотности соли и реакции образования воды из водорода и кислорода. Все это поддается расчету, если условия, в каких протекает явление, просты. Практически этого никогда не случается, но все же мы более или менее понимаем, что происходит. И до сего времени не было найдено ни одного исключения из законов квантовой электродинамики, только в атомных ядрах ее оказывается недостаточно; да и про них мы не можем сказать, что здесь наблюдаются какие-то исключения, просто мы не знаем, что там происходит.

Далее, квантовая электродинамика — в принципе это также теория всей химии и всех жизненных процессов, если предположить, что жизнь сводится в конечном счете к химии, а значит, и к физике (сама химия уже свелась к физике, и та часть физики, которая включает в себя химию, уже разработана). Мало того, та же квантовая электродинамика, эта величественная наука, предсказывает немало и новых явлений. Во-первых, она говорит о свойствах фотонов очень высоких энергий, гамма-излучения и т.д. Она предсказала еще одно очень оригинальное явление, а именно, что, кроме электрона, должна существовать другая частица с той же массой, но

с противоположным зарядом, так называемый *позитрон*, и что электрон и позитрон, повстречавшись, могут друг друга истребить, излучив при этом свет или гамма-кванты (что, собственно, одно и то же; свет и  $\gamma$ -излучение — лишь разные точки на шкале частот).

По-видимому, справедливо и обобщение этого правила: существование античастицы для любой частицы. Античастица электрона носит имя позитрона; у других частиц названия присвоены по другому принципу: если частицу называли *так-то*, то античастицу называют *анти-так-то*, скажем, антипротон, антинейтрон. В квантовую электродинамику вкладывают всего *два числа* (они называются массой электрона и зарядом электрона) и полагают, что все остальные числа в мире можно вывести из этих двух. На самом деле, однако, это не совсем верно, ибо существует еще целая совокупность химических чисел — весов атомных ядер. Ими нам и следует сейчас заняться.

#### § 4. Ядра и частицы

Из чего состоят ядра? Чем части ядра удерживаются вместе? Обнаружено, что существуют силы огромной величины, которые и удерживают составные части ядра. Когда эти силы высвобо-

ждаются, то выделяемая энергия по сравнению с химической энергией огромна, это все равно, что сравнить взрыв атомной бомбы со взрывом тротила. Объясняется это тем, что атомный взрыв вызван изменениями внутри ядра, тогда как при взрыве тротила перестраиваются лишь электроны на внешней оболочке атома.

Так каковы же те силы, которыми нейтроны и протоны скреплены в ядре?

Электрическое взаимодействие связывают с частицей — фотоном. Аналогично этому Юкава предположил, что силы притяжения между протоном и нейтроном обладают полем особого рода, а колебания этого поля ведут себя как частицы. Значит, не исключено, что, помимо нейтронов и протонов, в мире существуют некоторые иные частицы. Юкава сумел вывести свойства этих частиц из уже известных характеристик ядерных сил. Например, он предсказал, что они должны иметь массу, в 200—300 раз большую, чем электрон. И, о чудо! — в космических лучах как раз открыли частицу с такой массой! Впрочем, чуть погодя выяснилось, что это совсем не та частица. Назвали ее  $\mu$ -мезон, или мюон.

И все же несколько попозже, в 1947 или 1948 г., обнаружилась частица —  $\pi$ -мезон, или пион, — удовлетворявшая требованиям Юкавы. Выходит, чтобы получить ядерные силы, к протону и нейтрону надо добавить пион. «Прекрас-

но! — воскликнете вы. — С помощью этой теории мы теперь соорудим квантовую ядродинамику, и пионы послужат тем целям, ради которых их ввел Юкава; посмотрим, заработает ли эта теория, и если да, то объясним все». Напрасные надежды! Выяснилось, что расчеты в этой теории столь сложны, что никому еще не удалось их проделать и извлечь из теории какие-либо следствия, никому не выпала удача сравнить ее с экспериментом. И тянется это уже почти 20 лет!

С теорией что-то не клеится; мы не знаем, верна она или нет; впрочем, мы уже знаем, что в ней чего-то недостает, что *какие-то* неправильности в ней таятся. Покуда мы топтались вокруг теории, пробуя вычислить следствия, экспериментаторы за это время кое-что открыли. Ну, тот же  $\mu$ -мезон, или мюон. А мы до сей поры не знаем, на что он годится. Опять же, в космических лучах отыскивали множество «лишних» частиц. К сегодняшнему дню их уже свыше 30, а связь между ними все еще трудно ухватить, и непонятно, чего природа от них хочет и кто из них от кого зависит. Перед нами все эти частицы пока не тот факт, что имеется куча разрозненных частиц, есть лишь отражение наличия бессвязной информации без сносной теории. После неоспоримых успехов квантовой электродинамики — какой-то набор сведений из ядерной физики, обрывки знаний, полуопытных-полутеоретиче-

ских. Задаются, скажем, характером взаимодействия протона с нейтроном и смотрят, что́ из этого выйдет, не понимая на самом деле, откуда эти силы берутся. Сверх описанного никаких особых успехов не произошло.

Но химических элементов ведь тоже было множество, и внезапно между ними удалось увидеть связь, выраженную периодической таблицей Менделеева. Скажем, калий и натрий — вещества, близкие по химическим свойствам, — в таблице попали в один столбец. Так вот, попробовали соорудить таблицу типа таблицы Менделеева и для новых частиц. Одна подобная таблица была предложена независимо Гелл-Манном в США и Нисидзимой в Японии. Основа их классификации — новое число, наподобие электрического заряда. Оно присваивается каждой частице и называется ее «странностью»  $S$ . Число это не меняется (так же, как электрический заряд) в реакциях, производимых ядерными силами.

В табл. 2.2 приведены новые частицы. Мы не будем пока подробно говорить о них. Но из таблицы по крайней мере видно, как мало мы еще знаем. Под символом каждой частицы стоит ее масса, выраженная в определенных единицах, называемых мегаэлектронвольт, или  $Мэв$  ( $1 Мэв$  — это  $1,782 \cdot 10^{-27}$  г). Не будем входить в исторические причины, заставившие ввести эту единицу. Частицы помассивнее стоят в таблице повыше.

Таблица 2.2. Элементарные частицы

| Масса,<br>Мэв | -e                                           | Заряд<br>0                                                                                         | +e                                                          | Группировка<br>и<br>странность |
|---------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 1700          | $\frac{\Omega^-}{1672}$                      |                                                                                                    |                                                             | $S=-3$                         |
| 1600          |                                              |                                                                                                    |                                                             |                                |
| 1500          |                                              |                                                                                                    |                                                             |                                |
| 1400          |                                              |                                                                                                    |                                                             |                                |
| 1300          | $\frac{\Xi^-}{1321}$                         | $\frac{\Xi^0}{1315}$                                                                               |                                                             | $S=-2$                         |
| 1200          | $\frac{\Sigma^-}{1197}$                      | $\frac{\Sigma^0}{1192}$                                                                            | $\frac{\Sigma^+}{1189}$                                     | $S=-1$                         |
| 1100          |                                              | $\frac{\Lambda^0}{1116}$                                                                           |                                                             | $S=-1$                         |
| 1000          |                                              |                                                                                                    | $\frac{\phi \rightarrow K^+ K^-}{1020}$                     |                                |
| 900           | $\frac{K^{*-}}{892}$                         | $\frac{\pi}{939,6}$<br>$\frac{K^{*0} \bar{K}^{*0}}{898}$                                           | $\frac{p}{938,3}$<br>$\frac{K^{*+} \rightarrow K \pi}{892}$ | $S=0$<br>$S=-1$<br>$S=+1$      |
| 800           |                                              | $\frac{\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0}{783}$<br>$\frac{\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-}{770}$ | $\frac{\rho^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0}{770}$                | $S=0$<br>$S=0$                 |
| 700           |                                              |                                                                                                    |                                                             |                                |
| 600           |                                              | $\frac{\eta^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0}{549}$                                                 |                                                             | $S=0$                          |
| 500           | $\frac{K^-}{494}$                            | $\frac{K^0 \bar{K}^0}{498}$                                                                        | $\frac{K^+}{494}$                                           | $S=-1$<br>$S=+1$               |
| 400           |                                              |                                                                                                    |                                                             |                                |
| 300           |                                              |                                                                                                    |                                                             |                                |
| 200           |                                              |                                                                                                    |                                                             |                                |
| 100           | $\frac{\pi^-}{139,6}$<br>$\frac{\mu}{105,6}$ | $\frac{\pi^0}{135,0}$                                                                              | $\frac{\pi^+}{139,6}$                                       | $S=0$                          |
| 0             | $\frac{e^-}{0,51}$                           | $\frac{\nu_e^0}{0}$ $\frac{\nu_\mu^0}{0}$                                                          |                                                             |                                |

Барионы

Мезоны

Лептоны



В одной колонке стоят частицы одинакового электрического заряда, нейтральные — посерединке, положительные — направо, отрицательные — налево.

Частицы подчеркнуты сплошной линией, «резонансы» — штрихами. Некоторых частиц в таблице нет совсем: нет фотона и гравитона, очень важных частиц с нулевыми массой и зарядом (они не попадают в барион-мезон-лептонную схему классификации), нет и кое-каких новейших резонансов ( $\phi$ ,  $f$ ,  $Y^{*}$  и др.). Античастицы мезонов в таблице приводятся, а для античастиц лептонов и барионов надо было бы составить новую таблицу, сходную с этой, но только зеркально отраженную относительно нулевой колонки. Хотя все частицы, кроме электрона, нейтрино, фотона, гравитона и протона, неустойчивы, продукты их распада написаны только для резонансов. Странность лептонов тоже не написана, так как это понятие к ним неприменимо — они не взаимодействуют сильно с ядрами.

Частицы, стоящие вместе с нейтроном и протоном, называют *барионами*. Это «лямбда» с массой 1115,4 Мэв и три другие — «сигмы», называемые сигма-минус, сигма-нуль, сигма-плюс, с почти одинаковыми массами. Группы частиц почти одинаковой массы (отличие на 1–2%) называются *мультиплетами*. У всех частиц в мультиплете странность одинакова. Первый мультиплет — это

пара (*дублет*) протон—нейтрон, потом идет *синглет* (одиночка) лямбда, потом — *триплет* (тройка) сигм, дублет кси и синглет омега-минус. Начиная с 1961 г. начали открывать новые тяжелые частицы. Но *частицы ли* они? Живут они так мало, распадаются так быстро, что неизвестно, назвать ли их новыми частицами или считать «резонансным» взаимодействием между  $\Lambda$  и  $\pi$  при некоторой фиксированной энергии.

Для ядерных взаимодействий, кроме барионов, необходимы другие частицы — *мезоны*. Это, во-первых, три разновидности пионов (плюс, нуль и минус), образующие новый триплет. Найдены и новые частицы —  $K$ -мезоны (это дублет  $K^+$  и  $K^0$ ). У каждой частицы бывает античастица, если только частица не оказывается *своей собственной* античастицей, скажем  $\pi^+$  и  $\pi^-$  — античастицы друг друга, а  $\pi^0$  — сам себе античастица. Античастицы и  $K^-$  с  $K^+$  и  $K^0$  с  $\bar{K}^0$ . Кроме того, после 1961 г. мы начали открывать новые мезоны, или *вроде-мезоны*, распадающиеся почти мгновенно. Одна такая диковинка называется омега,  $\omega$ , ее масса 783, она превращается в три пиона; есть и другое образование, из которого получается пара пионов.

Подобно тому как из очень удачной таблицы Менделеева выпали некоторые редкие земли, точно так же из нашей таблицы выпадают некоторые частицы. Это те частицы, которые с ядра-

ми сильно не взаимодействуют, к ядерному взаимодействию отношения не имеют и между собой сильно тоже не взаимодействуют (под сильным понимается мощный тип взаимодействия, дающего атомную энергию). Называются эти частицы *лептоны*; к ним относятся электрон (очень легкая частица с массой  $0,51 \text{ Мэв}$ ) и мюон (с массой в 206 раз больше массы электрона). Насколько мы можем судить по всем экспериментам, электрон и мюон различаются *только* массой. Все свойства мюона, все его взаимодействия ничем не отличаются от свойств электрона — только один тяжелее другого. Почему он тяжелее, какая ему от этого польза, мы не знаем. Кроме них, есть еще нейтральный лептон — *нейтрино*, с массой нуль. Более того, сейчас известно, что есть *два* сорта нейтрино: одни, связанные с электронами, а другие — с мюонами.

И наконец, существуют еще две частицы, тоже с ядрами не взаимодействующие. Одну мы знаем уже — это фотон; а если поле тяготения также обладает квантово-механическими свойствами (хотя пока квантовая теория тяготения не разработана), то, возможно, существует и частица гравитон с массой нуль.

Что такое «масса нуль»? Массы, которые мы приводили, это массы *покоящихся* частиц. Если у частицы масса нуль, то это значит, что она не смеет *покоиться*. Фотон никогда не стоит на ме-

сте, скорость его равна всегда  $300\,000\text{ км/сек}$ . Мы с вами еще разберемся в теории относительности и попытаемся глубже вникнуть в смысл понятия массы.

Итак, мы встретились с целым строем частиц, которые все вместе, по-видимому, являются очень фундаментальной частью вещества. К счастью, эти частицы *не все* отличаются по своему взаимодействию друг от друга. Видимо, есть только *четыре типа* взаимодействий между ними. Перечислим их в порядке убывающей силы: ядерные силы, электрические взаимодействия,  $\beta$ -распадное взаимодействие и тяготение. Фотон взаимодействует со всеми заряженными частицами с силой, характеризуемой некоторым постоянным числом  $1/137$ . Детальный закон этой связи известен — это квантовая электродинамика. Тяготение взаимодействует со всякой *энергией*, но чрезвычайно слабо, куда слабее, чем электричество. И этот закон известен. Потом идут так называемые слабые распады:  $\beta$ -распад, из-за которого нейтрон распадается довольно медленно на протон, электрон и нейтрино. Тут закон выяснен лишь частично. А так называемое сильное взаимодействие (связь мезона с барионом) обладает по этой шкале силой, равной единице, а закон его совершенно темен, хоть и известны кое-какие правила, вроде того, что количество барионов ни в одной реакции не меняется.

**Таблица 2.3. Элементарные взаимодействия**

| Взаимодействие                | Сила*           | Закон                               |
|-------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
| Фотон с заряженными частицами | $\sim 10^{-2}$  | Известен                            |
| Тяготение с энергией          | $\sim 10^{-40}$ | Известен                            |
| Слабые распады                | $\sim 10^{-5}$  | Частично известен                   |
| Мезоны с барионами            | $\sim 1$        | Неизвестен (кроме некоторых правил) |

\* «Сила» — безразмерная мера константы связи, проявляющаяся в каждом взаимодействии (знак  $\sim$  означает «примерно»).

Положение, в котором находится современная физика, следует считать ужасным. Я бы подытожил его такими словами: вне ядра мы, видимо, знаем все; внутри него справедлива квантовая механика, нарушений ее принципов там не найдено. Сцена, на которой действуют все наши знания, — это релятивистское пространство-время; не исключено, что с ним связано и тяготение. Мы не знаем, как началась Вселенная, и мы ни разу не ставили опытов с целью точной проверки наших представлений о пространстве-времени на малых расстояниях, мы только *знаем*, что вне этих расстояний наши воззрения безошибочны. Можно было бы еще добавить, что правила игры — это принципы квантовой механики; и к новым частицам они, насколько нам известно, приложимы не хуже, чем к старым. Поиски

происхождения ядерных сил приводят нас к новым частицам; но все эти открытия вызывают только замешательство. У нас нет полного понимания их взаимных отношений, хотя в некоторых поразительных связях между ними мы уже убедились. Мы, видимо, постепенно приближаемся к пониманию мира заатомных частиц, но неизвестно, насколько далеко мы ушли по этому пути.

## Глава 3

# ФИЗИКА И ДРУГИЕ НАУКИ

---

*Введение. Химия. Биология.  
Астрономия. Геология. Психология.  
С чего все пошло?*

---

### § 1. Введение

Физика — это самая фундаментальная из всех наук, самая всеобъемлющая; огромным было ее влияние на все развитие науки. Действительно, ведь нынешняя физика вполне равноценна давнишней *натуральной философии*, из которой возникло большинство современных наук. Не зря физику вынуждены изучать студенты всевозможных специальностей; во множестве явлений она играет основную роль.

В этой главе мы попытаемся рассказать, какого рода фундаментальные проблемы встают перед соседними науками. Жаль, что нам не придется по-настоящему заняться этими науками, их проблемами; мы не сможем прочувствовать всю их сложность, тонкость и красоту. Из-за нехватки места мы не коснемся также связи физики с техникой, с промышленностью, с обще-

ственной жизнью и военным искусством. Даже на замечательной связи, объединяющей физику с математикой, мы не задержимся. (Математика, с нашей точки зрения, не наука в том смысле, что она не относится к *естественным* наукам. Ведь мерило ее справедливости отнюдь не опыт.) Кстати, не все то, что не наука, уж обязательно плохо. Любовь, например, тоже не наука. Словом, когда какую-то вещь называют не наукой, это не значит, что с нею что-то неладно: просто не наука она, и всё.

## § 2. Химия

Химия испытывает на себе влияние физики, пожалуй, сильнее, чем любая другая наука. Когда-то, в свои младенческие годы, когда химия почти целиком сводилась к тому, что мы сейчас называем неорганической химией (т.е. химии веществ, не связанных с живыми телами), когда кропотливым трудом химиков открывались многие химические элементы, их связь друг с другом, изучались их соединения, анализировался состав почвы и минералов, в те годы химия сыграла важную роль в становлении физики. Эти науки взаимодействовали очень сильно: вся теория атомного строения вещества получила основательную поддержку в химическом эксперименте.



Химическую теорию, т.е. теорию самих реакций, подытожила Периодическая система Менделеева. Она выявила немало удивительных связей между разными элементами — стало ясно, что с чем и как соединяется; все эти правила составили неорганическую химию. Сами они в свою очередь были в конечном счете объяснены квантовой механикой. Стало быть, на самом деле теоретическая химия — это физика. Однако объяснение, даваемое квантовой механикой, — это все-таки объяснение *в принципе*. Мы уже говорили, что знание шахматных правил — это одно, а умение играть — совсем другое. Можно знать правила, а играть неважно. Точно так же очень и очень непросто точно предсказать, что произойдет в такой-то химической реакции. И все же в самых глубинах теоретической химии лежит квантовая механика.

Есть к тому же ветвь физики и химии, и очень важная ветвь, к которой они обе приложили руки. Речь идет о применении статистики к тем случаям, когда действуют законы механики, т.е. о *статистической механике*. В любой химической реакции действует много атомов, а движения их случайны и замысловаты. Если бы мы могли проанализировать каждое столкновение, подробно проследить движение каждой молекулы, то мы бы всегда знали, что случится. Но нужно так много чисел, чтобы отметить путь всех молекул,

что никакой емкости вычислительной машины и уж во всяком случае емкости мозга не хватит. Значит, важно научиться работать с такими сложными системами. Статистическая механика, кроме того, лежит в основе теории тепловых явлений, или термодинамики.

В наше время неорганическая химия как наука свелась в основном к физической и квантовой химии; первая изучает скорости реакций и прочие их детали (как попадает молекула в молекулу, какая из частей молекулы оторвется первой и т.д.), а вторая помогает понимать происходящее на языке физических законов.

Другая ветвь химии — *органическая химия*, химия веществ, связанных с жизненными процессами. Одно время думали, что подобные вещества столь необыкновенны, что их не изготовишь своими руками из неорганических веществ. Но это оказалось не так: органические вещества отличаются от неорганических только большей сложностью расположения атомов. Органическая химия, естественно, тесно связана с биологией, снабжающей ее веществами, и с промышленностью; далее, многое из физической химии и квантовой механики столь же приложимо к органическим соединениям, как и к неорганическим. Впрочем, главные задачи органической химии вовсе не в этом, а в анализе и синтезе веществ, образуемых в биологических системах, в живых

телах. Отсюда можно постепенно перейти к биохимии и к самой биологии, т.е. к молекулярной биологии.

### § 3. Биология

Итак, мы пришли к науке, которая занята изучением живого, — к *биологии*. Когда она делала свои первые шаги, биологи решали чисто описательные задачи; им нужно было выяснить, *каким* бывает живое, им приходилось, скажем, подсчитывать, сколько у блохи на ноге волосков, и т.д. Когда все это (с большим интересом) было изучено, они обратились к *механизму* функционирования живого, сперва, естественно, очень грубо, в общих чертах, потому что в разных тонкостях разобраться было непросто.

Когда-то между биологией и физикой существовали интересные отношения: именно биология помогла физике открыть *закон сохранения энергии*; ведь Майер установил этот закон при изучении количества тепла, выделяемого и поглощаемого живым организмом.

Если взглянуть в биологию живых организмов, можно заметить множество чисто физических явлений: циркуляцию крови, давление и т.п. Взять, к примеру, нервы. Наступив на острый камешек, мы мгновенно узнаем об этом: что-то

нам о том говорит, какая-то информация поднимается вверх по ноге. Как же это происходит? Изучая нервы, биологи пришли к выводу, что это очень нежные трубочки со сложными, очень тонкими стенками. Через эти стенки в клетку поступают ионы; получается нечто вроде конденсатора с положительными ионами снаружи и отрицательными внутри. У такой мембраны есть замечательное свойство: если в одном месте она «разряжается», т.е. если в каком-то месте ионы пройдут насквозь, так что электрическое напряжение здесь упадет, то соседние ионы почувствуют это электрическое влияние; это так подействует на мембрану в соседнем месте, что она тоже пропустит сквозь себя ионы. В свою очередь это скажется на следующем месте и т.д. Возникнет волна «проницаемости» мембраны; она побежит вдоль нервного волокна, если один конец его «возбудится» острым камнем. Выходит словно длинная цепочка костяшек домино, поставленных торчком; толкнешь крайнюю, она — следующую и т.д. Конечно, больше одного сообщения так не передашь, надо снова поднять все костяшки; и в нервной клетке тоже после этого идут процессы медленного накопления ионов и подготовки нерва к новому импульсу. Так мы узнаём, что мы делаем (или по крайней мере где мы находимся). Электрические явления при прохождении нервного импульса, конечно, можно

регистрировать электрическими приборами. Поскольку эти явления *существуют*, то без физики электричества нельзя понять проводимость по нерву.

Обратное явление происходит, когда откуда-то из мозга по нерву передается сообщение. Что делается тогда на конце нерва? Нерв там дает разветвления, которые связаны с мышечной структурой; называют их *концевые ответвления*. По причинам, точно не известным, в момент, когда импульс достигает конца нерва, из него вылетают маленькие пакетики реактивов, называемых *ацетилхолин* (5—10 молекул за раз); они влияют на мышечное волокно, и оно сокращается — видите, как все просто! Но что же все-таки вынуждает мышцу сокращаться? Мышца — это большое число плотно расположенных волокон; в них содержатся два разных вещества — миозин и актомиозин; и все же механизм, при помощи которого химическая реакция, вызванная ацетилхолином, меняет размер молекулы, пока еще не выяснен. Иначе говоря, неизвестны самые основные процессы, ответственные за механические движения мышц.

Биология — настолько широкое поле деятельности, что есть уйма проблем, о которых мы даже не упоминаем; скажем, вопрос о том, как осуществляется зрение (что свет делает внутри глаза) или как работает ухо и т. д. (Как работает *мысль*,

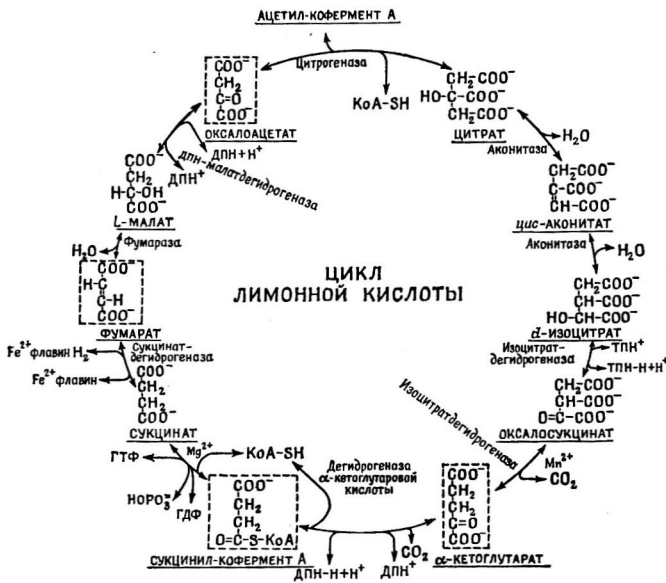
мы обсудим позже, когда будем говорить о психологии.)

Так вот, все эти вопросы, стоящие перед биологией, на самом деле для биолога отнюдь не главные, отнюдь не они лежат в основе жизни. Если мы их и поймем, нам все равно не понять сущности жизни. Вот вам пример: люди, изучающие нервы, понимают, что их работа очень нужна, ведь животных без нервов не бывает. Но *жизнь без нервов возможна*. У растений нет ни нервов, ни мышц, и все же они работают, живут (что одно и то же). Значит, самые фундаментальные проблемы биологии нужно искать глубже.

При этом мы установим, что у всех живых существ есть много общих черт. Самое же общее между ними то, что они состоят из *клеток*, внутри каждой из которых действует сложный механизм химических превращений. В растительных клетках, например, есть механизм поглощения света и выработки сахарозы, которая потом в темноте поглощается, поддерживая жизнь растения. Когда животное поедает растение, сахароза порождает в животном цепь химических реакций, тесно связанных с фотосинтезом растений (и обратной цепочкой в темноте).

В клетках живых организмов происходит множество хитро задуманных химических реакций: одно соединение превращается в другое, затем в третье, затем еще и еще. Фиг. 3.1 дает

некое представление о гигантских усилиях, предпринятых в изучении биохимии; там сведены воедино наши знания о малой доле того множества цепочек реакций (может быть, примерно 1% общего количества), которые происходят в клетке.



Фиг. 3.1. Цикл Кребса.

Вы видите здесь ряд молекул, последовательно превращающихся одна в другую, — цикл с довольно мелкими шагами. Это — цикл Кребса, или дыхательный цикл. Судя по изменениям в молекулах, каждое вещество и каждый шаг

в цикле довольно просты. Но *эти изменения от-носительно трудно воспроизводятся лабораторным путем*. Это открытие необыкновенной важности в биохимии. Дело вот в чем. Если есть два сходных вещества, то как раз их-то часто нельзя превратить друг в друга, потому что эти две формы обычно отделены энергетическим барьером, «перевалом». Ведь, желая перенести предмет на новое место на том же уровне по другую сторону перевала, вы сперва должны поднять его над перевалом. Это требует добавочной затраты энергии. По той же причине многие реакции не происходят, им не хватает так называемой *энергии активации*. Если вы хотите присоединить к химическому соединению лишний атом, то для того, чтобы он пристал куда надо, его следует придвинуть *вплотную*, иначе нужная перестановка не произойдет, он лишь немного взбежит по «склону» и скатится обратно. Но если б вы могли, буквально повертев молекулу в руках, раздвинуть ее атомы, ввести в образовавшуюся дыру ваш атом и затем закрыть отверстие, то вы бы *миновали* подъем, никакой затраты энергии не понадобилось бы и реакция прошла бы легче. Так вот, в клетках и впрямь существуют *очень* большие молекулы (куда больше, чем те, чьи изменения изображены на фиг. 3.1), которые как-то умеют расставить малые молекулы так, чтобы реакция протекала без труда. Они, эти большие



сложные устройства, называются *ферменты* (или закваска; называли их так потому, что обнаружили их при сбраживании сахара. Кстати, первые из реакций цикла Кребса были открыты именно при сбраживании). Реакции цикла идут только в присутствии ферментов.

Сам фермент состоит из другого вещества — *белка*. Молекулы ферментов велики и сложны. Все ферменты отличаются друг от друга, причем каждый предназначен для контроля некоторой определенной реакции. На фиг. 3.1 возле каждой реакции обозначены названия нужного фермента (а иногда один фермент контролирует и две реакции). Подчеркнем, что сам фермент в реакцию не вовлекается. Он не изменяется, его дело только передвинуть атом с одного места в другое. Передвинет в одной молекуле и готов уже заняться следующей. Совсем как станок на фабрике, причем должен иметься запас нужных атомов и возможность избавляться от ненужных. Возьмите, например, водород: существуют ферменты, имеющие специальные ячейки для переноса водорода в любой химической реакции. Скажем, имеются три или четыре фермента, которые понижают количество водорода; они используются во многих местах цикла. Интересно, что механизм, высвобождающий водород в одном месте, придерживает этот атом, чтобы использовать его еще где-нибудь.

Важнейшая деталь цикла, приведенного на фиг. 3.1, это превращение ГДФ в ГТФ (гуаназиндифосфат в гуаназинтрифосфат), потому что во втором веществе — ГТФ — энергии намного больше, чем в первом. Подобно тому как в некоторых ферментах имеется «ящик» для переноса атомов водорода, бывают еще особые «ящики» для переноса *энергии*; в них входит трифосфатная группа. В ГТФ больше энергии, чем в ГДФ, и когда цикл идет в одну сторону, создаются молекулы с избытком энергии; они могут привести в действие другие циклы, которым *требуется* энергия, например цикл сжатия мышцы. Мышца не сократится, если нет ГТФ. Можно поместить в воду мышечное волокно и добавить туда ГТФ, тогда волокно сократится, превращая ГТФ в ГДФ (если только присутствуют нужные ферменты). Таким образом, сокращение мышцы есть превращение ГДФ в ГТФ; накопленный в течение дня ГТФ используется в темноте для того, чтобы пустить весь цикл в обратную сторону. Как видите, ферменту все равно, в какую сторону идет реакция; если бы это было не так, нарушался бы один из законов физики.

Есть и другой резон, по которому для биологии и других наук важна именно физика, — это *техника эксперимента*. Например, нарисованная биохимическая схема не была бы еще до сего времени известна, если бы за нею не стояли

большие достижения экспериментальной физики. Дело в том, что для анализа этих невообразимо сложных систем нет лучшего средства, нежели ставить *метки* на атомах, участвующих в реакции. Если ввести в цикл немного углекислоты с «зеленой меткой» на ней и посмотреть, где метка окажется через 3 *сек*, потом через 10 *сек* и т.д., то можно проследить течение всей реакции. Но как сделать «зеленую метку»? При помощи различных *изотопов*. Напомним, что химические свойства атомов определяются числом *электронов*, а не массой ядра. Но в атоме углерода, к примеру, может быть либо шесть, либо семь нейтронов наряду с обязательными для углерода шестью протонами. В химическом отношении атомы  $C^{12}$  и  $C^{13}$  не отличаются, но по массе и ядерным свойствам они различны, а значит, и различимы. Используя эти изотопы, можно проследить ход реакции. Еще лучше для этого радиоактивный изотоп  $C^{14}$ ; с его помощью можно весьма точно проследить за малыми порциями вещества.

Вернемся, однако, к описанию ферментов и белков. Не все белки — ферменты, но все ферменты — белки. Существует множество белков, таких как белки мышц, структурные белки, скажем, в хрящах, волосах, коже, не являющихся ферментами. И все-таки белки — очень характерная для жизни субстанция; во-первых, это

составная часть всех ферментов, а во-вторых, составная часть многих иных живых веществ. Структура белков проста и довольно занята. Они представляют собой ряды, или цепи, различных *аминокислот*. Существует два десятка разных аминокислот, и все они могут сочетаться друг с другом, образуя цепи, костью которых являются группы  $\text{CO}-\text{NH}$  и т.п. Белок — это всего лишь цепочки, сложенные из этих 20 аминокислот. Каждая аминокислота, по всей вероятности, служит для каких-то специальных целей. В некоторых аминокислотах в определенном месте находится атом серы; два атома серы в одном и том же белке образуют связь, т.е. схватывают цепь в двух точках и составляют петлю. В других есть избыточный атом кислорода, придающий им кислотные свойства; характеристики третьих — щелочные. В некоторых бывают большие группы атомов, свисающие с одной стороны и занимающие много места. Одна из аминокислот — пролин — в действительности не аминокислота, а иминокислота. Эта небольшая разница приводит к тому, что когда в цепи есть пролин, то цепь перекручивается. Если бы вы захотели создать какой-то определенный белок, то вам пришлось бы дать такие указания: здесь поместите серный крюк, затем добавьте чего-нибудь, чтобы заполнить место, теперь привяжите что-нибудь, чтобы цепь перекрутилась, и т.д. Получились бы скреп-

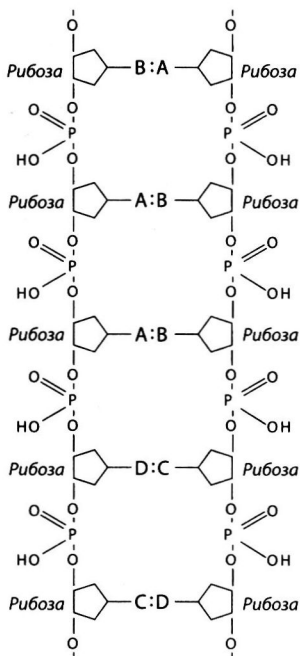
ленные между собой замысловатые цепочки со сложной структурой; все ферменты, по-видимому, устроены именно так. Одним из триумфов современной науки было открытие (в 1960 г.) точного пространственного расположения атомов некоторых белков; в них 56—60 аминокислот подключены друг за другом. Было установлено точное местоположение свыше 1000 атомов (даже до 2000, если считать и водород), входящих в сложную структуру двух белков (один из них — гемоглобин). А одна из печальных сторон этого открытия проявилась в том, что из этой картины ничего увидеть нельзя; мы не понимаем, почему она такая. Именно эту проблему и следует сейчас атаковать.

Есть и другая проблема в биологии: откуда ферменты «знают», кем им стать? От красноглазой мухи рождается опять красноглазая мушка; значит, вся информация о ферментах, создающих красный пигмент, должна перейти к очередной мушке. Передает эту информацию не белок, а вещество в ядре клетки, ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота). Это — та ключевая субстанция, которая передается от одной клетки к другой (половые клетки, например, почти целиком состоят из ДНК) и уносит с собой инструкцию, как делать ферменты. ДНК — это «калька», печатная матрица. На что похожа эта калька, как она должна действовать? Первое — она должна воспро-

изводить самое себя; второе — она должна быть способна давать задания белку. Что до первого, то можно было бы думать, что это происходит так же, как воспроизведение клеток: клетки подрастают и делятся пополам. Может быть, молекулы ДНК тоже растут и тоже делятся? Нет, это исключено. Ведь *атомы* наверняка не растут и не делятся! Видимо, для репродукции молекул нужен другой путь, похитрее.

Структура ДНК долго изучалась сперва химически (составные части), затем рентгенографиче-

ски (пространственная структура). В результате пришли к следующему знаменательному открытию: молекула ДНК — это пара цепочек, навитых друг на друга. Скелет каждой цепочки, хотя и похожий на белковые цепи, но химически отличный от них, — это ряд сахарных и фосфатных групп, как показано на фиг. 3.2.



Фиг. 3.2. Схема ДНК.

Из этой схемы видно, как в цепи может храниться инструкция, ибо, разняв цепочку на две нитки, вы получаете ряд веществ *BAADC...*; не исключено, что этот ряд у каждого организма свой. Значит, можно думать, что каждый особый ряд ДНК содержит в себе особые указания, как производить белки.

На схеме видны пары поперечных звеньев, присоединенных к сахарным группам и стягивающих между собой две нити. Эти звенья неодинаковы; есть четыре сорта звеньев — аденин, тимин, цитозин, гуанин, обозначаемые *A*, *B*, *C* и *D*. Интересно, что не всякие звенья спариваются. Например, возможны пары *AB* или *CD*; они размещены на двух нитях так, что «подходят друг к другу», обладают сильной энергией взаимодействия. Но *C* к *A* или *B* к *C* не подходит; если в цепи стоит *C*, то в другой цепи в этом месте должно быть только *D*. Каждой букве в одной цепи соответствует определенная буква в другой.

Как же мыслится при этом воспроизведение? Пусть цепь расщеплена на две. Как сделать другую такую же? Если в веществе клетки есть фабрика, вырабатывающая фосфат, сахар и звенья *A*, *B*, *C*, *D* (пока не привязанные к цепи), то к нашей половинке цепочки присоединятся только подходящие звенья, дополняющие *BAADC*, т.е. *ABBCD...* При делении клетки цепь разнимается

посередине на две нитки, каждая переходит в свою клетку и там набирает себе дополнение.

Наконец, последний вопрос: как порядок следования *A, B, C, D* в ДНК определяет расстановку аминокислот в белках? Ответа пока нет. Это основная нерешенная проблема современной биологии. Пока мы располагаем только какими-то обрывками информации об этом. В клетке имеются мельчайшие частички — микросомы; сейчас известно, что в них и вырабатываются белки. Но микросомы находятся не в ядре, не там, где находится ДНК со своими инструкциями. По-видимому, в этом есть какой-то смысл. Известно, однако, что от ДНК отрываются кусочки молекул, не такие длинные, как ДНК, несущая в себе всю информацию, а нечто вроде некрупных ее долек. Называют их РНК, но не в этом дело. Это нечто вроде уменьшенной копии ДНК. Известно, что РНК как-то переносит в микросому сообщение о том, какой сорт белка нужно изготовить. (Этот факт уже известен.) После этого в микросоме образуется белок. Это тоже известно. Но различные детали того, как аминокислоты входят в белки и как они располагаются в согласии с кодом, зашифрованным в РНК, пока не известны. Мы не умеем читать этот код. Если «написано», например, *АВССА*, то мы не знаем, какой белок будет приготовлен.



Право же, ни одна наука, ни одна отрасль знаний не движутся так бурно по всем направлениям вперед, как биология. Но если б мы должны были назвать то самое главное, что ведет нас сейчас все вперед и вперед в наших попытках понять явление жизни, мы обязаны были бы сказать: *«все тела состоят из атомов»*, всё, что происходит в живых существах, может быть понято на языке движений и покачиваний атомов.

## § 4. Астрономия

В нашем стремительном обзоре всей Вселенной очередь дошла до астрономии. Астрономия — старше физики. Фактически физика и возникла из нее, когда астрономия заметила поразительную простоту движения звезд и планет; объяснение этой простоты и стало *началом* физики. Но самым выдающимся открытием астрономии было открытие того, что *звезды состоят из таких же атомов, что и Земля\**. Как это было

---

\* Как лихо я управился с этим! Как много скрыто за каждой фразой этого короткого рассказа. «Звезды и Земля сделаны из одинаковых атомов». Обычно мне одной такой темы хватает на целую лекцию. Поэты утверждают, что наука лишает звезды красоты, для нее, мол, звезды — просто газовые шары. Ничего не «просто». Я тоже люблю звезды и чувствую их красоту. Но кто из нас видит больше? Обширность небес превосходит мое воображение... Затерянный в этой карусели, мой маленький глаз способен видеть свет, которому миллион лет. Безбрежное зрелище Вселенной... и я сам — ее часть... Быть может, вещество моего

доказано? Каждый атом испускает свет определенных частот, подобно тому как у каждого музыкального инструмента есть свое звучание — определенный набор частот, или высот, звука. Слыша одновременно несколько тонов, мы можем разделить их; но способности нашего глаза в этом отношении далеко не столь велики, он не может разделить смесь цветов на составляющие части. Однако с помощью спектроскопа *становится возможным* анализ частот световых волн, он позволяет видеть истинные тона атомов различных звезд. Ведь два химических элемента были даже обнаружены на звездах прежде, чем на Земле: гелий (он был открыт на Солнце, потому он так и назван) и технеций (его обнаружили на некоторых холодных звездах). Но раз звезды состоят из тех же атомов, что и Земля, то это сильно продвигает нас вперед в понимании сущности звезд. Нам хорошо известно поведение атомов при высоких температурах и невысоких

---

тела извергнуто какой-нибудь забытой звездой, такой же, как вон та, чей взрыв я вижу сейчас. Или я смотрю на звезды гигантским оком Паломарского телескопа, вижу, как они устремляются во все стороны от той первоначальной точки, где, быть может, они некогда обитали бок о бок. Что это за картина и каков ее смысл? И *зачем все это?* Таинству Вселенной не причинит ущерба наше проникновение в какие-то ее секреты, ибо правда более поразительна, нежели то, что было нарисовано воображением художников прошлого! Почему же нынешние поэты не говорят об этом? Что за народ эти лирики, если они способны говорить о Юпитере только как о человеке, и молчат, если это огромный вращающийся шар из метана и аммиака?

плотностях, и это позволяет при помощи статистической механики анализировать поведение звездного вещества. Даже не умея воспроизводить звездное состояние на Земле, но опираясь на основные физические законы, мы часто указываем совершенно точно (а иногда почти точно), что происходит на звездах. Так физика помогает астрономии. Это может показаться странным, но распределение вещества внутри Солнца мы знаем куда лучше, чем его распределение внутри Земли. Казалось бы, что можно узнать, взглянув сквозь телескоп на пятнышко света? Однако *недра* звезд известны нам гораздо лучше, чем этого можно было бы ожидать, ибо мы умеем *рассчитывать*, что произойдет с атомами звезд при многих обстоятельствах.

Одно из наиболее впечатляющих открытий астрономии — это открытие источника энергии звезд, поддерживающего их горение. Один из тех, кто открыл это, отправился на прогулку с девушкой как раз в ночь после того, как понял, что на звездах происходит *ядерная реакция*, что в этом причина их свечения. Она сказала: «Взгляни, как чудесно сияют звезды!» А он ответил: «Да. Чудесно. А ведь сегодня я — единственный человек в мире, который знает, *почему* они сияют!» Она только рассмеялась. На нее не произвело впечатления, что он — единственный человек, понимающий, почему звезды светят. Что ж,

как это ни печально, быть одиноким и непонятым — это в порядке вещей.

Так вот, Солнце получает энергию от ядерного «сгорания» водорода, который переходит при этом в гелий. Из водорода в глубинах звезд вырабатываются далее другие химические элементы. Вещество, из которого сделаны *мы*, было когда-то «испечено» в звезде и выплеснуто наружу. Но откуда это известно? А вот откуда. Содержание различных изотопов в веществе  $C^{12}$ ,  $C^{13}$  и т.д. — никогда не меняется при *химических* превращениях, ибо для обоих изотопов *C* химические реакции одинаковы. Эти пропорции есть результат лишь *ядерных* реакций. Изучая пропорцию изотопов в остывшей, мертвой золе, каковой являемся мы, можно догадаться, на что была похожа *печь*, в которой сформировалось наше вещество. Она была похожа на звезды, и поэтому очень вероятно, что элементы «сделаны» в звездах и выброшены оттуда при взрывах, называемых нами новыми и сверхновыми звездами. Астрономия столь близка к физике, что еще не один раз в этом курсе мы обратимся к ней.

## § 5. Геология

Перейдем теперь к так называемым *наукам о Земле*, или *геологии*. К ним относятся прежде всего метеорология, или наука о погоде. Метео-

рологическая аппаратура — это физические приборы, так что метеорология снабжена приборами благодаря развитию экспериментальной физики (мы уже об этом говорили). Иное дело теория метеорологии, она никогда не была удовлетворительно разработана никем из физиков. «Странно, — скажете вы, — ведь это всего лишь воздух, разве мы не знаем уравнений движения воздуха?» Да, знаем. «Почему же, зная, в каком состоянии воздух сегодня, мы не можем предсказать его состояние на завтра?» Во-первых, мы не знаем, каково *на самом деле* сегодня состояние воздуха, ибо он то и дело где-то завихряется и струится. Воздух очень чувствителен к любым изменениям и попросту неустойчив. Чтобы понять, о какой неустойчивости я говорю, взгляните, как вода спокойно течет над плотиной и вдруг, падая, превращается во множество пузырьков и капель. Вы знаете состояние воды в момент, когда она переваливает через плотину, — она совершенно спокойна; откуда же берутся капли в момент падения? От чего зависит, на какие струи разобьется поток, где они возникнут, куда упадут? Все это неизвестно, потому что течение воды неустойчиво. Точно так же даже спокойный поток воздуха, проходя между гор, прихотливо распадается на отдельные вихри. Во многих областях науки мы сталкиваемся с тем, что носит название *турбулентное течение*, не поддающееся пока на-

шему анализу. Так что давайте лучше от темы «погода» перейдем побыстрее к геологии!

Главный вопрос геологии заключается в том, что сделало Землю такой, какая она есть? Самые очевидные из таких процессов происходят у нас на глазах: реки подмывают берега, поля заносит пылью и т.д. Это понять довольно легко, но ведь кроме эрозии, помимо разрушения должно что-то и обратное происходить. В среднем горы сейчас не ниже, чем в прошлом. Следовательно, должен происходить и процесс *горообразования*. Изучая геологию, вы убедитесь, что действительно происходит и горообразование, и вулканизм, но никто их не понимает; не понимает того, что составляет половину геологии. Действительно, природа вулканов не понята. Отчего бывают землетрясения, тоже в конечном счете не понята. Понимают, конечно, что если что-то с чем-то столкнется, то что-то треснет, что-то сдвинется — все это хорошо. Но что толкнуло, почему толкнуло? Существует теория, что внутри Земли имеются течения — происходит циркуляция из-за различия температур снаружи и внутри — и они в своем движении слегка толкают поверхность Земли. А если где-то встречаются два противных течения, то там должно накапливаться вещество, появляться горные хребты, они окажутся в сильно напряженном состоянии, возникнут вулканы, произойдут землетрясения.

Что можно сказать о недрах Земли? Хорошо известна скорость волн землетрясений в Земле и распределение плотности внутри нашей планеты. Но физики не смогли создать хорошей теории плотности вещества при давлениях, ожидаемых в центре Земли. Иными словами, мы не представляем себе слишком хорошо свойств вещества в таких условиях. Со своей планетой мы справляемся куда хуже, нежели с состоянием вещества в звездах. Необходимый для этого математический аппарат не разработан, он, по-видимому, чрезвычайно сложен; не исключено, однако, что найдется кто-то, кто поймет важность этой проблемы и разработает ее. Другое дело, что, даже вычислив плотность, мы не сможем представить себе циркулирующие течения или разобраться в свойствах горных пород при сверхвысоких давлениях. Мы не умеем предсказывать, насколько быстро эти породы «поддадутся» давлению; только опыт ответит на эти вопросы.

## § 6. Психология

Рассмотрим, наконец, еще одну науку — *психологию*. Сразу же уместно заметить, что психоанализ — это не наука; в лучшем случае это медицинский процесс, а скорее всего — знахарство. В психоанализе существует теория происхождения болезней — разные там «духи» и прочее.

Знахарь тоже имеет теорию, по которой болезнь, скажем малярию, вызывает дух, витающий в воздухе; ее не вылечишь, если потрясти змеей над головой больного, а вот хинин помогает. Итак, если вы заболите, советую вам отправиться к знахарю, потому что он лучше всех в племени разбирается в болезнях; однако его знание — это не наука. Психоанализ не был достаточно проверен экспериментально, и невозможно привести перечень случаев, когда он помогает, а когда не помогает и т.д.

Другие ветви психологии, а в нее входит, например, физиология ощущения (что происходит в глазе, а что в мозге), пожалуй, не столь интересны. Но в них были достигнуты хотя и малые, но вполне реальные успехи. Вот одна из интереснейших технических задач (хотите называйте ее психологией, хотите — нет). Центральная проблема в изучении мышления, или, если угодно, нервной системы, такова: пусть животное чему-либо научилось, пусть оно умеет делать что-то, чего прежде не умело; значит, клетки его мозга, если они состоят из атомов, изменились. *В чем же состоит это изменение?* Мы запечатали что-то в своей памяти. Где это? Что там можно увидеть теперь? Этого мы не знаем. Мы запомнили какое-то число. Что это значит? Что изменилось в нервной системе? Неизвестно. Это очень важная проблема, совершенно притом не-



решенная. Даже если допустить, что в нас имеется какой-то механизм памяти, то все равно мозг — это столь невообразимая масса пересекающихся проводов и нервов, что, по всей вероятности, прямой анализ невозможен. Аналог этого — вычислительные машины и их элементы; в них тоже множество проводов, есть и элементы, похожие на синапсы (нервные связи). Жаль, что у нас нет времени разобрать интересный вопрос об отношении между мыслью и вычислительными машинами. Следует понимать все же, что этот вопрос очень мало скажет нам о реальной сложности повседневного поведения человека. Люди столь различны! И понадобится немало времени, чтоб в этом разобраться. Следует начать издалека. Если бы даже нам удалось представить, как действует *собака*, то и этого оказалось бы слишком мало. Собаку понять куда легче, но и то никто не может объяснить, как она действует.

## § 7. С чего все пошло?

Чтобы физика могла быть полезной другим наукам в отношении *теории*, а не только своими приборами и изобретениями, эти науки должны снабдить физика описанием их объекта на физическом языке. Если биолог спросит: «Почему лягушка прыгает?», то физик не сможет ответить.

Но если он расскажет, что такое лягушка, что в ней столько-то молекул, что вот в этом месте у нее нервы и т.д., то это уже совсем иное дело. Если геолог более или менее толково объяснит нам, что такое Земля, а астроном — что такое звезды, тогда можно попробовать в этом разобраться. Чтобы был какой-то толк от физической теории, нужно знать, где расположены атомы. Чтобы понять химию, мы должны точно знать, из каких атомов состоят интересующие нас вещества, иначе мы ничего не проанализируем. Конечно, это лишь одно из ограничений.

Существует и другой *тип* задач в соседних науках, который в физике отсутствует. Назовем его, не имея лучшего термина, вопросом истории. *С чего все пошло?* Как все стало таким, как оно есть? Если, например, все в биологии будет нами понято, возникнет естественный вопрос: как появились все существа на Земле? Этим занимается теория эволюции — важная часть биологии. В геологии нам хочется знать не только, как образуются горы, но и как вначале возникла сама Земля, Солнечная система и т.д. Это, естественно, приводит нас к желанию узнать, из какого рода материи складывалась тогда Вселенная. Как развились звезды? Каковы были начальные условия? Это — проблема астрономической истории. Сейчас многое прояснилось в происхождении звезд, элементов, из которых мы состо-

им, и даже чуточку стало ясней происхождение самой Вселенной.

В настоящее время физика не изучает вопросы истории. Мы не задаем вопрос: «Вот законы физики, как они возникли?» Мы не считаем в настоящее время, что законы физики со временем как-то изменяются, что они прежде были иными, нежели ныне. Конечно, это *не исключено*, и если выяснится, что это *и впрямь так*, то исторические вопросы физики переплетутся с остальной историей Вселенной, и тогда физик будет обсуждать те же проблемы, что и астрономы, геологи и биологи.

Наконец, существует физическая проблема, общая многим наукам, очень старая к тому же, но до сего времени не решенная. Это не проблема поиска новых элементарных частиц, нет, это другой вопрос — вопрос давно, свыше ста лет назад, отставленный наукой в сторону. Ни один физик еще не смог математически безупречно проанализировать его, несмотря на его важность для сопредельных наук. Это — анализ *циркуляции*, или *вихревой жидкости*. Если проследить эволюцию звезды, то рано или поздно мы подойдем к такому моменту, когда в звезде начинается конвекция; и с этого момента мы уже не знаем, что будет дальше. Через несколько миллионов лет происходит взрыв звезды, но причина этого для нас остается загадкой. Мы не умеем анализиро-

вать погоду. Мы не знаем картины движений, которые должны происходить внутри Земли. В простейшей форме задача такова: пропустим через очень длинную трубку на большой скорости воду. Спрашивается: какое нужно давление, чтобы прогнать сквозь трубку данное количество воды? И никто, основываясь только на первичных законах и на свойствах самой воды, не умеет ответить на этот вопрос. Если вода течет неторопливо или когда сочится вязкая жижа вроде меда, то мы прекрасно все умеем. Ответ вы можете найти, например, в любом вашем учебнике. А вот с настоящей, мокрой водой, брызжащей из шланга, справиться мы не в силах. Это — центральная проблема, которую в один прекрасный день нам понадобится решить, а мы это не умеем.

Поэт сказал однажды: «Весь мир в бокале вина». Мы, вероятно, никогда не поймем, какой смысл он в это вкладывал, ибо поэты пишут не для того, чтобы быть понятыми. Но бесспорно, что, внимательно взглянув в бокал вина, мы поистине откроем целый мир. В нем и физические явления (искрящаяся жидкость, испарение, меняющееся в зависимости от погоды и вашего дыхания, блеск стекла) и атомы (о которых нам говорит уже наше воображение). Стекло — это очищенная горная порода; в его составе кроются секреты возраста Вселенной и развития звезд.

А из какого удивительного набора реактивов состоит это вино! Как они возникли? Там есть закваска, ферменты, вытяжки и разные другие продукты. Ведь в вине скрывается большое обобщение: вся жизнь есть брожение. Изучая химию вина, нельзя не открыть, как это и сделал Луи Пастер, причины многих болезней. Сколько жизни в этом кларете, если он навязывает нашему сознанию свой дух, если мы должны быть столь осторожны с ним! Наш ограниченный ум для удобства делит этот бокал вина, этот мир на части: физику, биологию, геологию, астрономию, психологию и т.д., но ведь природа на самом деле никакого деления не знает! Давайте же и мы сольем это воедино, не забывая все же, что мы увидели. Пусть этот бокал вина доставит напоследок еще одно наслаждение: выпить его и обо всем позабыть!

## Глава 4

# СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ

---

*Что такое энергия? Потенциальная энергия тяготения. Кинетическая энергия. Прочие формы энергии*

---

### § 1. Что такое энергия?

С этой главы, покончив с общим описанием природы вещей, мы начнем подробное изучение различных физических вопросов. Чтобы показать характер идей и тип рассуждений, которые могут применяться в теоретической физике, мы разберем один из основных законов физики — сохранение энергии.

Существует факт, или, если угодно, закон, управляющий всеми явлениями природы, всем, что было известно до сих пор. Исключений из этого закона не существует; насколько мы знаем, он абсолютно точен. Название его — *сохранение энергии*. Он утверждает, что существует определенная величина, называемая энергией, которая не меняется ни при каких превращениях, происходящих в природе. Само это утверждение весьма и весьма отвлеченно; это, по существу, мате-

матический принцип, утверждающий, что существует некоторая численная величина, которая не изменяется ни при каких обстоятельствах. Это отнюдь не описание механизма явления или чего-то конкретного, просто-напросто отмечается то странное обстоятельство, что можно подсчитать какое-то число и затем спокойно следить, как природа будет выкидывать любые свои трюки, а потом опять подсчитать это число — и оно останется прежним. (Ну, все равно, как слон на черном шахматном поле: как бы ни разворачивались события на доске, какие бы ходы ни делались, слон все равно окажется на черном поле. Наш закон как раз такого типа.) И поскольку утверждение это отвлеченно, то мы выявим его смысл на некоторой аналогии.

Познакомимся с мальчиком, таким Монтигомо Ястребиный Коготь; у него есть большие кубики, которые даже он не может ни сломать, ни разделить на части. Все они одинаковы. Пускай их у него 28 штук. Мама оставляет его утром дома наедине с этими кубиками. Каждый вечер она подсчитывает, сколько у него кубиков, — она немного любопытна! — и открывает поразительную закономерность: что бы ее сынишка ни вытворял с кубиками, их все равно оказывается 28! Так это тянется довольно долго, и вдруг в один прекрасный день она насчитывает только 27 штук. После недолгих поисков кубик обнаруживают

под ковром: ей приходится все обыскать, чтобы убедиться в неизменности числа кубиков. В другой раз кубиков оказывается 26. Снова тщательное исследование показывает, что окно открыто; взглянув вниз, она видит два кубика в траве. В третий раз подсчет дает 30 кубиков! Это приводит маму в полное замешательство, но потом она вспоминает, что в гости приходил соседский Кожаный Чулок, видимо, он захватил с собой свои кубики и позабыл их здесь. Она убирает лишние кубики, затворяет плотно окно, не пускает больше гостей в дом, и тогда все опять идет как следует, пока однажды подсчет не дает 25 кубиков... Правда, в комнате имеется ящик для игрушек, маме хочется и в него заглянуть, но мальчик кричит: «Не открывай мой ящик!» — и начинает рёв; мама к ящику не допускается. Как же быть? Но мама любопытна и хитра, она придумывает выход! Она знает, что кубик весит 500 г; она взвешивает ящик, когда все 28 кубиков на полу, он весит 1 кг. Когда в следующий раз она проверяет количество кубиков, она опять взвешивает ящик, вычитает 1 кг и делит на 500 г. Она открывает, что

$$\left( \begin{array}{c} \text{Число имеющихся} \\ \text{кубиков} \end{array} \right) + \frac{\text{Вес ящика} - 1 \text{ кг}}{500 \text{ г}} = \text{Постоянная величина.} \quad (4.1)$$

Но опять возникают отклонения и от этой формулы. Снова в результате кропотливых изыс-



каний выясняется, что при этом уровень воды в стиральной машине почему-то изменился. Дитя, оказывается, швыряет кубики в воду, а мать не может их увидеть — вода мыльная; но она может узнать, сколько в воде кубиков, добавив в формулу новый член. Первоначальный уровень воды 40 см, а каждый кубик подымает воду на  $\frac{1}{3}$  см, так что новая формула такова:

$$\left( \frac{\text{Число имеющихся}}{\text{кубиков}} \right) + \frac{\text{Вес ящика} - 1 \text{ кг}}{500 \text{ г}} + \quad (4.2) \\ + \frac{\text{Уровень воды} - 40 \text{ см}}{\frac{1}{3} \text{ см}} = \text{Постоянная величина.}$$

Мир представлений мамы постепенно расширяется, она накопит весь ряд членов, позволяющих рассчитывать, сколько кубиков находится там, куда она заглянуть не может. В итоге она открывает сложную формулу для количества, которое *должно быть рассчитано* и которое всегда остается тем же самым, что бы ее дитя ни натворило.

В чем же аналогия между этим примером и сохранением энергии? Самое существенное, от чего надлежит отвлечься в этой картинке, — это что *кубиков не существует*. Отбросьте в выражениях (4.1) и (4.2) первые члены и вы обнаружите, что считаете более или менее отвлеченные количества. Аналогия же в следующем. Во-первых, при расчете энергии временами часть ее уходит

из системы, временами же какая-то энергия появляется. Чтобы проверить сохранение энергии, мы должны быть уверены, что не забыли учесть ее убыль или прибыль. Во-вторых, энергия имеет множество *разных форм* и для каждой из них есть своя формула: энергия тяготения, кинетическая энергия, тепловая энергия, упругая энергия, электроэнергия, химическая энергия, энергия излучения, ядерная энергия, энергия массы. Когда мы объединим формулы для вклада каждой из них, то их сумма не будет меняться, если не считать убыли энергии и ее притока.

Важно понимать, что физике сегодняшнего дня неизвестно, *что такое* энергия. Мы не считаем, что энергия передается в виде маленьких пилюль. Ничего подобного. Просто имеются формулы для расчета определенных численных величин, сложив которые, мы получаем число 28 — всегда одно и то же число. Это нечто отвлеченное, ничего не говорящее нам ни о механизме, ни о *причинах* появления в формуле различных членов.

## § 2. Потенциальная энергия тяготения

Сохранение энергии можно понять, только если имеются формулы для всех ее видов. Я сейчас рассмотрю формулу для энергии тяготения близ земной поверхности; я хочу вывести ее, но

не так, как она впервые исторически была получена, а при помощи специально придуманной для этой лекции нити рассуждений. Я хочу вам показать тот достопримечательный факт, что нескольких наблюдений и строгого размышления достаточно, чтобы узнать о природе очень и очень многое. Вы увидите, в чем состоит работа физика-теоретика. Вывод подсказан блестящими рассуждениями Карно о КПД тепловых машин\*.

Рассмотрим грузоподъемные машины, способные поднимать один груз, опуская при этом другой. Предположим еще, что *вечное движение этих машин невозможно*. (Именно недопустимость вечного движения и есть общая формулировка закона сохранения энергии.) Определяя вечное движение, нужно быть очень осторожным. Сделаем это сначала для грузоподъемных машин. Если мы подняли и опустили какие-то грузы, восстановили прежнее состояние машины и после этого обнаружили, что в итоге *груз поднят*, то мы получили вечный двигатель: поднятый груз может привести в движение что-то другое. Здесь существенно, чтобы машина, поднявшая груз, вернулась в *первоначальное положение* и чтобы она *ни от чего не зависела* (чтобы

---

\* Нас здесь интересует не столько итоговая формула (4.3) (она вам, должно быть, знакома), сколько возможность получить ее теоретическим путем.

не получала от внешнего источника энергию для подъема груза, словом, чтобы не приходил в гости Кожаный Чулок со своими кубиками).

Очень простая грузоподъемная машина показана на фиг. 4.1.



*Фиг. 4.1. Простая грузоподъемная машина.*

Она подымает тройной вес. На одну чашку весов помещают три единицы веса, на другую — одну. Правда, чтобы она и впрямь заработала, с левой чашки необходимо снять хоть малюсенький грузик. И наоборот, чтобы поднять единичный груз, опуская тройной, тоже нужно немного сплутовать и убрать с правой чашки часть груза. Мы понимаем, что в настоящей подъемной машине надо создать небольшую перегрузку на одну сторону, чтобы поднять другую. Но пока махнем на это рукой. Идеальные машины, хотя их и нет на самом деле, не нуждаются в перевесе. Машины, которыми мы фактически пользуемся, можно считать в некотором смысле *почти* обратимыми, т.е. если они поднимают тройной вес при помощи единичного, то они могут поднять также почти единичный вес, опуская тройной.

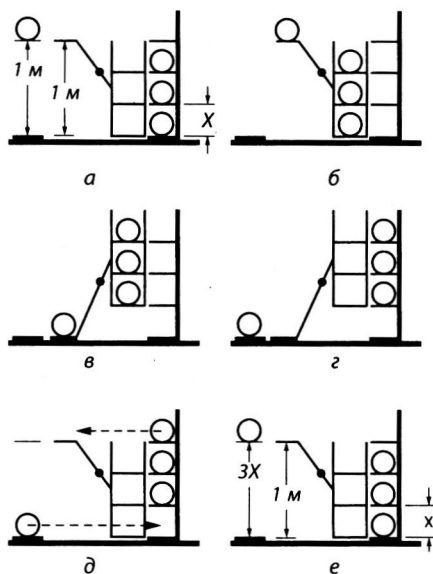
Представим, что имеются два класса машин — *необратимые* (сюда входят все реальные машины) и *обратимые*, которых на самом деле не существует; как бы тщательно ни изготавливать подшипники, рычаги и т.д., таких машин все равно не построишь. Но мы предположим все же, что обратимая машина существует и способна, опустив единичный груз (килограмм или грамм — все равно) на единичную длину, поднять в то же время тройной груз. Назовем эту обратимую машину машиной *A*. Положим, что данная обратимая машина подымает тройной груз на высоту *X*. Затем предположим, что имеется другая машина *B*, не обязательно обратимая, которая тоже опускает единичный вес на единицу длины, но поднимает тройной вес на высоту *Y*. Теперь можно доказать, что *Y* не больше *X*, т.е. что нельзя соорудить машину, которая смогла бы поднять груз *выше*, чем обратимая. Почему? Посмотрите. Пусть *Y* выше *X*. Мы берем единичный вес и опускаем его на единицу длины машиной *B*, тем самым поднимая тройной груз на высоту *Y*. Затем мы можем опустить груз с высоты *Y* до *X*, *получив свободную энергию*, и включить обратимую машину *A* в обратную сторону, чтобы опустить тройной груз на *X* и поднять единичный вес на единичную высоту. Единичный вес очутится там, где он был прежде, и обе машины окажутся в состоянии начать работу сызнова! Итак, если *Y*

больше  $X$ , то возникает вечный двигатель, а мы предположили, что такого не бывает. Мы приходим к выводу, что  $Y$  не выше  $X$ , т.е. из всех машин, которые можно соорудить, обратимая — наилучшая.

Легко понять также, что все обратимые машины должны поднимать груз *на одну и ту же высоту*. Положим, что машина  $B$  также обратима. То, что  $Y$  не больше  $X$ , остается, конечно, верным, но мы можем пустить машину в обратную сторону, повторить те же рассуждения и получить, что  $X$  не больше  $Y$ . Это очень знаменательное наблюдение, ибо оно позволяет узнать, на какую высоту разные машины могут поднимать грузы, *не заглядывая в их внутреннее устройство*. Если кто-нибудь придумал невероятно запутанную систему рычагов для подъема тройного веса на какую-то высоту за счет опускания единичного веса на единицу высоты и если мы сравним эту машину с простым обратимым рычагом, способным проделать то же самое, то первая машина не поднимет вес выше второй (скорее, наоборот). А если его машина обратима, то мы знаем точно, на *какую* высоту она будет поднимать грузы.

**Вывод:** каждая обратимая машина, как бы она ни действовала, опуская 1 кг на 1 м, всегда поднимает 3 кг на одну и ту же высоту  $X$ . Ясно, что мы доказали очень полезный всеобщий закон. Но возникает вопрос: чему равно  $X$ ?

Пусть у нас есть обратимая машина, способная поднимать 3 кг за счет 1 кг на высоту  $X$ . Поместим три шара на стеллаж (как на фиг. 4.2).



**Фиг. 4.2.** Обратимая машина.

*а — начальное положение; б — загрузка шаров; в — 1 кг поднимает 3 кг на высоту  $X$ ; г — разгрузка шаров; д — восстановление; е — конечное положение.*

Четвертый лежит на подставке в одном метре от пола. Машина может поднять три шара, опустив один шар на 1 м. Устроим подвижную платформу с тремя полками высотой  $X$ , и пусть высота полок стеллажа тоже будет  $X$  (фиг. 4.2, а). Перекатим сперва шары со стеллажа на полки

платформы (фиг. 4.2, б); предположим, что для этого энергии не понадобится, потому что полки и стеллаж находятся на одной высоте. Затем включим обратимую машину: она скатит одиночный шар на пол и подымет платформу на высоту  $X$  (фиг. 4.2, в). Но мы сконструировали платформу столь остроумно, что шары опять оказались в точности на уровне полок стеллажа. Разгрузим же шары с платформы на стеллаж (фиг. 4.2, г). После разгрузки машина вернется в первоначальное положение. Теперь уже три шара лежат на трех верхних полках стеллажа, а четвертый шар — на полу. Но смотрите, какая странная вещь: по существу *два* шара мы не поднимали вовсе, ведь на полках 2 и 3 шары как лежали вначале, так лежат и теперь. В итоге поднялся только *один шар*, но зато на высоту  $3X$ . Если бы высота  $3X$  оказалась больше 1 м, то можно было бы *опустить* шар, чтобы вернуть машину к начальным условиям (фиг. 4.2, е) и начать работу сначала. Значит, высота  $3X$  не может быть больше 1 м, ибо начнется вечное движение. Точно так же можно доказать, что 1 м *не может быть больше*  $3X$ : машина обратима, пустим ее назад и докажем. Итак,  $3X$  *ни больше ни меньше* 1 м. Мы открыли при помощи одних только рассуждений закон:  $X = \frac{1}{3}$  м. Обобщить его легко; 1 кг падает при работе обратимой машины с некоторой высоты; тогда машина способна поднять



$p$  кг на  $1/p$  высоты. Если, другими словами, 3 кг умножить на высоту их подъема ( $X$ ), то это равно 1 кг, умноженному на высоту его падения (1 м). Помножив все грузы в машине на высоту, на которой они лежат, дайте машине поработать и опять помножьте все веса на их высоты подъема; в итоге *должно выйти то же самое*. (Мы перешли от случая, когда двигался только один груз, к случаю, когда за счет опускания одного груза поднимается несколько грузов. Но это, надеюсь, понятно?) Назовем сумму весов, умноженных на высоту, *потенциальной энергией тяготения*, т.е. энергией, которой обладает тело вследствие своего положения в пространстве по отношению к земле. Формула для энергии тяготения, пока тело не слишком далеко от земли (вес при подъеме ослабляется), такова:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Потенциальная энергия тяготения} \\ \text{для одного тела} \end{array} \right) = (\text{Вес}) \times (\text{Высота}). \quad (4.3)$$

Не правда ли, очень красивое рассуждение? Вопрос только в том, справедливо ли оно. (Ведь, в конце концов, природа *не обязана* следовать нашим рассуждениям.) Например, не исключено, что в действительности вечное движение возможно. Или другие предположения ошибочны. Или мы просмотрели что-то в своих рассуждениях. Поэтому их непременно нужно проверить. И вот — справедливость их *подтверждает опыт*.

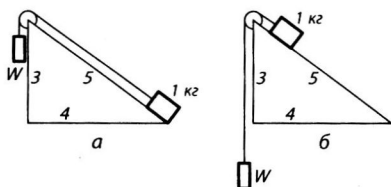
*Потенциальная энергия* — это общее название для энергии, связанной с расположением по отношению к чему-либо. В данном частном случае это — *потенциальная энергия тяготения*. Если же производится работа против электрических сил, а не сил тяготения, если мы «поднимаем» заряды «над» другими зарядами с помощью многочисленных рычагов, тогда запас энергии именуется *электрической потенциальной энергией*. Общий принцип состоит в том, что изменения энергии равны силе, умноженной на то расстояние, на котором она действует:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Изменение} \\ \text{энергии} \end{array} \right) = (\text{Сила}) \times \left( \begin{array}{c} \text{Расстояние, на котором} \\ \text{она действует} \end{array} \right). \quad (4.4)$$

По мере чтения курса мы еще не раз будем возвращаться к другим видам потенциальной энергии.

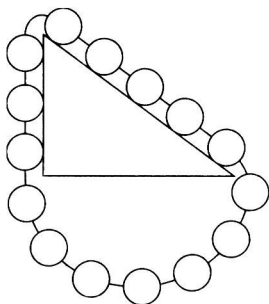
Принцип сохранения энергии во многих обстоятельствах оказывается очень полезен при предсказании того, что может произойти. В средней школе мы учили немало правил о блоках и рычагах. Мы можем теперь убедиться, что все эти «законы» *сводятся к одному*, и нет нужды запоминать 75 правил. Вот вам простой пример: наклонная плоскость. Пусть это треугольник со сторонами 3, 4, 5 (фиг. 4.3).

Подвесим к блочку груз весом 1 кг и положим его на плоскость, а с другой стороны подвесим груз *И*.



Фиг. 4.3. Наклонная плоскость.

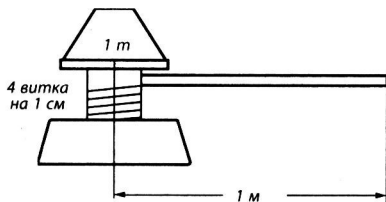
Мы хотим знать, какова должна быть тяжесть  $W$ , чтобы уравновесить груз  $1 \text{ кг}$ . Рассуждаем так. Если грузы  $W$  и  $1 \text{ кг}$  уравновешены, то это — обратимое состояние, и веревку можно двигать вверх-вниз. Пусть же вначале (фиг. 4.3, а)  $1 \text{ кг}$  находится внизу плоскости, а груз  $W$  — наверху. Когда  $W$  соскользнет вниз, груз  $1 \text{ кг}$  окажется наверху, а  $W$  опустится на длину склона (фиг. 4.3, б), т.е. на  $5 \text{ м}$ . Но ведь мы *подняли*  $1 \text{ кг}$  только на высоту  $3 \text{ м}$ , хотя опустили  $W$  на  $5 \text{ м}$ . Значит,  $W = \frac{3}{5} \text{ кг}$ . Заметьте, что этот ловкий вывод получен не из разложения сил, а из *сохранения энергии*. Ловкость, впрочем, относительна. Существует другой вывод, куда красивее. Он придуман Стевином и даже высечен на его надгробии. Фиг. 4.4 объясняет, почему должно получиться  $\frac{3}{5} \text{ кг}$ : цепь не вращается и нижняя ее часть уравновешена сама собой, значит сила тяги пяти звеньев с одной стороны должна уравнять силу тяги трех звеньев с другой (по длине сторон).



**Фиг. 4.4.** Это выгравировано на надгробии Стевина.

Глядя на диаграмму, становится очевидно, что  $W = \frac{3}{5}$  кг. (Неплохо было бы, если бы когда-нибудь что-нибудь подобное высекали и на вашем надгробном камне.)

А вот задача посложнее: домкрат, показанный на фиг. 4.5.

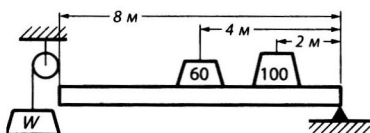


**Фиг. 4.5.** Домкрат.

Посмотрим, как в таком случае применять этот принцип. Для вращения домкрата служит ручка длиной 1 м, а нарезка винта имеет 4 витка на 1 см. Какую силу нужно приложить к ручке,

чтобы поднять 1 т? Желая поднять 1 т на 1 см, мы должны обойти домкрат четырежды, каждый раз делая по 6,28 м ( $2\pi r$ ), а всего 25,12 м. Используя различные блоки и т.п., мы действительно можем поднять 1 т с помощью неизвестного груза  $W$ , приложенного к концу ручки. Ясно, что  $W$  равно примерно 400 г. Это — следствие сохранения энергии.

И еще более сложный пример (фиг. 4.6).



**Фиг. 4.6.** Нагруженный стержень, подпертый с одного конца.

Подопрем один конец стержня (или рейки) длиной 8 м. Посредине рейки поместим груз весом 60 кг, а в 2 м от подпорки — груз весом 100 кг. Сколько надо силы, чтобы удержать рейку за другой конец в равновесии, пренебрегая ее весом? Пусть мы прикрепили блок и перекинули через него веревку, привязав ее к концу рейки. Каков же должен быть вес  $W$ , уравнивающий стержень? Представим, что вес опустился на произвольное расстояние (для простоты пусть это будет 4 см); на сколько тогда поднимутся наши два груза? Середина рейки на 2 см, а второй груз (он лежит на четверти длины рейки) на

1 см. Значит, в согласии с правилом, что сумма весов, умноженных на высоты, не меняется, мы должны написать: вес  $W$  на 4 см вниз плюс 60 кг на 2 см вверх плюс 100 кг на 1 см вверх, что после сложения должно дать нуль:

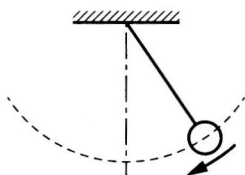
$$-4W + 2 \times 60 + 1 \times 100 = 0, W = 55 \text{ кг.} \quad (4.5)$$

Выходит, чтобы удержать рейку, хватит 55 кг. Таким же путем можно разработать законы «равновесия» — статику сложных мостовых сооружений и т.д. Такой подход именуют *принципом виртуальной* (т.е. возможной или воображаемой) *работы*, потому что для его применения мы обязаны *представить себе*, что наша система чуть сдвинулась, даже если она *в действительности* не двигалась или вовсе *не способна* двигаться. Мы используем небольшие воображаемые движения, чтобы применить принцип сохранения энергии.

### § 3. Кинетическая энергия

Чтобы рассказать о другом виде энергии, рассмотрим маятник (фиг. 4.7). Отведем его в сторону и затем отпустим. Он начнет качаться взад и вперед. Двигаясь от края к середине, он теряет высоту. Куда же девается потенциальная энергия? Когда он опускается до самого низа, энергия тяготения пропадает, однако он вновь взбирает-

ся вверх. Выходит, что энергия тяготения должна превращаться в другую форму. Ясно, что способность взбираться наверх остается у маятника благодаря тому, что он *движется*; значит, в наинизшей точке качания энергия тяготения переходит в другой вид энергии.



Фиг. 4.7. Маятник.

Мы должны получить формулу для энергии движения. Вспоминая наши рассуждения о необратимых машинах, мы легко поймем, что, двигаясь мимо наинизшей точки, маятник должен обладать некоторым количеством энергии, которая позволит ему подняться на определенную высоту, и при этом независимо от *механизма* подъема или *пути* подъема. Возникает формула, выражающая равноценность обоих видов энергии, подобная той, которую писала мама, подсчитывая кубики. Получается другая форма представления энергии. Легко понять, какой она должна быть. Кинетическая энергия внизу равна весу, умноженному на высоту, на которую этот вес может подняться из-за своей скорости:

$$\text{к. э.} = WH.$$

Нам нужна формула, предсказывающая высоту подъема по быстроте движения тела. Если мы толкнем что-нибудь с определенной скоростью, скажем, прямо вверх, то это тело достигнет определенной высоты; мы не знаем пока, какова эта высота, но нам ясно, что она зависит от скорости и что она войдет в нужную нам формулу. Значит, чтобы найти формулу для кинетической энергии тела, движущегося со скоростью  $V$ , нужно вычислить высоту, до которой она может добраться, и умножить на тяжесть тела. В одной из следующих глав мы убедимся, что получается

$$\text{к. э.} = \frac{wV^2}{2g} . \quad (4.6)$$

Конечно, тот факт, что движение обладает энергией, никак не связан с полем тяготения, в котором находится тело. Не важно, *откуда* явилось движение. Это общая формула для любых скоростей. Кстати, и (4.3) и (4.6) — формулы приближенные; первая становится неправильной на больших высотах (настолько больших, что тяжесть тела ослабляется), а вторая — на больших скоростях (настолько больших, что требуются релятивистские поправки). Однако, когда мы вводим точные формулы для энергии, закон сохранения энергии опять соблюдается.



## § 4. Прочие формы энергии

В таком вот роде можно и дальше показывать существование энергии в разных формах. Отметим, во-первых, упругую энергию. Растягивая пружину, мы должны совершить какую-то работу, ведь растянутая пружина способна поднять груз. После растяжения она получает возможность выполнить работу. Если бы мы теперь составили сумму произведений весов на высоты, то она больше не сошлась бы, и нам пришлось бы в нее что-то вставить, чтобы учесть напряженность пружинки. Упругая энергия — это и есть формула растянутой пружины. Сколько же в ней энергии?

Когда вы отпускаете пружину, то упругая энергия при переходе пружины через точку равновесия обращается в энергию кинетическую; и далее все время совершаются переходы от сжатия и растяжения пружины к кинетической энергии движения (в переходы эти замешиваются еще изменения энергии тяготения, но если это нам мешает, то можно пружину не подвешивать, а положить). И так продолжается до тех пор, пока потери энергии... Постойте! Выходит, мы все время жульничали: то совершали обвес, чтобы рычаг наклонился, то говорили, что машины обратимы, то уверяли, что они будут работать вечно. А машина в конечном счете останавлива-

ется. Где же теперь, когда пружина перестала сжиматься-разжиматься, находится энергия? Она перешла в *новую* форму энергии — *тепло*.

В пружине или рычаге имеются кристаллы, состоящие из множества атомов; и при сборке частей машины требуется особая точность и тщательность, чтобы в работе машины ни один из атомов не сдвинулся со своего места, не колебался. Нужно быть очень осторожным. Ведь обычно, когда машина вертится, то и дело происходят какие-то удары, покачивания, вызванные неровностями материала, и атомы начинают дрожать. Так теряются маленькие доли энергии; по мере того как движение замедляется, всё сильнее становятся случайные, неожиданные дрожания атомов вещества машины. Конечно, это все еще кинетическая энергия, но не связанная с видимым движением.

Позвольте, какая кинетическая энергия? Что за сказка? Откуда известно, что это все еще кинетическая энергия? Оказывается, термометр способен обнаружить, что пружина или рычаг *нагреваются*, т.е. что и впрямь происходит определенный прирост кинетической энергии. Мы ее называем *тепловой*, а сами помним, что никакая это не новая форма энергии, а всего лишь кинетическая, но внутреннего движения. (Одна из трудностей всех опытов с большим количеством вещества в том и состоит, что невозможно вза-

правду показать сохраняемость энергии, сделать настоящую обратимую машину; каждый раз, когда поворачивается большой комок вещества, атомы не остаются в прежнем состоянии, в их систему включается некоторое количество случайного движения. Увидеть это нельзя, но измерить термометрами и другими приборами можно.)

Существует еще немало других форм энергии, но мы не можем сейчас описывать их более или менее подробно.

Имеется энергия электрическая, связанная с притяжением и отталкиванием электрических зарядов.

Есть энергия излучения, или энергия света, — одна из форм электрической энергии, ибо свет может быть представлен как колебания электромагнитного поля.

Бывает энергия химическая — энергия, высвобождаемая в химических реакциях. Упругая энергия в некотором роде похожа на химическую; и химическая энергия есть энергия притяжения атомов друг к другу, и упругая энергия тоже. В настоящее время мы это понимаем следующим образом: химическая энергия складывается из двух частей — энергии движения электронов внутри атомов, т.е. из кинетической части, и электрической энергии притяжения электронов к протонам, т.е. из электрической части.

Дальше, бывает ядерная энергия, связанная с расстановкой частиц в ядре; для нее тоже существует формула, хотя основные законы нам и неведомы. Мы знаем, что это не электричество, не тяготение, не чистая химия... А что это такое? А кто его знает! Видимо, это добавочная форма энергии.

И наконец, теория относительности видоизменяет формулу кинетической энергии, так что название это становится условным, сочетая ее с другим понятием: *энергией массы*. Любой объект обладает энергией уже потому, что он *существует*. Если электрон и позитрон спокойно стоят рядом, ничем не занимаясь (ни тяготением, ни чем иным), а потом сливаются и исчезают, то освобождается определенная порция энергии излучения, и эту порцию можно подсчитать. Все, что для этого нужно, — это знать массу объекта. Не важно, что это такое — два тела исчезли, определенная энергия появилась. Формулу впервые придумал Эйнштейн: это  $E = mc^2$ .

Из наших рассуждений ясно, что закон сохранения энергии незаменим при анализе явления; мы уже показали это на ряде примеров, для которых мы не знали всех формул. Владей мы формулами для всех типов энергии, мы могли бы узнавать, не вдаваясь в детали, сколько процессов происходит в таком-то явлении. Оттого законы сохранения столь важны. Встает естествен-

ный вопрос: какие еще есть в физике законы сохранения.

Существуют еще два закона, сходных с законом сохранения энергии. Один называется сохранением импульса (или количества движения). Другой — сохранением момента количества движения. Позже мы подробнее познакомимся с ними.

В конечном счете мы не понимаем законов сохранения достаточно глубоко. Нам непонятно сохранение энергии. Мы не можем представить себе энергию как некоторое количество неделимых порций. Вы, вероятно, слышали, что фотоны вылетают порциями и что энергия их равна постоянной Планка, умноженной на частоту. Это правда, но так как частота света может быть любой, то нет никакого закона, по которому энергия обязана иметь некоторую определенную величину. Это уже не кубики Монтигомо Ястребиного Когтя: любые количества энергии допустимы, по крайней мере в настоящее время. Для нас энергия — это не то, что можно пересчитать, а всего лишь математическая величина, абстракция, — обстоятельство довольно странное. В квантовой механике выявляется, что сохраняемость энергии тесно увязана с другим важным свойством мира — *с независимостью от абсолютного времени*. Мы можем поставить опыт в некоторый момент, а потом еще раз в другой

момент; он будет протекать одинаково. Абсолютно ли верно это утверждение или нет — мы не знаем. Но если мы примем, что оно *абсолютно* верно, и добавим принципы квантовой механики, то из этого можно вывести принцип сохранения энергии. Это довольно тонкая и интересная вещь, которую нелегко пояснить. Другие законы сохранения также связаны между собой: сохранение импульса в квантовой механике — с утверждением, что не важно, *где* происходит опыт, его итог от этого не меняется. И подобно тому, как независимость от места связана с сохранением импульса, а независимость от времени — с сохранением энергии, точно так же от *поворота* наших приборов тоже ничего не должно изменяться; независимость от ориентации в пространстве имеет отношение к сохранению *момента количества движения*.

Кроме этого, существуют еще три закона сохранения; насколько ныне нам известно, они точные и понять их намного легче, так как по своей природе они близки к подсчету кубиков. Первый из них — *сохранение заряда*; он просто означает, что если подсчитать, сколько есть положительных зарядов, и из этого вычесть количество отрицательных, то число это никогда не изменится. Вы можете избавиться от положительных вместе с отрицательными, но не создадите никогда чистого избытка одних над други-

ми. И прочие два закона похожи на этот. Один называют *сохранением числа барионов*. Имеется некоторое количество удивительных частиц (примеры: нейтрон и протон), называемых барионами. В любой реакции, где бы в природе она ни происходила, если подсчитать, сколько барионов было в начале процесса (считая антибарион за  $-1$  барион), то в конце их число окажется тем же. Другой закон — *сохранение числа лептонов*. Группа частиц, называемых лептонами, включает электрон, мюон и нейтрино. Антиэлектрон, т.е. позитрон, считается за  $-1$  лептон. Подсчет общего числа лептонов в реакции обнаруживает, что на входе и на выходе реакции это число одинаково, по крайней мере насколько нам сейчас известно.

Вот вам шесть законов сохранения: три замысловатых, связанных с пространством и временем, а три простых, связанных с обычным счетом.

К сохраняемости энергии *доступность* и *полезность* энергии не имеет никакого отношения. В атомах морской воды немало энергии движения, так как температура моря довольно высока, но нет никакой возможности направить эту энергию в определенное русло, не отобрав ее откуда-нибудь еще. Иначе говоря, хотя нам известен тот факт, что энергия сохраняется, но не так-то просто сохранить энергию, пригодную для

человека. Законы, управляющие количеством пригодной для человека энергии, называются *законами термодинамики* и включают понятие, называемое *энтропией необратимых термодинамических процессов*.

Наконец, остановимся на том, откуда мы сегодня можем получать необходимый запас энергии. Энергией нас снабжают Солнце и дожди, уголь, уран и водород. Впрочем, и дожди, и уголь в конце концов без Солнца были бы невозможны. Хотя энергия сохраняется, природа, по всей видимости, этим ничуть не интересуется; она освобождает из Солнца множество энергии, но только одна двухмиллиардная часть ее падает на Землю. Природа сохраняет энергию, но в действительности о ней не заботится, расточая ее направо и налево. Мы уже получаем энергию из урана, мы можем получать ее и из водорода, но пока это получение связано со взрывами, с большой опасностью. Если бы мы смогли научиться управлять термоядерными реакциями, то энергия, которую можно получать, тратя по 10 л воды в секунду, равнялась бы всей электроэнергии, производимой сейчас за это время в Соединенных Штатах. Шестисот литров речной воды в минуту хватило бы, чтобы снабжать энергией всю страну! Именно физикам придется придумать, как избавить нас от нужды в энергии. И это, бесспорно, достижимо.



## Глава 5

# ВРЕМЯ И РАССТОЯНИЕ

---

*Движение. Время. Короткие времена.  
Большие времена. Единицы и  
стандарты времени. Большие  
расстояния. Малые расстояния*

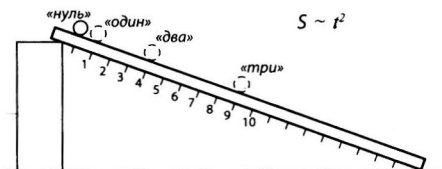
---

### § 1. Движение

В этой главе мы рассмотрим понятия *время* и *расстояние*. Мы уже говорили, что физика, как, впрочем, любая другая наука, основывается на *наблюдениях*. Можно даже сказать, что развитие физических наук до их современного уровня в огромной степени зависело от фактов, основанных на *количественных* наблюдениях. Только с помощью количественных наблюдений можно получить количественные соотношения — сердце современной физики.

Многие считают, что физика берет свое начало с опыта, проведенного Галилеем 350 лет назад, а сам Галилей является первым физиком. До этого времени изучение движения было чисто философским и основывалось на доводах, которые были плодом фантазии. Большинство этих доводов были придуманы Аристотелем и други-

ми греческими философами и рассматривались как «доказанные». Но Галилей был скептиком и поставил следующий опыт: по наклонной плоскости он пускал шар и наблюдал за его движением (фиг. 5.1).



Фиг. 5.1. Шарик катится по наклонной плоскости.

Галилей не просто смотрел, как катится шар, а измерял то *расстояние*, которое прошел шар, и определял *время*, в течение которого шар проходил это расстояние. Способ измерения расстояний был хорошо известен еще задолго до Галилея, однако точного способа измерения времени, особенно коротких интервалов, не было. Хотя впоследствии Галилей изобрел более совершенные часы (отнюдь не похожие на современные), но в своих первых опытах для отсчета равных промежутков времени он использовал собственный пульс. Давайте сделаем то же самое.

Будем отсчитывать удары пульса в то время, пока шарик катится вниз: «Один... два... три... четыре... пять... шесть... семь... восемь...». Пусть кто-нибудь отмечает положение шарика на каждый счет. Теперь можно измерить *расстояние*,

которое шарик прошел за «один», «два», «три» и т.д. равных интервала времени. Галилей сформулировал результат своих наблюдений следующим образом: если отмечать положения шарика через 1, 2, 3, 4, ... единицы времени от начала движения, то окажется, что эти отметки удалены от начального положения пропорционально числам 1, 4, 9, 16, ... Сейчас мы сказали бы, что расстояние пропорционально квадрату времени:

$$S \sim t^2. \quad (5.1)$$

Таким образом, изучение процесса *движения* (основы современной физики) начинается с вопросов: где и когда?

## § 2. Время

Разберем сначала, что мы понимаем под словом *время*. Что же *это такое*? Неплохо было бы найти подходящее определение понятия «время». В толковом словаре Вебстера, например, «время» определяется как «период», а сам «период» — как «время». Однако пользы от этого определения мало. Но и в определении «время — это то, что меняется, когда больше ничего не изменяется» не больше смысла. Быть может, следует признать тот факт, что время — это одно из понятий, которое определить невозможно, и просто сказать, что это нечто известное нам: это то, что отделяет два последовательных события!

Дело, однако, не в том, как дать *определение* понятия «время», а в том, как его измерить. Один из способов измерить время — это использовать нечто регулярно повторяющееся, нечто *периодическое*. Например, день. Казалось бы, дни регулярно следуют один за другим. Но, поразмыслив немного, сталкиваешься с вопросом: периодичны ли они? Все ли дни имеют одинаковую длительность? Создается впечатление, что летние дни длиннее зимних. Впрочем, некоторые зимние дни кажутся ужасно длинными, особенно если они скучны. О них обычно говорят: «Ужасно длинный день!»

Однако, по-видимому, все дни в среднем одинаковы. Можно ли проверить, действительно ли они одинаковы и от одного дня до другого, хотя бы в среднем, проходит одно и то же время? Для этого необходимо произвести сравнение с каким-то другим периодическим процессом. Давайте посмотрим, как такое сравнение можно, например, провести с помощью песочных часов. С помощью таких часов мы можем создать периодический процесс, если будем стоять возле них день и ночь и переворачивать каждый раз, когда высыплются последние крупинки песка.

Если затем подсчитать число переворачиваний песочных часов от каждого утра до следующего, то можно обнаружить, что число «часов» (т.е. число переворачиваний) в разные дни различно. Кто же виноват в этом? Может быть,

Солнце? Может быть, часы? А может, и то и другое? После некоторых размышлений можно прийти к мысли, что следует считать «часы» не от утра до утра, а от полудня до полудня (полдень — это, конечно, не 12 часов, а момент, когда Солнце находится в наивысшем положении). На этот раз оказывается, что в каждой сутках число «часов» одинаково.

Теперь можно утверждать, что «час» и «сутки» имеют регулярную периодичность, т.е. отмечают последовательные равные интервалы времени, хотя нами и *не доказано*, что каждый из процессов действительно периодичен. Нас могут спросить: а вдруг есть некое всемогущее существо, которое замедляет течение песка ночью и убыстряет днем? Наш эксперимент, конечно, не может дать ответа на такого рода вопросы. Очевидно лишь то, что периодичность одного процесса согласуется с периодичностью другого. Поэтому при *определении* понятия «время» мы просто будем исходить из повторения некоторых очевидно периодических событий.

### § 3. Короткие времена

Заметим, что в процессе проверки «воспроизводимости» дней мы нашли метод измерения *части* дня, то есть метод измерения меньших промежутков времени. Нельзя ли этот процесс

продолжить и научиться измерять еще меньшие промежутки времени?

Галилей предположил, что каждый маятник отклоняется и возвращается назад за равные интервалы времени (если отклонения невелики). Сравнение числа отклонений маятника с «часом» показывает, что это действительно так. Таким способом можно измерять доли «часа». Если для подсчета числа колебаний маятника применить механический счетчик, то мы получим маятниковые часы наших дедов.

Договоримся теперь, что если маятник отклонится 3600 раз в час (и если в сутках 24 часа), то период колебаний такого маятника мы назовем «секундой». Итак, нашу первоначальную единицу «сутки» мы разделили приблизительно на  $10^5$  частей. Используя тот же принцип сравнения, можно и секунду разделить на всё меньшие и меньшие части. Для этого оказывается более удобным использовать не простой механический, а *электрический* маятник, называемый осциллятором, период колебаний которого может быть очень малым. В таких электронных осцилляторах роль маятника выполняет электрический ток, который течет то в одном, то в другом направлении.

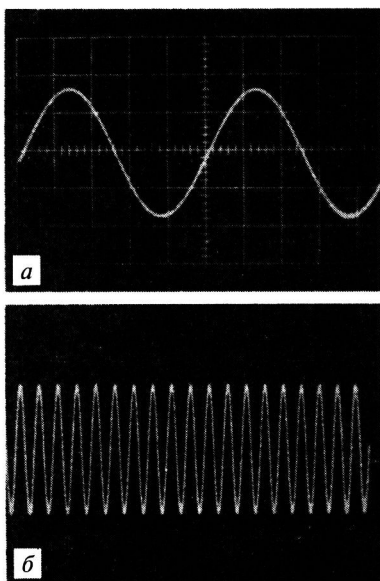
Давайте представим себе целый ряд таких осцилляторов, что период колебаний каждого последующего в десять раз меньше предыдущего. Это можно проверить путем простого подсчета

числа колебаний последующего осциллятора за одно колебание предыдущего; только теперь этот подсчет трудно провести без устройства, расширяющего возможности наблюдения, своеобразного «микроскопа времени». Таким устройством может служить электронно-лучевой осциллограф, на светящемся экране которого строится график зависимости электрического тока (или напряжения) от времени.

Соединяя осциллограф сначала с одним осциллятором, а затем с другим, мы получим на экране графики зависимости тока от времени в одном и в другом осцилляторе (фиг. 5.2).

**Фиг. 5.2.** *Две осциллограммы, снятые с экрана осциллографа.*

*а — при осциллографе, подключенном к одному осциллятору; б — при осциллографе, подключенном к осциллятору, период колебаний которого в десять раз меньше первого.*



А теперь нетрудно подсчитать, какое число периодов «быстрого» осциллятора укладывается в одном периоде «медленного».

Современная электроника позволяет создавать осцилляторы с периодами  $10^{-12}$  сек, которые выверяются (калибруются) методом сравнения, подобным вышеописанному, на стандартную единицу времени — секунду. В последние несколько лет в связи с изобретением и усовершенствованием «лазера», или усилителя света, появилась возможность сделать осцилляторы с еще более коротким периодом. Пока еще невозможно калибровать их тем же методом, однако, несомненно, что и это скоро будет достигнуто.

Можно измерять промежутки времени, гораздо более короткие, чем  $10^{-12}$  сек, но для этого используются совершенно другие методы. В сущности, используется другое *определение* понятия «время». Один из таких методов — это измерение *расстояния* между двумя событиями, происходящими на движущемся объекте. Например, пусть в движущемся автомобиле сначала включают, а затем выключают фары. Если известно, *где* были включены и выключены фары и какова была скорость автомобиля, то можно вычислить, сколько времени они горели. Для этого нужно *расстояние*, на протяжении которого горели фары, разделить на скорость автомобиля.

Именно таким методом в последние годы измерялось время жизни  $\pi^0$ -мезона. При наблю-



дении в микроскоп мельчайших следов, оставленных на фотоэмульсии, в которой родился  $\pi^0$ -мезон, было обнаружено следующее:  $\pi^0$ -мезон, двигаясь со скоростью, близкой к скорости света, прежде чем распасться, проходит в среднем расстояние около  $10^{-7}$  м. Таким образом, время жизни  $\pi^0$ -мезона составляет всего лишь  $10^{-16}$  сек! Необходимо подчеркнуть, что здесь было использовано несколько другое определение понятия «время», но, поскольку оно не приводит к каким-либо противоречиям, можно быть уверенным в том, что эти определения в достаточной мере эквивалентны друг другу.

Развивая технику эксперимента, а если необходимо, меняя определение понятия «время», можно обнаружить еще более быстрые физические процессы. Мы, например, можем говорить о периоде вибраций ядра или о времени жизни недавно обнаруженных «странных» резонансов (частиц), которые уже упоминались в гл. 2. Время жизни этих частиц лишь ненамного больше —  $10^{-24}$  сек! Приблизительно столько времени требуется свету (который имеет наибольшую скорость распространения), чтобы пройти расстояние, равное диаметру ядра водорода (наименьший из известных объектов).

Что можно сказать о еще более коротких интервалах времени? Имеет ли смысл вообще говорить о них, если невозможно не только измерить, но даже разумно судить о процессах, происходя-

щих в течение столь коротких интервалов? Возможно, нет. Это один из тех вопросов, на которые нет ответа. Может быть, кому-нибудь из вас посчастливится ответить на него в ближайшие 20—30 лет.

## § 4. Большие времена

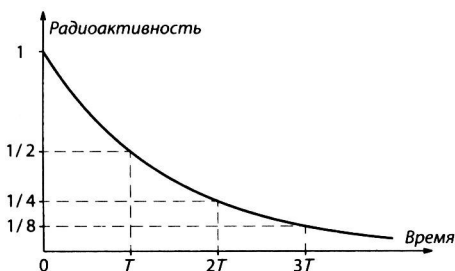
Рассмотрим теперь промежутки времени, большие «суток». Измерять большие времена легко: нужно просто считать дни, пока не придумаем что-нибудь лучшего. Первое, с чем мы сталкиваемся, это год — вторая естественная периодичность, состоящая приблизительно из 365 дней. Интересно, что в природе существуют естественные счетчики лет в виде годовых колец у деревьев или отложений речного ила. В некоторых случаях можно использовать эти естественные счетчики для определения времени, отделяющего нас от какого-либо отдаленного события в прошлом.

Но, когда невозможно считать годы для очень больших отрезков времени, нужно искать какие-то другие способы измерения. Одним из наиболее эффективных методов является использование в качестве «часов» радиоактивного вещества. Здесь мы сталкиваемся с «регулярностью» иного рода, чем в случае, скажем, маятника. Радиоактивность любого вещества для последовательных равных *интервалов* времени изменяется в одно и то же число раз.

**Таблица времен**

| Годы       | Секунды                                        | Период<br>полураспада              |
|------------|------------------------------------------------|------------------------------------|
|            | $10^{18}$ ? ? ? ?                              |                                    |
|            | Возраст Вселенной                              |                                    |
|            | Возраст Земли                                  | $U^{238}$                          |
| $10^9$     |                                                |                                    |
|            | $10^{15}$                                      |                                    |
|            | Первый человек                                 |                                    |
| $10^6$     |                                                |                                    |
|            | $10^{12}$ Возраст пирамид                      |                                    |
| $10^3$     |                                                | $Ra^{226}$                         |
|            | Возраст США                                    |                                    |
| $10^9$     | Человеческая жизнь                             | $H^3$                              |
| $10^6$     |                                                |                                    |
|            | Сутки                                          |                                    |
| $10^3$     | Свет проходит расстояние<br>от Солнца до Земли | Нейтрон                            |
| 1          | Один удар сердца                               |                                    |
| $10^{-3}$  | Период звуковой волны                          |                                    |
| $10^{-6}$  | Период радиоволны                              | $\mu$ -мезон<br>$\pi^{\pm}$ -мезон |
| $10^{-9}$  | Свет проходит расстояние 1 м                   |                                    |
| $10^{-12}$ | Период молекулярных<br>вращений                |                                    |
| $10^{-15}$ | Период атомных колебаний                       | $\pi^0$ -мезон                     |
| $10^{-18}$ | Свет проходит через атом                       |                                    |
| $10^{-21}$ |                                                |                                    |
|            | Период ядерных колебаний                       |                                    |
| $10^{-24}$ | Свет проходит через ядро                       | Странные<br>частицы                |
|            | ? ? ? ?                                        |                                    |

Если начертить график зависимости радиоактивности от времени, то мы получим кривую типа изображенной на фиг. 5.3.



**Фиг. 5.3.** Уменьшение радиоактивности со временем.  
Радиоактивность падает в два раза за каждый период полураспада  $T$ .

Мы видим, что если радиоактивность за  $T$  дней (период полураспада) уменьшается вдвое, то за  $2T$  дней она уменьшится в четыре раза и т.д. Произвольный интервал времени  $t$  содержит  $t/T$  «периодов полураспада», и, следовательно, количество начального вещества уменьшится в  $2^{t/T}$  раза.

Если мы знаем, что какой-то материал, например дерево, при своем образовании содержал некоторое количество  $A$  радиоактивного вещества, а прямые измерения показывают, что теперь он содержит количество  $B$ , то возраст этого материала можно просто вычислить, решив уравнение:

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} = \frac{B}{A}.$$

А такие случаи, когда мы знаем первоначальное количество радиоактивного вещества, к счастью, существуют. Известно, например, что углекислый газ в воздухе содержит малую долю радиоактивного изотопа  $C^{14}$ , период полураспада которого составляет 5000 лет. Количество его благодаря действию космических лучей постоянно пополняется взамен распавшегося. Если мы измеряем *полное* содержание углерода в каком-то предмете и знаем, что определенная доля этого углерода была первоначально радиоактивным  $C^{14}$ , то нам известно и первоначальное количество  $A$  и мы можем пользоваться приведенной выше формулой. Если же путем точных измерений установлено, что оставшееся количество  $C^{14}$  соответствует 20 периодам полураспада, то можно сказать, что этот органический предмет жил приблизительно 100 000 лет назад.

Хотелось бы, однако, узнать возраст еще более древних вещей. Это можно сделать, измерив содержание других радиоактивных элементов с большими периодами полураспада. Уран, например, имеет изотоп с периодом полураспада около  $10^9$  лет, так что если какой-то материал при своем образовании  $10^9$  лет назад содержал уран, то сегодня от него осталась только половина первоначального количества. При своем распаде уран превращается в свинец. Как определить возраст горной породы, которая образо-

валась много-много лет назад в результате какого-то химического процесса? Свинец по своим химическим свойствам отличается от урана, поэтому они первоначально входили в разные виды горных пород. Если взять такой вид породы, который вначале должен был содержать только уран, то мы обнаружим в нем некоторое количество свинца. Сравнивая доли свинца и урана, можно определить ту часть урана, которая в результате распада превратилась в свинец. Этим методом было установлено, что возраст некоторых горных пород составляет несколько миллиардов лет. Применяя шире этот метод путем сравнения содержания урана и свинца не только в некоторых горных породах, но и в воде океанов, а затем усредняя различные данные по всему земному шару, установили, что нашей планете исполнилось примерно 5,5 миллиарда лет.

Интересно, что возраст метеоритов, падающих на Землю, вычисленный по урановому методу, совпадает с возрастом самой Земли. Более того, оказалось, что и метеориты, и горные породы Земли составлены из одного и того же материала, поэтому существует мнение, что Земля образовалась из пород, «плававших» некогда в «околосолнечном» пространстве.

Некогда, во времена, еще более древние, чем возраст Земли (т.е. 5 миллиардов лет назад), начала свою историю Вселенная. Сейчас считают,

что возраст по крайней мере нашей части Вселенной достигает примерно 10—12 миллиардов лет. Нам неизвестно, что было до этого. В сущности, опять можно спросить: «А есть ли смысл говорить о том, что было до этого? И имеет ли смысл само понятие «время» до «рождения» Вселенной?»

## § 5. Единицы и стандарты времени

Мы уже говорили, что счет времени удобно вести в каких-то стандартных единицах, скажем в днях или секундах, и измерять длительности в количествах этой единицы или ее долях. Но что же выбрать за основную стандартную единицу? Можно ли, например, принять за отправную единицу человеческий пульс? Очевидно, нет. Уж очень непостоянна эта единица. Лучше обстоит дело с часами. Двое часов согласуются гораздо лучше, чем пульс. Вы скажете: ладно, давайте возьмем часы. Но чьи? Существует предание об одном швейцарском мальчике, которому хотелось, чтобы все часы в его городе отзванивали полдень в одно и то же время. Он ходил по городу и доказывал всем, насколько это важно. Каждый считал, что это действительно было бы чудесно, если бы все другие часы в городе звонили полдень по *его* часам! В самом деле, очень

трудно решить, чьи же часы мы должны выбрать в качестве стандарта. К счастью, существуют часы, которые признают все, — это наша Земля. Долгое время в качестве стандарта выбирался период вращения Земли. Однако по мере того, как измерения становились все более точными, обнаруживалось, что вращение Земли не строго периодически, если сравнивать его с лучшими часами. А этим «лучшим часам» можно доверять, ибо они согласуются друг с другом. Сейчас известно, что по разным причинам одни дни оказываются длиннее других и, кроме того, средний период вращения Земли на протяжении столетий несколько удлиняется.

Вплоть до самого последнего времени не было найдено ничего более точного, чем вращение Земли, и поэтому все часы сверялись с длиной астрономических суток, а секунда определялась как  $1/86\,400$  часть средних суток. Однако сейчас мы научились работать с некоторыми естественными осцилляторами, которые являются более точными стандартами времени, чем вращение Земли. Это так называемые «атомные часы». В основе их лежат колебания атомов, период которых нечувствителен к температуре и другим внешним воздействиям. Эти часы позволяют измерять время с точностью, лучшей  $10^{-7}\%$ . В последние два года профессор Гарвардского университета Норман Рамзей спроектировал и по-



строил улучшенные атомные часы, работающие на колебаниях атомов водорода. Он считает, что эти часы могут быть еще в сто раз более точными. Сейчас ведутся измерения, которые покажут, насколько он прав.

А поскольку оказалось возможным создать часы гораздо более точные, чем астрономические, то ученые договариваются определять единицу времени с помощью новых стандартов — атомных часов\*.

## § 6. Большие расстояния

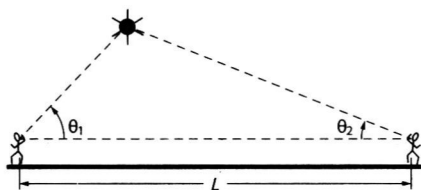
Вернемся теперь к вопросу о *расстоянии*. Как далеко отстоят от нас окружающие предметы и как велики они? Всем известно, что для измерения расстояния нужно взять какую-то единицу длины и считать, сколько этих единиц укладывается на данном отрезке. Но как измерить те предметы, которые меньше единицы длины? Как подразделить выбранную единицу длины? А точно так же, как и время: мы берем меньшую единицу длины и считаем, сколько таких единиц укладывается в большей. Таким методом мы сможем измерять всё меньшие и меньшие длины.

Однако под расстоянием мы понимаем не только то, что можно измерить метром. Как, на-

---

\* Об этом ученые договорились в конце 1964 г., когда готовилось русское издание этой книги. — *Прим. ред.*

пример, измерить метром расстояние между вершинами двух гор? Здесь на помощь приходит уже другой метод измерения расстояний — триангуляция. Хотя это означает использование другого определения понятия «расстояние», но в тех случаях, когда есть возможность применить оба метода, они дают одинаковый результат. Пространство все же более или менее соответствует представлениям Евклида, поэтому оба определения эквивалентны. Ну а раз они согласуются на Земле, то мы более уверены в законности применения триангуляции и для больших расстояний. Этим методом была измерена, например, высота первого спутника (фиг. 5.4).



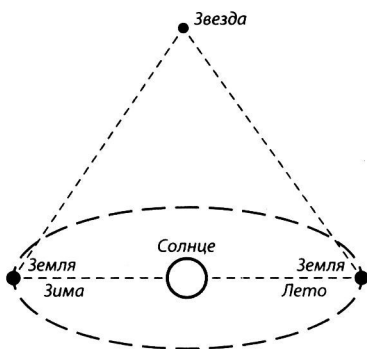
**Фиг. 5.4.** *Определение высоты искусственного спутника методом триангуляции.*

Она оказалась равной приблизительно  $5 \cdot 10^5$  м. При большей тщательности измерений тем же самым методом определялось расстояние до Луны. Направления двух телескопов в различных точках Земли дают два необходимых угла. Оказалось, что Луна удалена от нас на расстояние

$4 \cdot 10^8$  м. Однако для Солнца таких измерений провести нельзя, по крайней мере до сих пор никому не удавалось. Дело в том, что точность, с которой можно сфокусировать телескоп на данную точку Солнца и с которой можно измерить углы, недостаточна для вычисления расстояния до Солнца. Как же все-таки определить его? Необходимо как-то расширить принцип триангуляции. Астрономические наблюдения позволяют измерить *относительное* расстояние между планетами и Солнцем и определить их *относительное* расположение. Таким образом, мы получаем план Солнечной системы в неизвестном масштабе. Чтобы определить масштаб, требуется только *абсолютное* расстояние, которое было найдено многими различными способами. Один из способов, считавшийся до самого последнего времени наиболее точным, заключается в определении расстояния от Земли до Эроса — малой планеты, которая по временам проходит недалеко от Земли. С помощью триангуляции можно определить расстояние до этого небольшого объекта и получить необходимый масштаб. Зная относительные расстояния, можно определить, например, все абсолютные расстояния от Земли до Солнца или до планеты Плутон.

В последний год достигнуты большие успехи в определении масштаба Солнечной системы. В Лаборатории ракетных двигателей с помощью

прямой радиолокационной связи были проведены очень точные измерения расстояния от Земли до Венеры. Здесь мы имеем дело еще с одним определением понятия «расстояние». Нам известна скорость распространения света (а стало быть, и скорость распространения радиоволн), и мы предполагаем, что эта скорость постоянна на всем протяжении между Землей и Венерой. Послав радиоволну по направлению к Венере, мы считаем время до прихода обратно отраженной волны. А зная *время* и *скорость*, мы получаем *расстояние*.



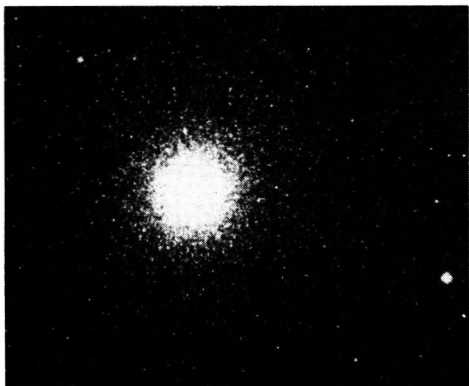
**Фиг. 5.5.** *Определение расстояния до ближайшей звезды методом триангуляции.*

*В качестве базы используется диаметр орбиты Земли.*

А как измерить расстояние до еще более отдаленных объектов, например до звезд? К счастью, здесь снова можно возвратиться к нашему методу триангуляции, ибо движение Земли во-

круг Солнца позволяет измерить расстояние до объектов, находящихся вне Солнечной системы. Если мы направим телескоп на некую звезду один раз зимой, а другой раз летом (фиг. 5.5), то можно надеяться достаточно точно измерить углы и определить расстояние до этой звезды.

Но что делать, если звезда находится настолько далеко от нас, что уже невозможно пользоваться методом триангуляции? Астрономы всегда изобретают всё новые и новые способы определения расстояний. Так, они научились определять размер и яркость звезд по их цвету. Оказалось, что цвет и истинная яркость многих близлежащих звезд, расстояние до которых определялось методом триангуляции, в большинстве случаев связаны между собой гладкой зависимостью. Если теперь измерить цвет отдаленной звезды, то по этой зависимости можно определить ее истинную яркость, а измеряя *видимую яркость* звезды (вернее, по тому, насколько звезда нам кажется *тусклой*), можно вычислить расстояние до нее. (Для данной истинной яркости видимая яркость уменьшается как квадрат расстояния.) Правильность этого метода нашла неожиданное подтверждение в результатах измерений, проведенных для группы звезд, известных под названием «шарового скопления». Фотография этой группы звезд приведена на фиг. 5.6.



*Фиг. 5.6. Скопление звезд вблизи центра нашей Галактики, удаленное от нас на расстояние 30 000 световых лет, или около  $3 \cdot 10^{20}$  м.*

Достаточно взглянуть на фотографию, чтобы убедиться, что все эти звезды расположены в одном месте. Тот же результат получается и с помощью метода сравнения цвета и яркости.

Изучение многих шаровых скоплений дает еще одну важную информацию. Оказалось, что существует участок неба с большой концентрацией таких шаровых скоплений, причем большинство из них находятся на одном и том же расстоянии от нас. Сравнивая эти данные с некоторыми другими, мы приходим к заключению, что эти скопления являются центром нашей Галактики. Таким образом мы определяем, что расстояние до центра Галактики составляет приблизительно  $10^{20}$  м.

Данные о размере нашей Галактики дают ключ к определению еще больших межгалактических расстояний. На фиг. 5.7 приведена фотография галактики, которая по форме очень похожа на нашу Галактику.

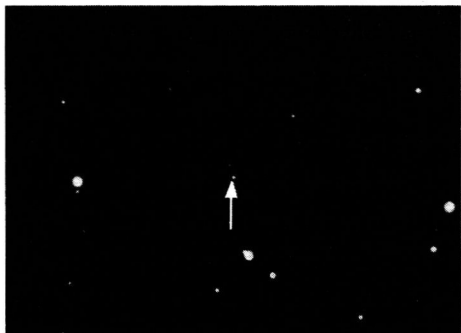


**Фиг. 5.7.** *Спиральная галактика, подобная нашей.*

*Если предположить, что диаметр этой галактики равен диаметру нашей Галактики, то, исходя из ее кажущегося размера, можно подсчитать расстояние; оно оказывается равным 30 миллионам световых лет ( $3 \cdot 10^{23}$  м).*

Возможно, что и размер ее тот же. (Есть еще ряд соображений, согласно которым размеры всех галактик приблизительно одинаковы.) А если это так, то можно узнать расстояние до нее. Мы измеряем угловой размер галактики (т.е. угол, который она занимает на небесном своде), знаем ее диаметр, а стало быть, можем вычислить расстояние. Опять триангуляция!

Недавно с помощью гигантского Паломарского телескопа были получены фотографии невероятно далеких галактик. Одна из этих фотографий приведена на фиг. 5.8.



**Фиг. 5.8.** Наиболее удаленный от нас объект 3C295 в созвездии Волопаса (указан стрелкой), который измерялся в 1960 г. с помощью 200-дюймового телескопа.

Сейчас полагают, что расстояние до некоторых из них приблизительно равно половине размера Вселенной ( $10^{26}$  м) — наибольшего расстояния, которое можно себе представить!

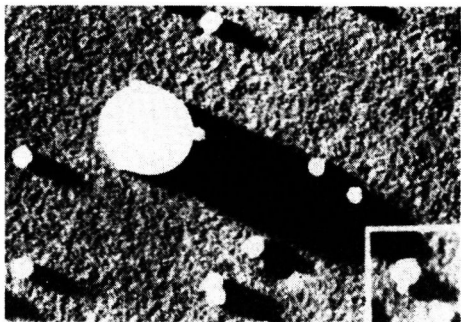
## § 7. Малые расстояния

Обратимся теперь к малым расстояниям. Подразделить метр просто. Без особых трудностей можно разделить его на тысячу равных частей. Таким же путем, хотя и несколько сложнее (ис-



пользуя хороший микроскоп), можно разделить миллиметр на тысячу частей и получить микрон (миллионную долю метра). Однако продолжать это деление становится трудно, поскольку невозможно «увидеть» объекты, меньшие, чем длина волны видимого света (около  $5 \cdot 10^{-7}$  м).

Все же мы не останавливаемся на том, что недоступно глазу. С помощью электронного микроскопа можно получить фотографии, помогающие увидеть и измерить еще меньшие объекты — вплоть до  $10^{-8}$  м (фиг. 5.9).



**Фиг. 5.9.** Фотография вирусов, полученная с помощью электронного микроскопа.

Видна «большая» сфера, показанная для сравнения:  
диаметр ее равен  $2 \cdot 10^{-7}$  м, или 2000 Å.

А с помощью косвенных измерений (своего рода триангуляции в микроскопическом масштабе) можно измерять всё меньшие и меньшие объекты. Сначала из наблюдений отражения света

короткой длины волны (рентгеновских лучей) от образца с нанесенными на известном расстоянии метками измеряется длина волны световых колебаний.

*Таблица расстояний*

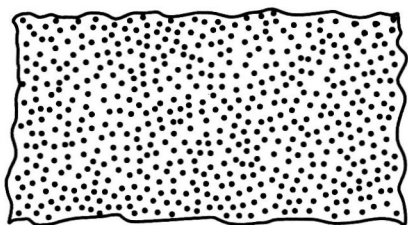
| Световые<br>годы | Метры      |                                 |
|------------------|------------|---------------------------------|
|                  |            | ? ? ? ?                         |
|                  | $10^{27}$  |                                 |
|                  |            | Размеры Вселенной               |
| $10^9$           | $10^{24}$  |                                 |
| $10^6$           |            | До ближайшей соседней галактики |
|                  | $10^{21}$  |                                 |
|                  |            | До центра нашей Галактики       |
| $10^3$           | $10^{18}$  |                                 |
| 1                |            | До ближайшей звезды             |
|                  | $10^{15}$  |                                 |
|                  |            | Радиус орбиты Плутона           |
|                  | $10^{12}$  |                                 |
|                  |            | До Солнца                       |
|                  | $10^9$     |                                 |
|                  |            | До Луны                         |
|                  | $10^6$     |                                 |
|                  |            | Высота искусственного спутника  |
|                  | $10^3$     |                                 |
|                  |            | Высота телевизионной башни      |
|                  |            | Рост ребенка                    |
|                  | 1          |                                 |
|                  | $10^{-3}$  |                                 |
|                  |            | Крупинка соли                   |
|                  | $10^{-6}$  |                                 |
|                  |            | Размер вируса                   |
|                  | $10^{-9}$  |                                 |
|                  | $10^{-12}$ | Радиус атома                    |
|                  | $10^{-15}$ | Радиус ядра                     |
|                  |            | ? ? ? ?                         |

Затем по картине рассеяния того же света на кристалле можно определить относительное расположение в нем атомов, причем результат хорошо согласуется с данными о расположении атомов, полученными химическим путем. Таким способом определяется диаметр атомов (около  $10^{-10}$  м).

Дальше в шкале расстояний имеется довольно большая незаполненная «щель» между атомными размерами  $10^{-10}$  м и в  $10^5$  раз меньшими ядерными размерами (около  $10^{-15}$  м). Для определения ядерных размеров применяются уже совершенно другие методы: измеряется *видимая площадь*  $\sigma$ , или так называемое *эффективное поперечное сечение*. Если же мы хотим определить радиус, то пользуемся формулой  $\sigma = \pi r^2$ , поскольку ядра можно приближенно рассматривать как сферические.

Эффективные сечения ядер можно определить, пропуская пучок частиц высокой энергии через тонкую пластинку вещества и измеряя число частиц, не прошедших сквозь нее. Эти высокоэнергетические частицы прорываются сквозь легкое облачко электронов, но при попадании в тяжелое ядро останавливаются или отклоняются. Предположим, что у нас имеется пластинка толщиной 1 см. На такой толщине укладывается приблизительно  $10^8$  атомных слоев. Однако ядра

настолько малы, что вероятность того, что одно ядро закроет другое, очень незначительна. Можно себе представить, что высокоэнергетическая частица, налетающая на пластинку углерода толщиной 1 см, «видит» приблизительно то, что в сильно увеличенном масштабе показано на фиг. 5.10.



**Фиг. 5.10.** Воображаемая пластинка углерода толщиной 1 см при сильном увеличении (если бы были видны только ядра атомов).

Вероятность того, что очень малая частица столкнется с ядром, равна отношению площади, занимаемой ядрами (черные точки), к общей площади рисунка. Пусть над областью с площадью  $A$  по всей толщине пластинки находится  $N$  атомов (разумеется, каждый с одним ядром). Тогда доля площади, закрытая ядрами, будет равна  $N\sigma/A$ . Пусть теперь число частиц в нашем пучке до пластинки будет равно  $n_1$ , а после нее равно  $n_2$ ; тогда доля частиц, не прошедших через пластинку, будет  $(n_1 - n_2)/n_1$ , что должно быть равно

доле площади, занимаемой ядрами. Радиус же ядер вычисляется из равенства\*

$$\pi r^2 = \sigma = \frac{A}{N} \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Из таких экспериментов мы находим, что радиусы ядер лежат в пределах от  $1 \cdot 10^{-15}$  до  $6 \cdot 10^{-15}$  м. Кстати, единица длины  $10^{-15}$  м называется *ферми* в честь Энрико Ферми (1901–1958).

Что можно ожидать в области еще меньших расстояний? Можно ли их измерять? На этот вопрос пока еще нет ответа. Может быть, именно здесь, в каком-то изменении понятия пространства или измерения на малых расстояниях, кроется разгадка тайны ядерных сил.

Несколько слов о стандарте длины. Разумно в качестве стандарта использовать какую-то естественную единицу длины, например радиус Земли или некоторую его долю. Именно таким образом возник метр. Первоначально он определялся как  $(\pi/2) \cdot 10^{-7}$  доля радиуса Земли. Однако такое определение нельзя считать ни особенно точным, ни удобным. Поэтому в течение долгого времени по международному соглашению в качестве эталона метра принималась

---

\* Это равенство справедливо только тогда, когда площадь, занимаемая ядрами, составляет малую долю общей площади, т.е.  $(n_1 - n_2)/n_1$  много меньше единицы. В противном же случае необходимо учитывать поправку на частичное «загораживание» одного ядра другим.

длина между двумя метками, сделанными на особом бруске, который хранится в специальной лаборатории во Франции. Только много позднее поняли, что и такое определение метра не столь уж точно, как это необходимо, и не так уж универсально и постоянно, как этого хотелось бы. Поэтому сейчас принят новый стандарт длины как некоторое заранее установленное число длин волн определенной спектральной линии.

• • •

Результаты измерения расстояний и времени зависят от наблюдателя. Два наблюдателя, движущиеся друг относительно друга, измеряя один и тот же предмет или длительность одного и того же процесса, получают разные значения, хотя, казалось бы, мерили одно и то же. Расстояния и интервалы времени в зависимости от системы координат (т.е. системы отсчета), в которой производят измерения, имеют различную величину. В последующих главах мы будем более подробно разбирать этот вопрос.

Законы природы не позволяют выполнять абсолютно точные измерения расстояний или интервалов времени. Мы уже упоминали ранее, что ошибка в определении положения предмета не может быть меньше, чем

$$\Delta x = \frac{h}{\Delta p},$$

где  $h$  — малая величина, называемая «постоянной Планка», а  $\Delta p$  — ошибка в измерении импульса (массы, умноженной на скорость) этого предмета. Как уже говорилось, эта неопределенность в измерении положения связана с волновой природой частиц.

Относительность пространства и времени приводит к тому, что измерения интервалов времени также не могут быть точнее, чем

$$\Delta t = \frac{h}{\Delta E},$$

где  $\Delta E$  — ошибка в измерении энергии того процесса, продолжительностью которого мы интересуемся. Чтобы знать *более точно, когда* что-то произошло, мы вынуждены довольствоваться тем, что меньше знаем, *что же именно* произошло, поскольку наши знания об энергии, участвующей в процессе, будут менее точными. Эта неопределенность времени, так же как и неопределенность положения, связана с волновой природой вещества.

## Глава 6

# ВЕРОЯТНОСТЬ

*Истинная логика нашего мира —  
это подсчет вероятностей.*

Джемс Кларк Максвелл

---

*Вероятность и правдоподобие.  
Флуктуации. Случайные блуждания.  
Распределение вероятностей.  
Принцип неопределенности*

---

### § 1. Вероятность и правдоподобие

«Вероятность», или «шанс», — это слово вы слышите почти ежедневно. Вот по радио передают прогноз погоды на завтра: «Вероятно, будет дождь». Вы можете сказать: «У меня мало шансов дожить до ста лет». Ученые тоже часто употребляют эти слова. Сейсмолога интересует вопрос: какова вероятность того, что в следующем году в Южной Калифорнии произойдет землетрясение такой-то силы? Физик может спросить: с какой вероятностью этот счетчик Гейгера регистрирует двадцать импульсов в последующие десять секунд? Дипломата или государственного деятеля волнует вопрос: каковы шансы этого кандидата быть избранным президентом?



Ну а вас, конечно, интересует: есть ли шансы что-либо понять в этой главе?

Под *вероятностью* мы понимаем что-то вроде предположения или догадки. Но почему и когда мы гадаем? Это делается тогда, когда мы хотим вынести какое-то заключение или вывод, но не имеем достаточно информации или знаний, чтобы сделать вполне определенное заключение. Вот и приходится гадать: может быть, так, а может быть, и не так, но больше похоже на то, что именно так. Очень часто мы гадаем, когда нужно принять какое-то решение, например: «Брать ли мне сегодня с собой плащ или не стоит?»; «На какую силу землетрясения должен я рассчитывать проектируемое здание?»; «Нужно ли мне делать более надежную защиту?»; «Следует ли мне менять свою позицию в предстоящих международных переговорах?»; «Идти ли мне сегодня на лекцию?»

Иногда мы строим догадки потому, что хотим при ограниченности своих знаний сказать как можно *больше* о данной ситуации. В сущности, ведь любое обобщение носит характер догадки. Любая физическая теория — это своего рода догадка. Но догадки тоже бывают разные: хорошие и плохие, близкие и далекие. Тому, как делать наилучшие догадки, учит нас теория вероятностей. Язык вероятностей позволяет нам количественно говорить о таких ситуациях, когда исход

весьма и весьма неопределенен, но о котором все же в среднем можно что-то сказать.

Давайте рассмотрим классический пример с подбрасыванием монеты. Если монета «честная», то мы не можем знать наверняка, какой стороной она упадет. Однако мы предчувствуем, что при большом числе бросаний число выпадений «орла» и «решки» должно быть приблизительно одинаковым. В этом случае говорят: вероятность выпадения «орла» равна половине.

Мы можем говорить о вероятности исхода только тех наблюдений, которые собираемся проделать в будущем. *Под вероятностью данного частного результата наблюдения понимается ожидаемая нами наиболее правдоподобная доля исходов с данным результатом при некотором числе повторений наблюдения.* Вообразите себе повторяющееся  $N$  раз наблюдение, например подбрасывание вверх монеты. Если  $N_A$  — наша оценка наиболее правдоподобного числа выпадений с результатом  $A$ , например выпадений «орла», то под вероятностью  $P(A)$  результата  $A$  мы понимаем отношение

$$P(A) = \frac{N_A}{N}. \quad (6.1)$$

Наше определение требует некоторых комментариев. Прежде всего мы говорим о вероятности какого-то события только в том случае,

если оно представляет собой возможный результат испытания, которое можно *повторить*. Но отнюдь не ясно, имеет ли смысл такой вопрос: какова вероятность того, что в этом доме поселилось привидение?

Вы, конечно, можете возразить, что никакая ситуация не может повториться в *точности*. Это верно. Каждое новое наблюдение должно происходить по крайней мере в другое время или в другом месте. По этому поводу я могу сказать только одно: необходимо, чтобы каждое «повторное» наблюдение казалось нам *эквивалентным*. Мы должны предполагать по крайней мере, что каждый новый результат наблюдения возник из равноценных начальных условий и из одного и того же уровня начальных знаний. Последнее особенно важно. (Если вы заглянули в карты противника, то, конечно, ваши прогнозы о шансах на выигрыш будут совсем другими, чем если бы вы играли честно!)

Хочу отметить, что я *не собираюсь* рассматривать значения  $N$  и  $N_A$  в (6.1) только как результат каких-то действительных наблюдений. Число  $N_A$  — это просто наилучшая *оценка* того, что *могло бы* произойти при *воображаемых* наблюдениях. Поэтому вероятность зависит от наших знаний и способностей быть пророком, в сущности от нашего здравого смысла! К счастью, здравый смысл не столь уже субъективен, как это кажет-

ся на первый взгляд. Здравым смыслом обладают многие люди, и их суждения о степени правдоподобия того или иного события в большинстве случаев совпадают. Однако вероятность все же не является «абсолютным» числом. Поскольку в каком-то смысле она зависит от степени нашего невежества, постольку с изменением наших знаний она может меняться.

Отмечу еще одну «субъективную» сторону нашего определения вероятности. Мы говорили, что  $N_A$  — это «наша оценка наиболее вероятного числа случаев». При этом, конечно, мы не надеялись, что число нужных нам случаев будет *в точности* равно  $N_A$ , но оно должно быть где-то *близко* к  $N_A$ ; это число *более вероятно*, чем любое другое. Если подбрасывать монету вверх 30 раз, то вряд ли можно ожидать, что число выпадений «орла» будет в точности 15; скорее, это будет какое-то число около 15, может быть 12, 13, 14, 15, 16 или 17. Однако если *необходимо* выбрать из этих чисел какое-то одно число, то мы бы решили, что число 15 *наиболее правдоподобно*. Поэтому мы и пишем, что  $P(\text{орел}) = 0,5$ .

Но почему все же число 15 более правдоподобно, чем все остальные? Можно рассуждать следующим образом: если наиболее вероятное число выпадений «орла» будет  $N_o$ , а полное число подбрасываний  $N$ , то наиболее вероятное чис-

ло выпадений «решек» равно  $N - N_o$ . (Ведь предполагается, что при каждом подбрасывании должны выпасть только *либо* «орел», *либо* «решка» и ничего другого!) Но если монета «честная», то нет основания думать, что число выпадений «орла», например, должно быть больше, чем выпадений «решки»? Так что до тех пор, пока у нас нет оснований сомневаться в честности подбрасывающего, мы должны считать, что  $N_p = N_o$ , а следовательно,  $N_p = N_o = N/2$ , или  $P(\text{орел}) = P(\text{решка}) = 0,5$ .

Наши рассуждения можно обобщить на *любую* ситуацию, в которой возможны  $m$  различных, но «равноценных» (т.е. равновероятных) результатов наблюдения. Если наблюдение может привести к  $m$  различным результатам и ни к чему больше и если у нас нет оснований думать, что один из результатов предпочтительнее остальных, то вероятность каждого *частного* исхода наблюдения  $A$  будет  $1/m$ , т.е.  $P(A) = 1/m$ .

Пусть, например, в закрытом ящике находятся семь шаров разного цвета и мы наугад, т.е. не глядя, берем один из них. Вероятность того, что у нас в руке окажется красный шар, равна  $1/7$ . Вероятность того, что мы из колоды в 36 карт вытащим даму пик, равна  $1/36$ , такая же как и выпадение двух шестерок при бросании двух игральные костей.

• • •

В гл. 5 мы определяли размер ядра с помощью затеняемой им площади или так называемого эффективного сечения. По существу, речь шла о вероятностях. Если мы «обстреливаем» быстрыми частицами тонкую пластинку вещества, то имеется некая вероятность, что они пройдут через нее, не задев ядер, однако с некоторой вероятностью они могут попасть в ядро. (Ведь ядра столь малы, что мы не можем *видеть* их, мы, следовательно, не можем прицелиться, и «стрельба» ведется вслепую.) Если в нашей пластинке имеется  $n$  атомов и ядро каждого из них затеняет площадь  $\sigma$ , то полная площадь, затененная ядрами, будет равна  $n\sigma$ . При большом числе  $N$  случайных выстрелов мы ожидаем, что число попаданий  $N_c$  будет так относиться к *полному* числу выстрелов, как затененная ядрами площадь относится к полной площади пластинки:

$$\frac{N_c}{N} = \frac{n\sigma}{A}. \quad (6.2)$$

Поэтому можно сказать, что *вероятность* попадания каждой из выстреленных частиц в ядро при прохождении сквозь пластинку будет равна

$$P_c = \frac{n}{A}\sigma, \quad (6.3)$$

где  $n/A$  — просто число атомов, приходящихся на единицу площади пластинки.

## § 2. Флуктуации

Теперь мне бы хотелось несколько подробнее показать, как можно использовать идею вероятности, чтобы ответить на вопрос: сколько же в самом деле я *ожидаю* выпадений «орла», если подбрасываю монету  $N$  раз? Однако, прежде чем ответить на него, давайте посмотрим, что все-таки дает нам такой «эксперимент». На фиг. 6.1 показаны результаты, полученные в первых трех сериях испытаний по 30 испытаний в каждой.

|   |                                                  |    |
|---|--------------------------------------------------|----|
| O | <u>  x x x                  xxx  x  xx x x  </u> | 11 |
| P | xx x x xxxxxxxxxxxx  xx xx  x x                  | 19 |
| O | <u>  x      x      x x xxx      x x x x  </u>    | 11 |
| P | xxxx xxxx x x      xxxx xx x xx                  | 19 |
| O | <u>  x  xxx xx  x  xxx  xx x xx x  </u>          | 16 |
| P | x xx  x  xx xx      xx  x x  x x                 | 14 |

Фиг. 6.1. Последовательность выпадения «орла» и «решки». Три серии опытов подбрасывания монеты по 30 раз в каждой серии.

Последовательности выпадений «орла» и «решки» показаны в том порядке, как это происходило. В первый раз получилось 11 выпадений «орла», во второй — тоже 11, а в третий — 16. Можно ли на этом основании подозревать, что монета была «нечестной»? Или, может быть, мы ошиблись, приняв 15 за наиболее вероятное число выпадений «орла» в каждой серии испытаний?

Сделаем еще 97 серий, т.е. 100 серий по 30 испытаний в каждой. Результаты их приведены в табл. 6.1.

**Таблица 6.1.** Число выпадений «орла»\*  
Проведено несколько серий испытаний,  
по 30 подбрасываний монеты в каждой

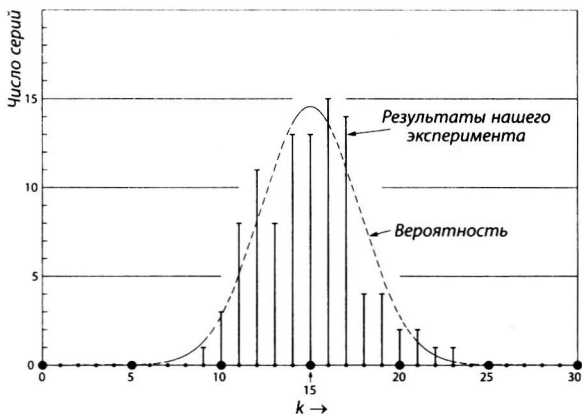
|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 11 | 16 | 17 | 15 | 17 | 16 | 19 | 18 | 15 | 13 |
| 11 | 17 | 17 | 12 | 20 | 23 | 11 | 16 | 17 | 14 |
| 16 | 12 | 15 | 10 | 18 | 17 | 13 | 15 | 14 | 15 |
| 16 | 12 | 11 | 22 | 12 | 20 | 12 | 15 | 16 | 12 |
| 16 | 10 | 15 | 13 | 14 | 16 | 15 | 16 | 13 | 18 |
| 14 | 14 | 13 | 16 | 15 | 19 | 21 | 14 | 12 | 15 |
| 16 | 11 | 16 | 14 | 17 | 14 | 11 | 16 | 17 | 16 |
| 16 | 15 | 14 | 12 | 18 | 15 | 14 | 21 | 11 | 16 |
| 17 | 17 | 12 | 13 | 14 | 17 | 9  | 13 | 16 | 13 |

Взгляните на числа, приведенные в этой таблице. Вы видите, что большинство результатов «близки» к 15, так как почти все они расположены между 12 и 18. Чтобы лучше прочувствовать эти результаты, нарисуете график их *распределения*. Для этого подсчитаем число испытаний, в которых получилось  $k$  выпадений «орла», и отложим это число вверх над  $k$ . В результате получим фиг. 6.2.

---

\* Эти последние 97 экспериментов проводились следующим образом. Ящик, в котором находились 30 монет, энергично встряхивался; затем подсчитывалось число выпадений «орла».





**Фиг. 6.2.** Сводка результатов 100 серий по 30 испытаний в каждой.

Вертикальные линии показывают число серий, в которых выпадал  $k$  раз «орел». Пунктирная кривая показывает ожидаемое число серий с выпадением  $k$  раз «орла», полученное из вычисления вероятностей.

Действительно, в 13 сериях было получено 15 выпадений «орла», то же число серий дало 14 выпадений «орла»; 16 и 17 выпадений получались больше чем 13 раз. Должны ли мы из этого делать вывод, что монетам больше нравится ложиться «орлом» вверх? А может быть, мы не правы в выборе числа 15 как наиболее правдоподобного? Может быть, в действительности более правдоподобно, что за 30 испытаний получается 16 выпадений «орла»? Минуточку терпения! Если мы сложим вместе результаты всех серий, то общее число испытаний будет 3000, а общее число вы-

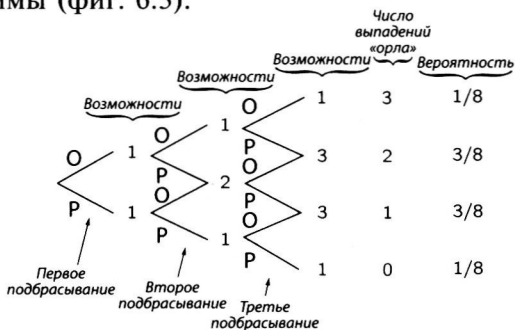
падений «орла» в этих испытаниях достигает 1492, так что доля испытаний с выпадением «орла» в результате будет 0,497. Это очень близко к половине, но все же несколько *меньше*. Нет, мы все-таки *не можем* предполагать, что вероятность выпадения «орла» больше, чем 0,5! Тот факт, что в отдельных испытаниях «орел» чаще выпадал 16 раз, чем 15, является просто *случайным* отклонением, или *флуктуацией*. Мы же по-прежнему ожидаем, что *наиболее правдоподобным* числом выпадений должно быть 15.

Можно спросить: а какова вероятность того, что в серии из 30 испытаний «орел» выпадет 15 раз или 16, или какое-то другое число раз? Мы говорим, что вероятность выпадения «орла» в серии из *одного* испытания равна 0,5; соответственно вероятность невыпадения тоже равна 0,5. В серии из двух испытаний возможны *четыре* исхода: ОО, ОР, РО, РР. Так как каждый из них равновероятен, то можно заключить: а) вероятность двух выпадений «орла» равна  $\frac{1}{4}$ ; б) вероятность одного выпадения «орла» равна  $\frac{2}{4}$ ; в) вероятность невыпадения «орла» равна  $\frac{1}{2}$ . Это происходит потому, что существуют *две* возможности из четырех равных получить одно выпадение «орла» и только одна возможность получить два выпадения или не получить ни одного.

Рассмотрим теперь серию из трех испытаний. Третье испытание с равной вероятностью может

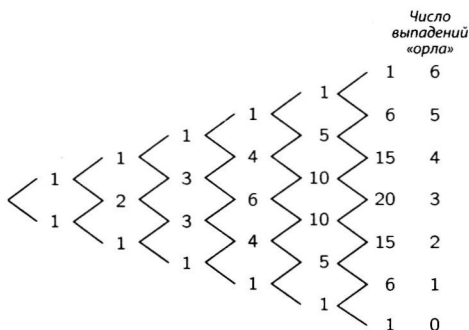
дать либо «орел», либо «решку», поэтому существует только один способ получения трех выпадений «орла»: мы *должны* получить два выпадения «орла» в двух первых испытаниях и затем выпадение «орла» в последнем. Однако получить два выпадения «орла» можно уже *три*ма способами: после двух выпадений «орла» может выпасть «решка» и еще два способа — после одного выпадения «орла» в первых двух испытаниях выпадет «орел» в третьем. Так что число равновероятных способов получить 3, 2, 1 и 0 выпадений «орла» будет соответственно равно 1, 3, 3 и 1; полное же число всех возможных способов равно 8. Таким образом, получаются следующие вероятности:  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{3}{8}$ ,  $\frac{3}{8}$ ,  $\frac{1}{8}$ .

Эти результаты удобно записать в виде диаграммы (фиг. 6.3).



**Фиг. 6.3.** Диаграмма, иллюстрирующая число различных возможностей получения 0, 1, 2 и 3 выпадений «орла» в серии из трех испытаний.

Ясно, что эту диаграмму можно продолжить, если мы интересуемся еще бóльшим числом испытаний. На фиг. 6.4 приведена аналогичная диаграмма для шести испытаний.



**Фиг. 6.4.** Диаграмма, подобная изображенной на фиг. 6.3, для серии из шести испытаний.

Число «способов», соответствующих каждой точке диаграммы, — это просто число различных «путей» (т.е., попросту говоря, последовательность выпадения «орла» и «решки»), которыми можно прийти в эту точку из начальной, не возвращаясь при этом назад, а высота этой точки дает общее число выпадений «орла». Этот набор чисел известен под названием *треугольника Паскаля*, а сами числа называются *биномиальными коэффициентами*, поскольку они появляются при разложении выражения  $(a + b)^n$ . Обычно эти числа на нашей диаграмме обозначаются символом  $\binom{n}{k}$ , или  $C_k^n$  (число сочетаний из  $n$  по  $k$ ), где

$n$  — полное число испытаний, а  $k$  — число выпадений «орла». Отмечу попутно, что биномиальные коэффициенты можно вычислять по формуле

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad (6.4)$$

где символ  $n!$ , называемый « $n$ -факториалом», обозначает произведение всех целых чисел от 1 до  $n$ , т.е.  $1 \cdot 2 \cdot 3 \dots (n-1) \cdot n$ .

Теперь уже все готово для того, чтобы с помощью выражения (6.1) подсчитать вероятность  $P(k, n)$  выпадения  $k$  раз «орла» в серии из  $n$  испытаний. Полное число всех возможностей будет  $2^n$  (поскольку в каждом испытании возможны два исхода), а число равновероятных комбинаций, в которых выпадет «орел», будет  $\binom{n}{k}$ , так что

$$P(k, n) = \frac{\binom{n}{k}}{2^n}. \quad (6.5)$$

Поскольку  $P(k, n)$  — доля тех серий испытаний, в которых выпадение «орла» ожидается  $k$  раз, то из ста серий  $k$  выпадений «орла» ожидается  $100 P(k, n)$  раз. Пунктирная кривая на фиг. 6.2 проведена как раз через точки функции  $100 P(k, 30)$ . Видите, мы *ожидали* получить 15 выпадений «орла» в 14 или 15 сериях испытаний, а получили только в 13. Мы *ожидали* получить 16 выпадений «орла» в 13 или 14 сериях

испытаний, а получили в 16. Но такие флуктуации вполне допускаются «правилами игры».

Использованный здесь метод можно применять и в более общей ситуации, где в каждом единичном испытании возможны только два исхода, которые давайте обозначим через В (выигрыш) и П (проигрыш). Вообще говоря, вероятности В и П в каждом отдельном испытании могут быть разными. Пусть  $p$ , например, будет вероятностью результата В. Тогда  $q$  (вероятность результата П) должна быть равна  $(1 - p)$ . В серии из  $n$  испытаний вероятность того, что результат В получится  $k$  раз, равна

$$P(k, n) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}. \quad (6.6)$$

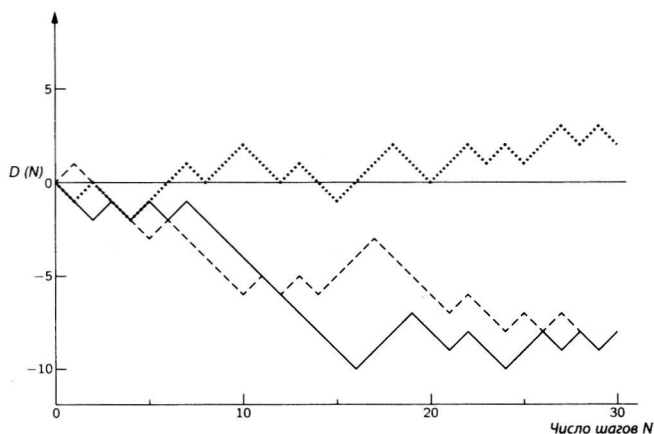
Эта функция вероятностей называется *биномиальным законом распределения вероятности*.

### § 3. Случайные блуждания

Существует еще одна интересная задача, при решении которой не обойтись без понятия вероятности. Это проблема «случайных блужданий». В простейшем варианте эта задача выглядит следующим образом. Вообразите себе игру, в которой игрок, начиная от точки  $x = 0$ , за каждый ход может продвинуться *либо* вперед (до точки  $x$ ), *либо* назад (до точки  $-x$ ), причем решение о том, куда ему идти, принимается совершенно *случай-*

но, ну, например, с помощью подбрасывания монеты. Как описать результат такого движения? В более общей форме эта задача описывает движение атомов (или других частиц) в газе — так называемое броуновское движение — или образование ошибки при измерениях. Вы увидите, насколько проблема «случайных блужданий» тесно связана с описанным выше опытом с подбрасыванием монеты.

Прежде всего давайте рассмотрим несколько примеров случайных блужданий. Их можно описать «чистым» продвижением  $D_n$  за  $N$  шагов. На фиг. 6.5 показаны три примера путей при случайном блуждании.



**Фиг. 6.5.** Три примера случайного блуждания.

По горизонтали отложено число шагов  $N$ , по вертикали — координата  $D(N)$ , т.е. чистое расстояние от начальной точки.

(При построении их в качестве случайной последовательности решений о том, куда сделать следующий шаг, использовались результаты подбрасывания монеты, приведенные на фиг. 6.1.)

Что можно сказать о таком движении? Ну, во-первых, можно спросить: как далеко мы в среднем продвинемся? Нужно *ожидать*, что среднего продвижения вообще не будет, поскольку мы с равной вероятностью можем идти как вперед, так и назад. Однако чувствуется, что с увеличением  $N$  мы все с большей вероятностью можем блуждать где-то всё дальше и дальше от начальной точки. Поэтому возникает вопрос: каково среднее *абсолютное расстояние*, т.е. каково среднее значение  $|D|$ ? Впрочем, удобнее иметь дело не с  $|D|$ , а с  $D^2$ ; эта величина положительна как для положительного, так и для отрицательного движения и поэтому тоже может служить разумной *мерой* таких случайных блужданий.

Можно показать, что ожидаемая величина  $D_N^2$  равна просто  $N$  — числу сделанных шагов. Кстати, под «ожидаемой величиной» мы понимаем наиболее вероятное значение (угаданное наилучшим образом), о котором можно думать как об *ожидаемом* среднем значении *большого числа повторяющихся* процессов блуждания. Эта величина обозначается как  $\langle D_N^2 \rangle$  и называется, кроме того, «средним квадратом расстояния». После одного шага  $D^2$  всегда равно  $+1$ , поэтому, несо-



мненно,  $\langle D_1^2 \rangle = 1$ . (За единицу расстояния всюду будет выбираться один шаг, и поэтому я в дальнейшем не буду писать единиц длины).

Ожидаемая величина  $D_N^2$  для  $N > 1$  может быть получена из  $D_{N-1}$ . Если после  $(N-1)$  шагов мы оказались на расстоянии  $D_{N-1}$ , то еще один шаг даст *либо*  $D_N = D_{N-1} + 1$ , *либо*  $D_N = D_{N-1} - 1$ . Или для квадратов

$$D_N^2 = \begin{cases} D_{N-1}^2 + 2D_{N-1} + 1, \\ \text{либо} \\ D_{N-1}^2 - 2D_{N-1} + 1. \end{cases} \quad (6.7)$$

Если процесс повторяется большое число раз, то мы ожидаем, что каждая из этих возможностей осуществляется с вероятностью  $1/2$ , так что средняя ожидаемая величина будет просто средним арифметическим этих значений, т.е. ожидаемая величина  $D_N^2$  будет просто  $D_{N-1}^2 + 1$ . Но какова величина  $D_{N-1}^2$ , вернее, какого значения ее мы ожидаем? Просто, по определению, ясно, что это должно быть «среднее ожидаемое значение»  $\langle D_{N-1}^2 \rangle$ , так что

$$\langle D_N^2 \rangle = \langle D_{N-1}^2 \rangle + 1. \quad (6.8)$$

Если теперь вспомнить, что  $\langle D_1^2 \rangle = 1$ , то получается очень простой результат:

$$\langle D_N^2 \rangle = N. \quad (6.9)$$

Отклонение от начального положения можно характеризовать величиной типа расстояния (а не квадрата расстояния); для этого нужно просто извлечь квадратный корень из  $D <^2_N>$  и получить так называемое среднее квадратичное расстояние  $D_{CK}$ :

$$D_{CK} = \sqrt{\langle D^2 \rangle} = \sqrt{N}. \quad (6.10)$$

Мы уже говорили, что случайные блуждания очень похожи на опыт с подбрасыванием монет, с которого мы начали эту главу. Если представить себе, что каждое продвижение вперед или назад обусловливается выпадением «орла» или «решки», то  $D_N$  будет просто равно  $N_O - N_P$ , т.е. разности числа выпадений «орла» и «решки». Или поскольку  $N_O + N_P = N$  (где  $N$  — полное число подбрасываний), то  $D_N = 2N_O - N$ . Вспомните, что раньше мы уже получали выражение для ожидаемого распределения величины  $N_O$  [она обозначалась тогда через  $k$ ; см. уравнение (6.5)]. Ну а поскольку  $N$  — просто постоянная, то теперь такое же распределение получилось и для  $D$ . (Выпадение каждого «орла» означает невыпадение «решки», поэтому в связи между  $N_O$  и  $D$  появляется множитель 2.) Таким образом, на фиг. 6.2 график представляет одновременно и распределение расстояний, на которые мы можем уйти за 30 случайных шагов ( $k = 15$  соответствует  $D = 0$ , а  $k = 16$  соответствует  $D = 2$  и т.д.).

Отклонение  $N_o$  от ожидаемой величины  $N/2$  будет равно

$$N_o - \frac{N}{2} = \frac{D}{2}. \quad (6.11)$$

откуда для среднего квадратичного отклонения получаем

$$\left(N_o - \frac{N}{2}\right)_{CK} = \frac{1}{2}\sqrt{N}. \quad (6.12)$$

Вспомним теперь наш результат для  $D_{CK}$ . Мы ожидаем, что среднее расстояние, пройденное за 30 шагов, должно быть равно  $\sqrt{30} = 5,5$ , откуда среднее отклонение  $k$  от 15 должно быть  $5,5 : 2 \approx 2,8$ . Заметьте, что средняя полуширина нашей кривой на фиг. 6.2 (т.е. полуширина «колокола» где-то посередине) как раз приблизительно равна 3, что согласуется с этим результатом.

Теперь мы способны рассмотреть вопрос, которого избегали до сих пор. Как узнать, «честна» ли наша монета? Сейчас мы можем, по крайней мере частично, ответить на него. Если монета «честная», то мы ожидаем, что в половине случаев выпадет «орел», т.е.

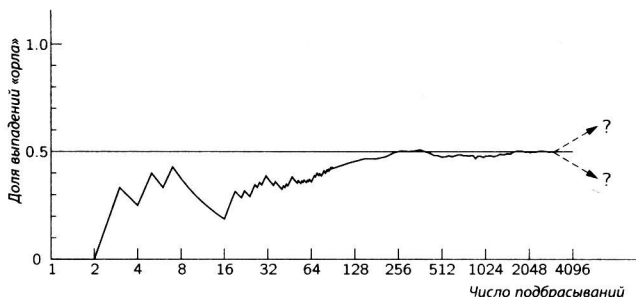
$$\frac{\langle N_o \rangle}{N} = 0,5. \quad (6.13)$$

Одновременно ожидается, что действительное число выпадений «орла» должно отличаться от  $N/2$  на величину порядка  $N/2$ , или, если говорить о доле отклонения, она равна

$$\frac{1}{N} \frac{\sqrt{N}}{2} = \frac{1}{2\sqrt{N}},$$

т.е. чем больше  $N$ , тем ближе к половине отношение  $N_o/N$ .

На фиг. 6.6 отложены числа  $N_o/N$  для тех подбрасываний монеты, о которых мы говорили раньше.



**Фиг. 6.6.** Доля выпадений «орла» в некоторой частной последовательности  $N$  подбрасываний монеты.

Как видите, при увеличении числа  $N$  кривая все ближе и ближе подходит к 0,5. Но, к сожалению, нет никаких *гарантий*, что для каждой данной серии или комбинации серий наблюдаемое отклонение будет *близко к ожидаемому* отклонению. Всегда есть конечная вероятность, что произойдет большая флуктуация — появление большого числа выпадений «орла» или «решки», — которая даст произвольно большое отклонение. Единственное, что можно сказать, — это *если* отклонения близки к ожидаемому  $1/2 \sqrt{N}$

(скажем, со множителем 2 или 3), то нет оснований считать монету «поддельной» (или что партнер плутует).

Мы не рассматривали еще случаи, когда для монеты или какого-то другого объекта испытания, подобного монете (в том смысле, что возможны два или несколько достоверно не предсказуемых исхода наблюдения, например камень, который может упасть только на какую-то из двух сторон), имеется достаточно оснований полагать, что вероятности разных исходов не равны. Мы определили вероятность  $P(O)$  как отношение  $\langle N_o \rangle / N$ . Но что принять за величину  $\langle N_o \rangle$ ? Каким образом можно узнать, что *ожидается*? Во многих случаях самое лучшее, что можно сделать, это подсчитать число выпадений «орла» в большой серии испытаний и взять  $\langle N_o \rangle = N_o$  (наблюденное). (Как можно ожидать чего-то еще?) При этом, однако, нужно понимать, что различные наблюдатели и различные серии испытаний могут дать другое значение  $P(O)$ , отличное от нашего. Следует *ожидать*, однако, что все эти различные ответы не будут расходиться больше чем на  $1/2 \sqrt{N}$  [если  $P(O)$  близко к половине], Физики-экспериментаторы обычно говорят, что «экспериментально найденная» вероятность имеет «ошибку», и записывают это в виде

$$P(O) = \frac{N_o}{N} \pm \frac{1}{2\sqrt{N}}. \quad (6.14)$$

При такой записи подразумевается, что существует некая «истинная» вероятность, которую в принципе *можно подсчитать*, но что различные флуктуации приводят к ошибке при экспериментальном ее определении. Однако нет возможности сделать эти рассуждения логически согласованными. Лучше все-таки, чтобы вы поняли, что вероятность в каком-то смысле — вещь субъективная, что она всегда основывается на какой-то неопределенности наших познаний и величина ее колеблется при их изменении.

#### § 4. Распределение вероятностей

Давайте вернемся к проблеме случайных блужданий, но теперь уже с некоторым изменением. Пусть в дополнение к случайному выбору *направления* шага (+ или —) некоторым непредсказуемым образом меняется также и его *длина*, причем требуется выполнение одного-единственного условия, чтобы длина шага *в среднем* была равна единице. Эта задача уже больше похожа на тепловое движение молекул в газе. Обозначим длину шага через  $S$ , которая, вообще говоря, может быть любой, но наиболее часто будет принимать значения где-то «вблизи» единицы. Для большей определенности давайте положим  $\langle S^2 \rangle = 1$ , или, что эквивалентно,  $S_{СК} = 1$ . Вывод выражения для

$\langle D^2 \rangle$  при этом останется тем же, за исключением того, что уравнение (6.8) изменится теперь следующим образом:

$$\langle D_N^2 \rangle = \langle D_{N-1}^2 \rangle + \langle S^2 \rangle = \langle D_{N-1}^2 \rangle + 1. \quad (6.15)$$

Так что, как и прежде,

$$\langle D_N^2 \rangle = N. \quad (6.16)$$

Каково же в этом случае будет распределение расстояний! Какова, например, вероятность того, что после 30 шагов  $D$  окажется равным нулю? Вероятность этого равна нулю! Вообще вероятность *любой заданной* величины  $D$  равна нулю. Действительно, совершенно невероятно, чтобы сумма всех шагов назад (при произвольной длине каждого из них) в точности скомпенсировалась шагами вперед. В этом случае мы уже не можем построить график типа изображенного на фиг. 6.2.

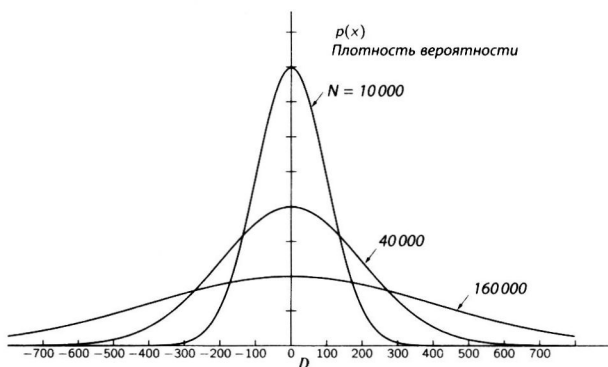
Если же, однако, не требовать, чтобы  $D$  было в точности равно, скажем, нулю, или единице, или двум, а вместо этого говорить о вероятности получения  $D$  где-то *вблизи* нуля, или единицы, или двух, то при этом мы можем нарисовать график, подобный приведенному на фиг. 6.2. Назовем  $P(x, \Delta x)$  вероятностью того, что  $D$  будет находиться где-то внутри интервала  $\Delta x$  в окрестности величины  $x$  (скажем, где-то между  $x$  и  $x + \Delta x$ ). Если  $\Delta x$  достаточно мало, то вероятность того, что  $D$  попадет в этот интервал, должна быть про-

порциональна его ширине, т.е.  $\Delta x$ . Поэтому мы можем утверждать, что

$$P(x, \Delta x) = p(x)\Delta x. \quad (6.17)$$

Функция  $p(x)$  называется *плотностью вероятности*.

Вид кривой  $p(x)$  зависит как от числа шагов  $N$ , так и от распределения шагов по длинам (т.е. от того, какую долю составляют шаги данной длины). К сожалению, я не могу здесь заниматься доказательством этого, а только скажу, что при достаточно большом числе шагов  $N$  плотность  $p(x)$  *одинакова* для всех разумных распределений шагов по длинам и зависит лишь от самого  $N$ . На фиг. 6.7 показаны три графика  $p(x)$  для различных  $N$ .

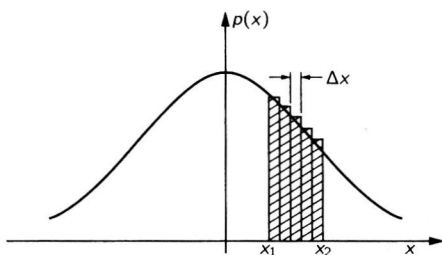


**Фиг. 6.7.** Плотность вероятности оказаться при случайном блуждании через  $N$  шагов на расстоянии  $D$ .  $D$  измеряется в единицах средней квадратичной длины шага.



Заметьте, что «полуширины» этих кривых, как это и должно быть по нашим предыдущим расчетам, приблизительно равны  $\sqrt{N}$ .

Вы, вероятно, заметили также, что величина  $p(x)$  вблизи нуля обратно пропорциональна  $\sqrt{N}$ . Это происходит потому, что все кривые по форме очень похожи, только одни «размазаны» больше, а другие — меньше, и, кроме того, площади, ограниченные каждой кривой и осью  $x$ , должны быть равны. Действительно, ведь  $p(x)\Delta x$ ; это вероятность того, что  $D$  находится где-то внутри интервала  $\Delta x$  ( $\Delta x$  мало). Как определить вероятность того, что  $D$  находится где-то между  $x_1$  и  $x_2$ ? Для этого разобьем интервал между  $x_1$  и  $x_2$  на узкие полоски шириной  $\Delta x$  (фиг. 6.8) и вычислим сумму членов  $p(x)\Delta x$  для каждой такой полоски.



**Фиг. 6.8.** Вероятность [заштрихованная область под кривой  $p(x)$ ] того, что при случайном блуждании пройденное расстояние  $D$  окажется между  $x_1$  и  $x_2$ .

Геометрически эта вероятность [запишем ее в виде  $P(x_1 < D < x_2)$ ] равна площади заштрихо-

ванной области на фиг. 6.8. При этом чем уже будут наши полоски, тем точнее результат. Поэтому можно записать

$$P(x_1 < D < x_2) = \sum p(x)\Delta x = \int_{x_1}^{x_2} p(x)dx. \quad (6.18)$$

Площадь же ограничения всей кривой просто равна вероятности того, что  $D$  принимает *какое-то* значение между  $-\infty$  и  $+\infty$ . Ясно, что она должна быть равна единице, т.е.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1. \quad (6.19)$$

Ну а поскольку ширина кривых на фиг. 6.7 пропорциональна  $\sqrt{N}$ , то, чтобы сохранить ту же площадь, их высота должна быть пропорциональна  $1/\sqrt{N}$ .

Плотность вероятности, которую мы только что описали, встречается наиболее часто. Она известна также под названием *нормальной*, или *гауссовой*, плотности вероятности и записывается в виде

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2}, \quad (6.20)$$

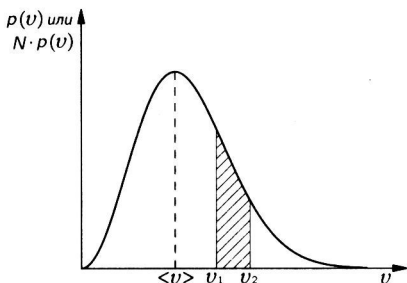
причем величина  $\sigma$  называется *стандартным отклонением*.

В нашем случае  $\sigma = \sqrt{N}$  или  $\sqrt{N} S_{CK}$ , если средняя квадратичная длина шага отлична от единицы.

Мы уже говорили о том, что движения молекул или каких-то других частиц в газе похожи на случайные блуждания. Представьте себе, что мы открыли в комнате пузырек с духами или каким-то другим органическим веществом. Тотчас же молекулы его начнут испаряться в воздух. Если в комнате есть какие-то воздушные течения, скажем циркуляция воздуха, то они будут переносить с собой пары этого вещества. Но даже *в совершенно спокойном воздухе* молекулы будут распространяться, пока не проникнут во все уголки комнаты. Это можно определить по запаху или цвету. Если нам известен средний размер «шага» и число шагов в секунду, то можно подсчитать вероятность обнаружения одной или нескольких молекул вещества на некотором расстоянии от пузырька через какой-то промежуток времени. С течением времени число шагов возрастает и газ «расползается» по комнате, подобно нашим кривым на фиг. 6.7. Длина шагов и их частота, как вы узнаете впоследствии, связаны с температурой и давлением воздуха в комнате.

Вы знаете, что давление газа вызывается тем, что молекулы его бомбардируют стенки сосуда. Позднее, когда мы подойдем к количественному описанию этого явления, нам понадобится знать, с какой скоростью движутся молекулы, ударяясь о стенку, поскольку сила их ударов зависит от скорости. Однако говорить о какой-то *определен-*

ной скорости молекул совершенно невозможно. В этом случае необходимо использовать вероятностное описание. Молекула может иметь любую скорость, но некоторые скорости предпочтительнее других. Все происходящее в газе можно описать, сказав, что вероятность того, что данная молекула движется с какой-то скоростью между  $v$  и  $v + \Delta v$ , будет равна  $p(v) \Delta v$ , где  $p(v)$  — плотность вероятности, которая зависит от скорости  $v$ . Позднее я расскажу, как Максвелл, используя общие понятия и идеи теории вероятности, нашел математическое выражение для функции  $p(v)$ \*. Примерный вид функции  $p(v)$  показан на фиг. 6.9.



**Фиг. 6.9.** Распределение молекул газа по скоростям.

Скорость может иметь любую величину, однако больше шансов за то, что она окажется

---

\* Максвелл получил выражение  $p(v) = C v^2 e^{-av^2}$ , где  $a$  — некоторая связанная с температурой постоянная, а  $C$  выбирается таким образом, чтобы полная вероятность была равна единице.

где-то в окрестности наиболее вероятного или ожидаемого значения  $\langle v \rangle$ .

О кривой, показанной на фиг. 6.9, часто говорят в несколько ином смысле. Если мы возьмем газ, заключенный в каком-то сосуде (скажем, объемом 1 л), то окажется, что в нем имеется огромное количество молекул ( $N \approx 10^{22}$ ). Поскольку  $p(v) \Delta v$  — вероятность того, что первая попавшаяся молекула будет лететь со скоростью, находящейся в интервале  $\Delta v$ , то, по определению, *ожидаемое* число молекул  $\langle \Delta N \rangle$  со скоростью, находящейся в этом же интервале, будет равно

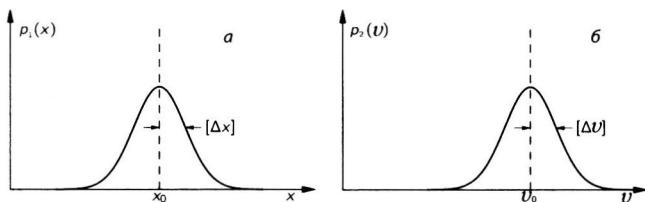
$$\langle \Delta N \rangle = N p(v) \Delta v. \quad (6.21)$$

Поэтому  $Np(v)$  можно назвать «распределением молекул по скоростям». Площадь под кривой между двумя значениями скоростей  $v_1$  и  $v_2$  [заштрихованная область на фиг. 6.9 для кривой  $Np(v)$ ] представляет ожидаемое число молекул со скоростями между  $v_1$  и  $v_2$ . Но в газе, который содержит обычно огромное число молекул, отклонения от ожидаемого значения будут очень малы (порядка  $1/\sqrt{N}$ ), поэтому часто мы выбрасываем слово «ожидаемое» и говорим просто: «Число молекул со скоростями между  $v_1$  и  $v_2$  равно площади заштрихованного участка». Однако нужно все-таки помнить, что речь в таких случаях всегда идет о *вероятном* числе.

## § 5. Принцип неопределенности

Понятия вероятности оказались очень полезны при описании поведения газа, состоящего из огромного количества молекул. Немыслимо же в самом деле пытаться определить положение и скорость каждой из  $10^{22}$  молекул! Когда впервые теория вероятности была применена к таким явлениям, то это рассматривалось просто как удобный способ работы в столь сложной обстановке. Однако теперь мы полагаем, что вероятность *существенно необходима* для описания различных атомных процессов. Согласно квантовой механике, этой математической теории малых частичек, при *определении* положения частички и ее скорости всегда существует некоторая неопределенность. В лучшем случае мы можем только сказать, что существует какая-то вероятность того, что частица находится вблизи точки  $x$ .

Для описания местоположения частицы можно ввести плотность вероятности  $p_1(x)$ , так что  $p_1(x)\Delta x$  будет вероятностью того, что частица находится где-то между  $x$  и  $x + \Delta x$ . Если положение частицы установлено достаточно хорошо, то примерный вид функции  $p_1(x)$  может иллюстрировать график, приведенный на фиг. 6.10, *а*. Точно такое же положение и со скоростью частицы: она тоже неизвестна нам точно. С некоторой вероятностью  $p(v)\Delta v$  частица может двигаться со скоростью, находящейся в интервале между  $v$  и  $v + \Delta v$ .



**Фиг. 6.10.** Плотности вероятности координаты (а) и скорости (б) частицы.

Один из основных результатов квантовой механики состоит в том, что эти две плотности  $p_1(x)$  и  $p_2(v)$  не могут быть выбраны независимо в том смысле, что они обе не могут быть сколь угодно узкими. Если мы возьмем «полуширины» кривых  $p_1(x)$  и  $p_2(v)$  и обозначим их соответственно  $[\Delta x]$  и  $[\Delta v]$  (см. фиг. 6.10), то природа требует, чтобы *произведение* этих двух полуширин было не меньше величины  $\hbar/m$ , где  $m$  — масса частицы, а  $\hbar$  — некоторая фундаментальная физическая постоянная, называемая *постоянной Планка*. Это соотношение записывается следующим образом:

$$[\Delta x] [\Delta v] \geq \frac{\hbar}{m}. \quad (6.22)$$

и называется *принципом неопределенности Гейзенберга*.

Чтобы это соотношение выполнялось, частица должна себя вести очень курьезно. Вы видите, что правая часть соотношения (6.22) постоянна, а это означает, что если мы попытаемся «прико-

лоть» частицу в каком-то определенном месте, то эта попытка окончится тем, что мы не сможем угадать, куда она летит и с какой скоростью. Точно также если мы попытаемся заставить частицу двигаться очень медленно или с какой-то *определенной* скоростью, то она будет «расплываться» и мы не сможем точно указать, где она находится.

Принцип неопределенности выражает ту неясность, которая должна существовать при любой попытке описания природы. Наиболее точное и полное описание природы должно быть только вероятностным. Однако некоторым физикам такой способ описания приходится не по душе. Им кажется, что о *реальном* поведении частицы можно говорить только, когда одновременно заданы импульсы и координаты. В свое время на заре развития квантовой механики эта проблема очень сильно волновала Эйнштейна. Он часто качал головой и говорил: «Но ведь не гадают же Господь Бог “орел—решка”, чтобы решить, куда должен двигаться электрон!» Этот вопрос беспокоил его в течение очень долгого времени, и до конца своих дней он, по-видимому, так и не смог примириться с тем фактом, что вероятностное описание природы — это максимум того, на что мы пока способны. Есть физики, которые интуитивно чувствуют, что наш мир можно описать как-то по-другому, что можно исключить эти неопределенности в поведении частиц. Они продолжают

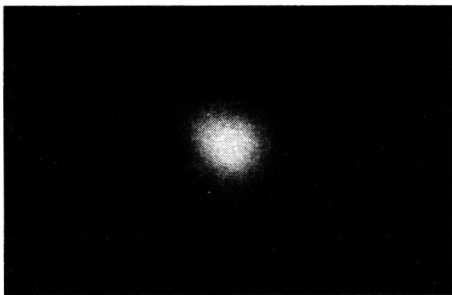


работать над этой проблемой, но до сих пор ни один из них не добился сколько-нибудь существенного результата.

Эта присущая миру неопределенность в определении положения частицы является наиболее важной чертой описания структуры атомов. В атоме водорода, например, который состоит из одного протона, образующего ядро, и электрона, находящегося где-то вне его, неопределенность в местонахождении электрона такая же, как и размеры самого атома! Мы не можем поэтому с уверенностью сказать, где, в какой части атома находится наш электрон, и уж, конечно, не может быть и речи ни о каких «орбитах». С уверенностью можно говорить только о *вероятности*  $p(r)\Delta v$  обнаружить электрон в элементе объема  $\Delta v$  на расстоянии  $r$  от протона. Квантовая механика позволяет в этом случае вычислять плотности вероятности  $p(r)$ , которая для невозмущенного атома водорода равна  $Ae^{-r^2/a^2}$ .

Это — колоколообразная функция наподобие изображенной на фиг. 6.8, причем число  $a$  представляет собой характерную величину радиуса, после которого функция очень быстро убывает. Несмотря на то что существует вероятность (хотя и небольшая) обнаружить электрон на большем, чем  $a$ , расстоянии от ядра, мы называем эту величину «радиусом атома». Она равна приблизительно  $10^{-10}$  м.

Если вы хотите как-то представить себе атом водорода, то вообразите этакое «облако», плотность которого пропорциональна плотности вероятности. Пример такого облака показан на фиг. 6.11.



**Фиг. 6.11.** *Воображаемый атом водорода.*

*Плотность («белизна») облачка пропорциональна плотности вероятности обнаружения электрона.*

Такая наглядная картинка, пожалуй, наиболее близка к истине, хотя тут же нужно помнить, что это *не реальное* «электронное облако», а только «облако вероятностей». Где-то внутри него находится электрон, но природа позволяет нам только гадать, где же именно он находится.

В своем стремлении узнать о природе вещей как можно больше современная физика обнаружила, что существуют вещи, познать которые точно ей никогда не удастся. Многому из наших знаний суждено навсегда остаться неопределенным. Нам дано знать *только* вероятности.

## Глава 7

# ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ

---

*Движение планет. Законы Кеплера.  
Развитие динамики. Ньютонов закон  
тяготения. Всемирное тяготение.  
Опыт Кавендиша. Что такое тяго-  
тение? Тяготение и относительность*

---

### § 1. Движение планет

В этой главе речь пойдет об одном из самых далеко идущих обобщений, сделанных когда-либо человеческим разумом. Мы заслуженно восхищаемся умом человека, но неплохо было бы постоять некоторое время в благоговении и перед *природой*, полностью бесприкословно подчиняющейся такому изящному и такому простому закону — закону тяготения. В чем же заключается этот закон? Каждый объект Вселенной притягивается к любому другому объекту с силой, пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Математическая запись этого утверждения такова:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}. \quad (7.1)$$

Если к этому добавить, что любое тело реагирует на приложенную к нему силу ускорением в направлении этой силы, по величине обратно пропорциональным массе тела, то способному математику этих сведений достаточно для вывода всех дальнейших следствий.

Но поскольку, как мы предполагаем, вы еще не столь талантливы, вооружим вас не только этими двумя аксиомами. Давайте вместе разберем следствия из них. Мы изложим вкратце историю открытия закона тяготения, остановимся на некоторых выводах из него и на его влиянии на историю, на загадках этого закона и на уточнении его Эйнштейном; мы хотим еще обсудить связь закона тяготения с другими законами физики. Всего этого в одну главу не уложишь, но в надлежащих местах других глав мы снова будем возвращаться к этому.

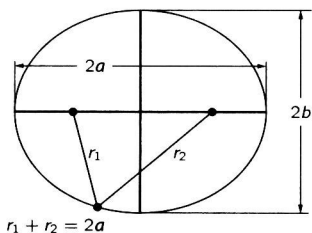
История начинается с древних; наши предки наблюдали движение планет среди звезд и в конце концов поняли, что планеты движутся вокруг Солнца — факт, заново открытый позже Коперником. Немного больше труда потребовалось, чтобы открыть, *как* именно они вращаются. В начале XV столетия шли большие дебаты о том, действительно ли планеты обращаются вокруг Солнца или нет. У Тихо Браге на этот счет было свое представление, далекое от того, что думали древние: мысль его состояла в том, что все спо-

ры о природе движения планет разрешатся, если достаточно точно измерить положение планет на небе. Если измерения точно установят, как движутся планеты, то не исключено, что из двух точек зрения удастся отобрать одну. Это была неслыханная идея — чтобы открыть что-то, лучше-де проделать тщательные опыты, чем приводить глубокие философские доказательства. Следуя ей, Тихо Браге многие годы изучал положения планет в своей обсерватории на острове Фюн близ Копенгагена. Он составил объемистые таблицы, впоследствии, после смерти Тихо, изученные математиком Кеплером. Из его данных Кеплер и извлек замечательные, очень красивые и простые законы, управляющие движением планет.

## § 2. Законы Кеплера

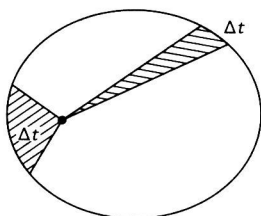
Прежде всего, Кеплер понял, что все планеты движутся вокруг Солнца по кривой, называемой *эллипсом*, причем Солнце находится в фокусе эллипса. Эллипс — это не совсем овал, это особым образом точно определяемая кривая. Получить такую кривую можно, воткнув в фокусы по булавке, к которым привязана нить, натянутая карандашом. Выражаясь математически, это — геометрическое место точек, сумма расстояний которых от двух заданных точек (фокусов) по-

стоянна. Или, если угодно, это — окружность, видимая под углом к своей плоскости (фиг. 7.1).



**Фиг. 7.1.** Эллипс.

Другое наблюдение Кеплера состояло в том, что планеты движутся не с постоянной скоростью: поблизости от Солнца — быстрее, а удаляясь — медленнее. Более точно: пусть планета наблюдается в два последовательных момента времени, скажем на протяжении недели, и к каждому положению планеты проведен радиус-вектор\*. Дуга орбиты, пройденная планетой за неделю, и два радиус-вектора ограничивают некоторую площадь, заштрихованную на фиг. 7.2.



**Фиг. 7.2.** Кеплеров закон площадей.

---

\* Отрезок, соединяющий Солнце с точкой орбиты.

Если такие же наблюдения в течение недели проделать в другое время, когда планета движется по дальнему участку орбиты (т.е. медленнее), то построенная таким же способом фигура окажется по площади равной прежней. Итак, в соответствии со вторым законом орбитальная скорость любой планеты такова, что радиус «заметает» равные площади в равные интервалы времени.

Третий закон был открыт Кеплером гораздо позже; он другого рода, нежели первые два: он уже касается не одной планеты, а связывает между собой разные планеты. Закон утверждает, что если сравнить между собой период обращения и размеры орбиты двух планет, то периоды пропорциональны полуторной степени размеров орбит. Здесь период — это время, нужное планете для того, чтобы обойти всю орбиту; размер же измеряется длиной наибольшего диаметра эллиптической орбиты, ее большой оси. Считая орбиты кругами (чем они почти и являются), можно сказать проще: время одного оборота по кругу пропорционально его диаметру (или радиусу) в степени  $3/2$ . Итак, три закона Кеплера таковы:

1. Все планеты движутся вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.
2. Радиус-вектор от Солнца до планеты «заметает» равные площади в равные интервалы времени.

3. Квадраты времен обращения двух планет пропорциональны кубам больших полуосей их орбит:  $T^2 \sim a^3$ .

### § 3. Развитие динамики

В то время, когда Кеплер открывал эти законы, Галилей изучал законы движения. Он пытался выяснить, что заставляет планеты двигаться. (В те дни одна из предлагавшихся теорий утверждала: планеты движутся потому, что за ними летят невидимые ангелы, которые взмахами своих крыльев гонят планеты вперед. Ныне эта теория, как вы вскоре увидите, несколько видоизменена! По-видимому, чтобы заставить планеты вращаться, невидимые ангелы обязаны витать во всевозможных направлениях и обходиться без крыльев. В остальном эти теории схожи!) И Галилей открыл одно знаменательное свойство движения, достаточное, чтобы понять эти законы. Это — принцип *инерции*: если при движении тела его ничто не касается, ничто не возмущает, то оно может лететь вечно с постоянной скоростью и по прямой. (А почему это так? Мы этого не знаем, но так уж оно повелось.)

Ньютон затем видоизменил эту мысль, говоря, что единственный способ изменить движение тела — это применить *силу*. Если тело разгоня-



ется, значит сила была приложена *в направлении движения*. Если тело повернуло *в сторону*, то сила была приложена *сбоку*. Если, например, привязать камень к бечевке и вертеть им по кругу, то, чтобы удержать его на окружности, нужна сила. Мы должны все время *натягивать* бечевку. Закон состоит в следующем: *ускорение, производимое силой, обратно пропорционально массе*. Или иначе: *сила пропорциональна массе и ускорению*. Чем массивнее тело, тем бóльшая сила необходима, чтобы создать нужное ускорение. (Массу можно измерить, привязав к веревке другой камень и вертя им по тому же кругу с той же скоростью. Так можно обнаружить, что массивным телам нужна бóльшая сила.) Из этих рассуждений последовала блестящая мысль: чтобы удержать планету на ее орбите, никакой *касательной* силы не нужно (ангелам нет нужды летать по касательной), потому что планета и так будет лететь в нужном направлении. Если бы ничего ей не мешало, она бы удалилась по *прямой линии*. Но истинное движение уклоняется от этой прямой и отклоняется как раз поперек движения, а не по движению. Иными словами, благодаря принципу инерции сила, потребная для управления движением планет вокруг Солнца, это не сила, вращающая их *вокруг* Солнца, а сила, *направленная* к Солнцу (ну а раз сила направлена к Солнцу, то, бесспорно, это и есть тот самый ангел!).

## § 4. Ньютонов закон тяготения

Лучше других поняв природу движения, Ньютон прикинул, что именно *Солнце* может явиться источником, штаб-квартирой сил, управляющих движением планет. Он убедился (вскоре, быть может, убедимся в этом и мы), что «заметание» равных площадей в равные интервалы времени есть верный знак того, что все отклонения от прямой в точности радиальны, или что закон площадей есть прямое следствие того, что все силы направлены точно к *Солнцу*.

Кроме того, из анализа третьего закона Кеплера можно вывести, что чем дальше от Солнца планета, тем слабее сила. Из сравнения двух планет на разных расстояниях следует, что силы обратно пропорциональны квадратам относительных расстояний. Сочетая оба закона, Ньютон пришел к заключению, что должна существовать сила, обратная квадрату расстояния и направленная по прямой между Солнцем и планетой.

Будучи человеком, склонным к обобщениям, Ньютон, конечно, предположил, что эта связь применима не только к Солнцу, удерживающему планеты, но что она носит более общий характер. Уже было известно, к примеру, что вокруг Юпитера обращаются луны, подобно тому как Луна ходит вокруг Земли, и Ньютону казалось естественным, что и планеты силой держат свои луны возле себя. Тогда он уже знал о силе, удер-

живающей нас на Земле, и предположил, что эта сила *всеобщая* и что *все притягивается ко всему*.

Тогда он спросил себя: притягивает ли Земля людей так же, как Луну («так же» значит обратно пропорционально квадрату расстояния). Если тело у поверхности Земли падает в первую секунду (из состояния покоя) на 4,9 м, то на сколько падает Луна? Можно возразить, что Луна вообще не падает. Но если бы на Луну не действовала сила, она бы унеслась по прямой линии, а на самом деле она обращается по круговой орбите; следовательно, она *падает* с того места, где она должна была бы быть, если бы сила на нее не действовала. Зная радиус орбиты Луны (около 384 000 км) и время ее оборота вокруг Земли (около 29 дней), можно подсчитать, сколько она проходит за 1 сек и затем на сколько за это время она падает\*. Оказывается, что это расстояние примерно равно 1,36 мм. Это хорошо укладывается в закон обратных квадратов, потому что радиус Земли 6370 км, и если на этом расстоянии тела, падая, проходят в первую секунду 4,9 м, то на расстоянии в 384 тыс. км, т.е. в 60 раз дальше от центра Земли, они должны падать на 1/3600 от 4,9 м, или как раз на 1,36 мм. Желая подтвердить свою теорию тяготения подобными расчетами, Ньютон их аккуратно проделал и... получил

---

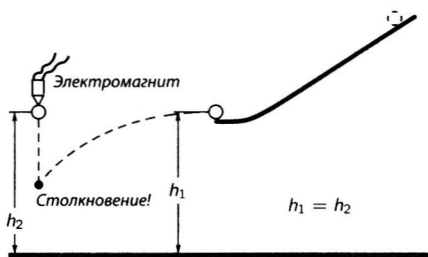
\* Иначе говоря, на сколько окружность (орбита Луны) отходит от касательной к ней на протяжении пути, проходимого Луной за 1 сек.

сильнейшее несовпадение цифр. Он счел, что теория противоречит фактам, и не опубликовал ее. Шестью годами позже новые измерения радиуса Земли показали, что принятое в ту пору астрономами расстояние до Луны было неверным. Услышав об этом, Ньютон провел новый расчет с исправленными цифрами и получил уже превосходное совпадение.

Мысль, что Луна «падает», несколько смущает; почему же она тогда *не приближается*? Эта мысль настолько интересна, что заслуживает дальнейшего пояснения: Луна «падает» в том смысле, что *отклоняется от прямой линии, по которой она бы двигалась, не будь больше никаких сил*.

Рассмотрим другой, уже чисто земной пример. Тело, выпущенное из рук у земной поверхности, упадет в первую секунду на 4,9 м. Тело, брошенное *горизонтально*, также падает на 4,9 м.

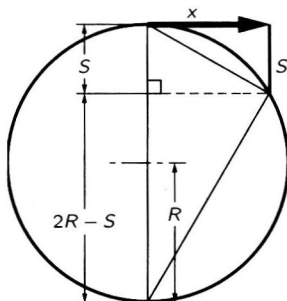
На фиг. 7.3 показан прибор, демонстрирующий это явление.



**Фиг. 7.3.** Прибор для демонстрации независимости вертикальных и горизонтальных движений.

Из горизонтального желоба выскакивает и летит вперед шарик. С той же высоты вертикально падает вниз другой шарик (имеется электрическая схема, выпускающая второй шар как раз в тот момент, когда первый соскальзывает с желоба). Они сталкиваются в воздухе, т.е. это значит, что они за одинаковое время снижаются одинаково. Пуля, выпущенная горизонтально, может пройти за 1 сек даже полкилометра, а вниз за это время она упадет на 4,9 м. Что случится, если пуля будет вылетать из ствола все быстрее? Не забудьте, что поверхность Земли кривая. Пуля может вылететь с такой скоростью, что, упав на 4,9 м, она все равно останется по отношению к Земле на первоначальной высоте. Может ли такое быть? Да; хотя она падает, но и Земля искривляется, вот и получается падение «вокруг» Земли. Надо только узнать, на каком расстоянии поверхность Земли окажется на 4,9 м ниже горизонта. На фиг. 7.4 изображена Земля с ее радиусом (6370 км) и касательный прямой путь пули (в отсутствие сил). Остается вспомнить одну из занятных геометрических теорем о том, что длина полухорды, перпендикулярной диаметру, равна среднему геометрическому между длинами отрезков диаметра. Значит, расстояние, пройденное пулей, есть среднее пропорциональное между 4,9 м падения и 12 740 км диаметра Земли, т.е.

$$\sqrt{0,0049 \cdot 12\,740} \approx 7,9 \text{ км.}$$



**Фиг. 7.4.** Ускорение к центру на круговом пути.

Из планиметрии  $x/s = (2R - s)/x \approx 2R/x$ , где  $R$  — радиус Земли (6370 км);  $x$  — расстояние, «пройденное горизонтально» за 1 сек;  $s$  — длина пути «падения» за 1 сек (4,9 м).

Итак, если пуля движется с быстротой 7,9 км/сек, она будет по-прежнему падать каждую секунду на 4,9 м, но никогда не приблизится к поверхности, уходящей от нее вследствие своей кривизны. Так было и с космонавтом Гагариным, который держался на одной высоте, делая примерно 8 км в секунду, т.е. 40 000 км за оборот (на самом деле чуть побольше, так как и летел он повыше).

Любое открытие нового закона полезно лишь тогда, когда из него можно извлечь больше того, что в него было вложено. Ньютон применил второй и третий законы Кеплера для того, чтобы вывести закон тяготения. Что же он предсказал? Первым предсказанием был его анализ движения Луны: движение это увязывалось с падением тел

на Земле. Вторым был ответ на вопрос, *являются ли орбиты эллипсами*. Можно точно рассчитать движение, можно доказать и то, что это эллипс\*; стало быть, никаких добавочных фактов для доказательства *первого* закона Кеплера не нужно. Так Ньютон сделал свое первое мощное предсказание.

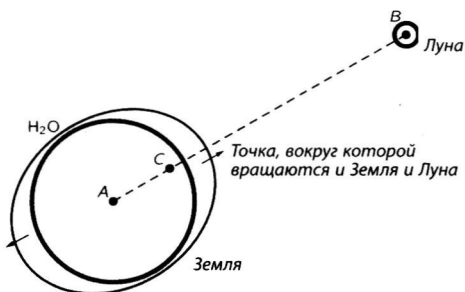
Закон тяготения объяснил многие явления, прежде непонятные. Например, притяжение Луны вызывает на Земле приливы — явление дотоле таинственное. Люди и раньше догадывались, что Луна притягивает воду под собой и получается прилив, но они не были так умны, как Ньютон, и думали, что должен быть только один прилив в сутки. Считалось, что Луна притягивает воду, вызывая прилив, но так как Земля вращается, то в каждом месте вода должна раз в сутки подниматься и опуститься. А на самом деле прилив бывает каждые 12 часов. Была и другая школа передовой мысли; по ее мнению, прилив должен быть и на противоположной стороне Земли, потому что Луна всегда отрывает сушу от воды! Обе эти теории неверны. Настоящее объяснение примерно таково: притяжение Луной суши и воды «уравновешено» в центре. Но притяжение Луной тех масс воды, которые находятся на «лунной» стороне Земли, *сильнее*, чем среднее притяжение всей Земли, а притяжение масс воды на обратной

---

\* В нашем курсе нет этого доказательства.

стороне Земли *слабее* среднего. Кроме того, вода в отличие от суши может течь. Истинная причина приливов и определяется этими двумя факторами.

Что мы понимаем под словом «уравновешено»? Что именно уравнивается? А вот что. Если Луна притягивает к себе всю Землю, то почему Земля не падает «вверх» на Луну? По той же причине, почему и Луна не падает на Землю: Земля вращается вокруг точки, которая находится внутри Земли (но не в ее центре). Не Луна вращается вокруг Земли, а обе они вращаются вокруг общего центра и обе падают на него, как показано на фиг. 7.5.



**Фиг. 7.5.** Система Земля—Луна с приливами.

Это движение вокруг общего центра и уравнивает падение каждого из двух небесных тел. Так что и Земля тоже движется не по прямой линии, а по круговой орбите. Массы воды на



дальней стороне отбрасываются из-за «центробежной силы» сильнее, чем центр Земли, который как раз уравновешен притяжением Луны. Притяжение Луны на дальней стороне слабее и «центробежная сила» больше. В итоге равновесие воды нарушается: она удаляется от центра Земли. На ближней стороне Луна притягивает сильнее, но из-за меньшей величины радиус-вектора оказывается меньше и «центробежная сила», равновесие нарушается в обратную сторону, но по-прежнему *от* центра Земли. В итоге появляются *два* приливных «горба».

## § 5. Всемирное тяготение

Что же еще можно понять, зная о существовании тяготения? Всем известно, что Земля круглая. А почему? Ну, это понятно: конечно, благодаря тяготению. Земля круглая просто потому, что между всеми телами существует притяжение, и все, из чего возникла Земля, тоже взаимно притягивалось до тех пор, пока было куда притягиваться! Точнее говоря, Земля *не совсем* шар; она ведь вращается, и центробежная сила на экваторе противодействует тяготению. Выходит, что Земля должна быть эллипсоидом, и можно даже получить правильную его форму. Итак, из закона тяготения следует, что и Солн-

це, и Луна, и Земля должны быть (приблизительно) шарами.

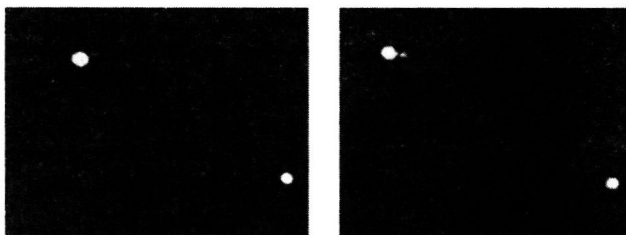
Что же еще следует из закона тяготения? Наблюдая за спутниками Юпитера, можно понять все законы их движения вокруг планеты. В этой связи стоит рассказать об одной заминке, которая вышла у закона тяготения с лунами Юпитера. Эти спутники очень подробно изучались Рёмером, и вот он заметил, что временами они нарушают расписание: то опаздывают, то приходят в назначенное место раньше времени (расписание можно составить, понаблюдав за ними достаточно долго и подсчитав по многим оборотам средний период обращения). Более того, он заметил, что опоздания случаются, когда Юпитер удален от Земли, а когда мы от Юпитера близко, то движение лун опережает расписание. Такую вещь очень трудно было уложить в закон тяготения, и ему бы угрожала безвременная кончина, не найдись другого объяснения. Ведь если закону противоречит хотя бы один случай, то закон неверен. Но причина расхождения оказалась очень естественной и красивой: дело просто в том, что необходимо какое-то время, чтобы увидеть луну на нужном месте, ведь свет от нее до нас доходит не мгновенно. Время это небольшое, когда Юпитер находится близко к Земле, но оно затягивается, когда Юпитер удалится от нее. Вот почему кажется, что луны в среднем то-

ропятся или отстают в зависимости от того, близко ли или далеко они находятся от Земли. Это явление доказало, что свет распространяется не мгновенно, и снабдило нас первой оценкой его скорости (было это в 1676 г.).

Если все планеты притягиваются друг к другу, то сила, управляющая, скажем, обращением Юпитера вокруг Солнца, это не совсем сила притяжения к Солнцу; ведь есть еще и притяжение, например, Сатурна. Оно невелико (Солнце куда больше Сатурна), но оно *есть*, и потому орбита Юпитера не может быть точным эллипсом; она чуть колеблется относительно эллиптической траектории, так что движение несколько усложняется. Были предприняты попытки проанализировать движение Юпитера, Сатурна и Урана на основе закона тяготения. Чтобы узнать, удастся ли мелкие отклонения и неправильности в движении планет полностью объяснить только на основе одного этого закона, рассчитали влияние каждой из них на остальные. Для Юпитера и Сатурна все сошло как следует, но Уран — что за чудеса! — повел себя очень странно. Он двигался не по точному эллипсу, чего, впрочем, и следовало ожидать из-за влияния притяжения Юпитера и Сатурна. Но и с учетом их притяжения движение Урана *все равно* было неправильным; таким образом, законы тяготения оказались в опасности (возможность эту нельзя было

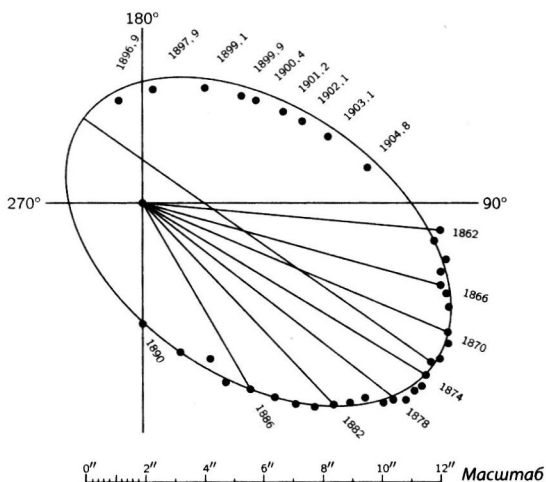
исключить). Двое ученых, Адамс и Леверье, в Англии и Франции, независимо задумались об иной возможности: нет ли там *еще одной* планеты, тусклой и невидимой, пока еще не открытой. Эта планета, назовем ее *N*, могла притягивать Уран. Они рассчитали, где эта планета должна находиться, чтобы причинить наблюдаемые возмущения пути Урана. В соответствующие обсерватории они разослали письма, в которых говорилось: «Господа, направьте свои телескопы в такое-то место — и вы увидите там новую планету». Обратят ли на вас внимание или нет, часто зависит от того, с кем вы работаете. На Леверье обратили внимание, послушались его и обнаружили планету *N*! Тогда и другая обсерватория поспешила начать наблюдения — и дело увенчалось успехом.

Это открытие показывает, что в Солнечной системе законы Ньютона абсолютно верны. Но верны ли они на расстояниях, больших, чем относительно малые расстояния до планет? Во-первых, можно поставить вопрос: притягивают ли *звезды друг друга* так же, как планеты? Положительные доказательства этого мы находим в *двойных звездах*. На фиг. 7.6 показана двойная звезда — две близкие звезды (третья звезда нужна, чтобы убедиться, что фотография не перевернута); вторая фотография сделана через несколько лет.



**Фиг. 7.6.** Система двойной звезды.

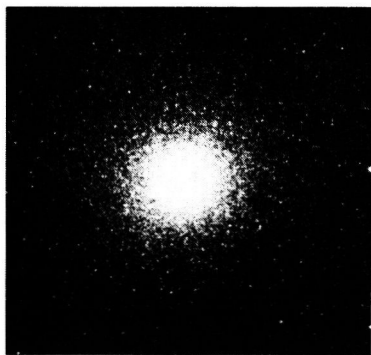
Сравнивая с «фиксированной» звездой, мы видим, что ось пары повернулась, т.е. звезды ходят одна вокруг другой. Вращаются ли они в согласии с законами Ньютона? Тщательные замеры относительной позиции двойной звезды Сириус даны на фиг. 7.7.



**Фиг. 7.7.** Орбита Сириуса В по отношению к Сириусу А.

Получается превосходный эллипс (измерения начаты в 1862 г. и доведены до 1904 г.; с тех пор был сделан еще один оборот). Все сходится с законами Ньютона, кроме того, что Сириус А получается *не в фокусе*. В чем же дело? А в том, что плоскость эллипса не совпадает с «плоскостью неба». Мы видим Сириус не под прямым углом к плоскости его орбиты, а если на эллипс посмотреть сбоку, то он не перестанет быть эллипсом, но фокус может сместиться. Так что и двойные звезды можно анализировать в согласии с требованиями закона тяготения.

Справедливость закона тяготения на больших дистанциях видна из фиг. 7.8.

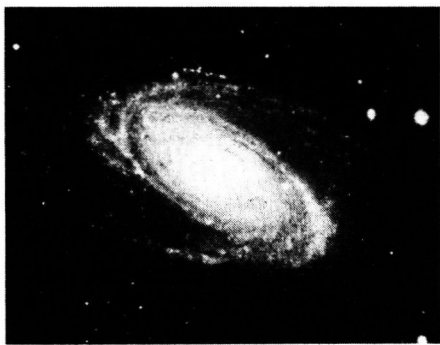


**Фиг. 7.8.** Шаровое звездное скопление.

Нужно быть лишенным воображения, чтобы не увидеть здесь работы тяготения. Здесь показано одно из красивейших небесных зрелищ —

шаровое звездное скопление. Каждая точка — это звезда. Нам кажется, будто у центра они набиты вплотную; происходит это из-за слабой чувствительности телескопа; на самом деле промежутки между звездами даже в середине очень велики, а столкновения крайне редки. Больше всего звезд в центре, а по мере удаления к краю их все меньше и меньше. Ясно, что между звездами действует притяжение, т.е. что тяготение существует и на таких гигантских расстояниях (порядка 100 000 диаметров Солнечной системы).

Но отправимся дальше и рассмотрим *всю Галактику* (фиг. 7.9).



Фиг. 7.9. Галактика.

Форма ее явственно указывает на стремление ее вещества стянуться. Конечно, доказать, что здесь действует закон обратных квадратов, нельзя; видно только, что и на таком протяжении есть

силы, удерживающие всю галактику от развала. Вы можете сказать: «Ладно, все это разумно, но почему же эта штука, галактика, уже не похожа на шар?» Да потому, что она *вертится*, что у нее есть *момент количества движения* (запас вращения); если она сожмется, ей некуда будет его девать; ей остается только сплюснуться. (Кстати, вот вам хорошая задача: как образуются рукава галактики? Чем определяется ее форма? Детального ответа на эти вопросы еще нет.) Ясно, что очертания галактики определяются тяготением, хотя сложности ее структуры пока невозможно полностью объяснить. Размеры галактик — около 50 000—100 000 световых лет (Земля находится на расстоянии  $8\frac{1}{3}$  световых минут от Солнца).

Но тяготение проявляется и на больших протяжениях. На фиг. 7.10 показаны какие-то скопления мелких пятен.

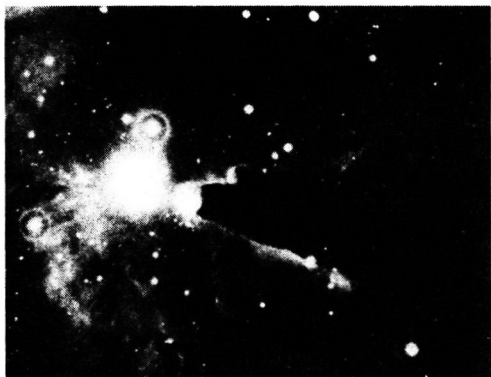


Фиг. 7.10. Облако галактик.



Это *облако галактик*, подобное звездному скоплению. Стало быть, и галактики притягиваются между собой на таких расстояниях, иначе бы они не собрались в «облако». По-видимому, и на расстояниях в *десятки миллионов* световых лет проявляется тяготение; насколько ныне известно, всюду все еще действует закон обратных квадратов.

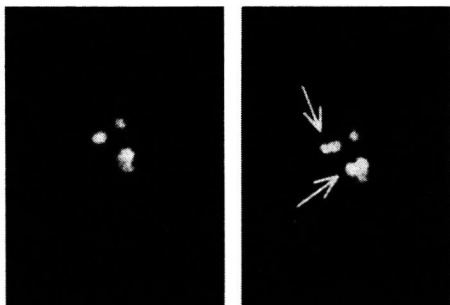
Закон тяготения ведет не только к пониманию природы туманностей, но и к некоторым идеям о происхождении звезд. В большом облаке пыли и газа, подобном изображенному на фиг. 7.11, притяжение частиц пыли соберет их в комки.



**Фиг. 7.11.** Межзвездное пылевое облако.

На фигуре видны «маленькие» черные пятнышки — быть может, начало скопления газа

и пыли, из которых благодаря их притяжению начинает возникать звезда. Приходилось ли нам когда-либо видеть рождение звезды — вопрос спорный. На фиг. 7.12 дано некоторое свидетельство того, что приходилось.

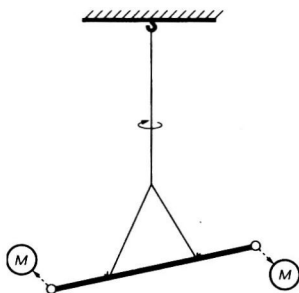


**Фиг. 7.12.** *Образование новых звезд?*

Слева показан светящийся газ, а внутри него — несколько звезд. Это снимок 1947 г. Снимок справа сделан через 7 лет; теперь видны уже два новых ярких пятна. Уж не скопился ли здесь газ, не вынудило ли его тяготение собраться в шар, достаточно большой, чтобы в нем началась звездная ядерная реакция, превращая его в звезду? Может быть, да, а может, и нет. Маловероятно, что нам повезло увидеть, как всего за семь лет звезда стала видимой, но еще менее вероятно увидеть рождение сразу двух звезд.

## § 6. Опыт Кавендиша

Итак, тяготение распространяется на огромные расстояния. Но если существует притяжение между *любыми* двумя объектами, то должна существовать и возможность измерить силу, действующую между ними. И не обязательно следить за движением звезд; почему бы не взять два шара, свинцовый и мраморный, и не проследить, как один будет двигаться к другому? Трудность столь простого по идее опыта заключается в крайней слабости, незаметности сил. Проводить его следует с исключительной осторожностью: сначала выкачать из аппарата воздух, убедиться, что нигде нет электрических зарядов и т.д., и только тогда можно попытаться измерить силу. Впервые она была измерена Кавендишем при помощи устройства, схематически изображенного на фиг. 7.13.



**Фиг. 7.13.** Упрощенная схема прибора, использованного Кавендишем для проверки закона всемирного тяготения для малых тел и измерения постоянной тяготения  $G$ .

Опыт Кавендиша доказал, что существует сила, действующая между двумя большими закрепленными свинцовыми шарами и двумя меньшими (тоже из свинца); в опыте шары размещались на концах коромысла, висящего на очень тонкой упругой нити. Измеряя, насколько закрутится нить, можно было узнать величину силы и убедиться, что она обратно пропорциональна квадрату расстояния. Таким образом точно определялся коэффициент  $G$  в формуле

$$F = G \frac{mm'}{r^2}, \quad (7.2)$$

ибо все массы и расстояния здесь известны. Вы можете возразить: «Всё это для Земли было известно и раньше». Всё, кроме *массы* Земли. Определив из этого опыта величину  $G$  и зная силу притяжения Земли, можно было косвенно определить ее массу! Опыт поэтому называют «взвешиванием Земли». Кавендиш утверждал, что он взвесил Землю, хотя он только измерил коэффициент  $G$ ; но это единственный способ определить массу Земли. Коэффициент  $G$  оказался равным

$$6,670 \cdot 10^{-11} \text{ ньютон} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

Трудно преувеличить силу влияния теории тяготения, ее величественных успехов на историю науки. Вместо царивших в прежние века

неуверенности, сомнений, неполноты знаний, бесконечных споров и парадоксов перед людьми предстал новый закон во всей своей четкости и простоте. Как важно было то, что все луны, все планеты, все звезды подчиняются столь *простому правилу!* Но еще важнее то, что человек оказался в состоянии *понять* это правило и предсказывать на будущее пути планет! Это определило быстрый, успешный рост науки в последующие годы; у людей появилась надежда, что и в других явлениях мира прячутся такие же простые закономерности.

## § 7. Что такое тяготение?

Но почему закон так прост? Что можно сказать о причине этого? До сих пор мы только описывали, *как* Земля обращается вокруг Солнца, но ни слова не сказали о том, *что заставляет ее двигаться*. Ньютон не строил догадок об этом; ему было достаточно открыть, *что* происходит, не входя в механизм происходящего. *Но и никто другой с тех пор никакого механизма не открыл.* Все физические законы отличаются в этом отношении своим абстрактным характером. Закон сохранения энергии — это теорема о величинах, которые нужно вычислить и сложить, не думая о причине этого; точно так же и великие законы

механики представляют собой количественные математические закономерности, о внутреннем механизме работы которых никаких данных нет. Почему мы можем пользоваться математикой для описания законов, не зная их причины? Никто и этого не знает. Мы продолжаем идти по этой дороге, потому что на ней все еще происходят открытия.

Предлагались многие механизмы тяготения. Интересно рассмотреть один из них, ибо до него время от времени додумывались то один, то другой ученый. Причем каждый сперва воспрянет духом и ходит осчастливленный своим «открытием», но потом начинает понимать, что тут что-то не так. Впервые это открытие произошло примерно в 1750 г. Представьте себе, что в пространстве носится в разных направлениях с огромной скоростью множество частиц, лишь слегка поглощаемых веществом. Поглощаясь, они передают свой импульс Земле. Но так как во всех направлениях их количество одинаково, то все импульсы уравниваются. Когда же неподалеку находится Солнце, то частицы, приближающиеся к Земле сквозь Солнце, частично им поглощаются, так что от Солнца их проходит меньше, чем с обратной стороны. Следовательно, Земля ощутит импульс, направленный к Солнцу, и нетрудно видеть, что он будет обратным квадрату расстояния: таков закон изменения простран-

ственного угла, под которым видимо Солнце, с увеличением расстояния. Что же плохо в этом механизме? Неверны те выводы, которые из него следуют. Появляется новая забота: Земля в своем движении вокруг Солнца будет испытывать больше столкновений с частицами спереди, чем сзади (когда бежишь навстречу дождю, лицо мокнет больше, чем затылок!). Поэтому спереди Земля получит больше импульсов, чем сзади, и должна почувствовать *сопротивление своему движению*, а это сказалось бы на замедлении ее движения по орбите. Можно подсчитать, сколько времени понадобится Земле, чтобы в результате такого сопротивления остановиться; оказывается, не так уж много; а раз Земля все же движется по своей орбите, то вся эта механика не годится. И не было предложено ни одного механизма, «объясняющего» тяготение, который бы не предсказывал добавочных, *несуществующих* явлений.

Рассмотрим еще возможную связь тяготения с прочими силами. В нынешнее время не удастся свести тяготение к другим силам. Тяготение отнюдь не проявление электричества или чего-либо подобного; этим его не объяснишь. И все же тяготение похоже на другие силы, и любопытно посмотреть, в чем. К примеру, электрическая сила между двумя заряженными телами чрезвычайно похожа на тяготение: она равна со знаком минус постоянной величине, умноженной на

величины зарядов тел, и изменяется обратно квадрату расстояния. Правда, она действует в обратную сторону, т.е. отталкивает. Но замечательно не столько это, сколько одинаковая зависимость от расстояния, входящая в оба закона. Не исключено, что тяготение и электричество связаны значительно сильнее, чем мы думаем. Было сделано много попыток объединить их; так называемая единая теория поля — лишь одна из очень изящных попыток сочетать электричество с тяготением. Но самая интересная вещь в сопоставлении их друг с другом — это *относительная величина* этих сил. Любая теория, в которой появятся обе силы, обязана будет также объяснить величину тяготения (константу  $G$ ).

Если мы измерим в естественных единицах отталкивание двух электронов (возникающее из-за того, что у них есть заряд) и их притяжение (возникающее оттого, что у них есть масса), то мы можем получить и отношение электрического отталкивания к гравитационному притяжению. Отношение это не зависит от расстояния, это фундаментальная мировая константа. Изображена она на фиг. 7.14. Гравитационное притяжение составляет  $1/4,17 \cdot 10^{42}$  от электрического отталкивания! Откуда же может возникнуть такое исполинское число в знаменателе? Оно же не случайно, ведь это не отношение объема Земли к объему тли. Мы рассматриваем два есте-



ственных свойства одного и того же предмета — электрона. Это фантастическое число есть естественная константа, и в нем таятся какие-то глубинные свойства природы. От каких же свойств оно зависит? Некоторые надеются, что если кто-нибудь однажды напишет «универсальное уравнение», то одним из его корней будет это число. Но очень трудно найти уравнение, в котором корнем было бы такое немыслимое число. Были придуманы и другие возможности; одна связывает его с возрастом Вселенной. Иначе говоря, необходимо найти в природе *еще* одно такое огромное число. При этом не собираются выражать возраст в *годах*, нет, ведь год — не «естественная» величина, она введена людьми.

$$\frac{\text{Гравитационное притяжение}}{\text{Электрическое отталкивание}} = 1/4.17 \cdot 10^{42} =$$

$$= 1 / 4,170,000,000,000,000,000$$

**Фиг. 7.14.** Относительная сила электрического и гравитационного взаимодействия двух электронов.

Как пример чего-то естественного выберем время, за какое свет проходит сквозь протон,  $10^{-24}$  сек. Разделив это число на возраст Вселен-

ной ( $2 \cdot 10^{10}$  лет  $\approx 10^{18}$  сек), получим  $10^{-42}$  — число со столькими же нулями; потому и предлагают считать постоянную всемирного тяготения связанной с возрастом всего мира. Если бы это было так, то она изменялась бы со временем: по мере старения Вселенной отношение ее лет к промежутку, в течение которого свет проносится мимо протона, возрастало бы. Возможно ли, что постоянная тяготения и впрямь меняется с годами? Ясно, что изменения столь малы, что в этом убедиться нелегко.

Вот один из способов проверить эту мысль. Зададим вопрос: что при этом должно было измениться за последние  $10^9$  лет (время появления жизни на Земле), т.е. за  $1/10$  возраста Вселенной? За это время постоянная тяготения выросла бы на 10%. Оказывается, что если рассмотреть структуру Солнца — баланс между его массой и степенью генерации излучательной энергии внутри Солнца, — то при росте тяжести на 10% Солнце оказалось бы не на 10% ярче, а значительно больше: яркость его возросла бы как *шестая степень* постоянной тяготения! Можно подсчитать и то, на сколько при таком изменении тяжести Земля приблизится к Солнцу. В итоге выясняется, что Земля стала бы более чем на  $100^\circ$  горячее и, следовательно, вся вода из морей превратилась бы в пар. Поэтому мы сейчас *не верим*, что постоянная тяготения изменяется по мере того, как

мир стареет. Все же приведенный нами аргумент не очень убедителен, и вопрос до конца не выяснен.

Как известно, сила тяготения пропорциональна массе, т.е. мере *инерции* тела, или мере того, насколько трудно удержать тело, вращающееся по кругу. Поэтому два тела, тяжелое и легкое, движущиеся бок о бок вокруг массивного тела по одному и тому же кругу с одной скоростью под действием тяготения, будут все время оставаться рядом, потому что движение по кругу *требует* для большего тела и большей силы. Иначе говоря, тяжесть у большей массы больше *как раз в нужной пропорции*, так что два тела будут вращаться, не удаляясь одно от другого. Если же одно тело находится внутри другого, то оно и *останется* там; равновесие является совершенным. Поэтому Гагарин и Титов наблюдали невесомость всех предметов внутри космического корабля; выпущенный из руки карандаш, например, вращался вокруг Земли по той же траектории, что и весь корабль, поэтому он замирал, повиснув в воздухе. Любопытно, что эта сила *в точности* пропорциональна массе; если бы это было не так, то должны были бы наблюдаться явления, в которых инерция и вес отличаются. Отсутствие подобных явлений было с огромной точностью проверено на опыте, выполненном впервые Этвешем в 1909 г., а позже повторенном

Дикке. У всех веществ масса и вес пропорциональны с точностью  $1/1\,000\,000\,000$  или даже более того. Не правда ли, замечательный эксперимент?

## § 8. Тяготение и относительность

Заслуживает еще обсуждения видоизменение ньютонова закона тяготения, сделанное Эйнштейном. Оказывается, несмотря на вызванное им воодушевление, ньютонов закон тяготения все же неверен! Учтя требования теории относительности, Эйнштейн видоизменил этот закон. Согласно Ньютону, тяготение действовало мгновенно. Это значит вот что: сдвинув массу, мы должны в тот же миг почувствовать изменение силы в результате смещения; стало быть, таким способом можно посылать сигналы с бесконечной скоростью. А Эйнштейн выдвинул доводы, что *невозможно посылать сигналы быстрее скорости света*; закон тяготения, таким образом, должен быть ошибочным. Если исправить его, учтя запаздывание, то получится уже новый закон, закон тяготения Эйнштейна. Одна из особенностей нового закона легко укладывается в голове: по теории относительности Эйнштейна все, любой объект, обладающий энергией, обладает и массой в том смысле, что он должен тяготеть

к другим объектам. Даже световой луч имеет «массу», ибо он обладает энергией. И когда луч света, неся с собой энергию, проходит мимо Солнца, то Солнце его притягивает. И луч уже идет не по прямой, а искривляется. Например, во время солнечных затмений звезды, окружающие Солнце, кажутся сдвинутыми с того места, где они наблюдались бы, если бы Солнца не было. И это явление и впрямь наблюдалось.

И наконец, сопоставим тяготение с другими теориями. В последние годы выяснилось, что любая масса обязана своим происхождением мельчайшим частицам и что существует несколько видов взаимодействия, например ядерные силы и т.п. Ни одна из этих ядерных или электрических сил пока тяготения не объясняет. Квантовомеханические стороны природы мы еще пока не распространили на тяготение. Когда на малых расстояниях начинаются квантовые эффекты, то тяготение оказывается еще настолько слабым, что нужды в квантовой теории тяготения не возникает. С другой стороны, для последовательности наших физических теорий было бы важно понять, должен ли закон Ньютона с внесенным Эйнштейном видоизменением быть изменен и дальше с тем, чтобы согласовываться с принципом неопределенности. Это последнее видоизменение пока не сделано.

## Содержание

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| От редакции Neoclassic . . . . .                           | 3         |
| Предисловие к первому русскоязычному<br>изданию. . . . .   | 5         |
| Предисловие Ричарда Фейнмана . . . . .                     | 13        |
| Предисловие Роберта Б. Лейтона . . . . .                   | 21        |
| <b>Глава 1. АТОМЫ В ДВИЖЕНИИ . . . . .</b>                 | <b>27</b> |
| § 1. Введение . . . . .                                    | 27        |
| § 2. Вещество состоит из атомов . . . . .                  | 32        |
| § 3. Атомные процессы . . . . .                            | 42        |
| § 4. Химические реакции . . . . .                          | 48        |
| <b>Глава 2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ<br/>ВОЗЗРЕНИЯ. . . . .</b> | <b>58</b> |
| § 1. Введение . . . . .                                    | 58        |
| § 2. Физика до 1920 года . . . . .                         | 64        |
| § 3. Квантовая физика . . . . .                            | 74        |
| § 4. Ядра и частицы . . . . .                              | 82        |
| <b>Глава 3. ФИЗИКА И ДРУГИЕ НАУКИ . . . . .</b>            | <b>93</b> |
| § 1. Введение . . . . .                                    | 93        |
| § 2. Химия . . . . .                                       | 94        |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| § 3. Биология . . . . .          | 97  |
| § 4. Астрономия . . . . .        | 111 |
| § 5. Геология . . . . .          | 114 |
| § 6. Психология . . . . .        | 117 |
| § 7. С чего все пошло? . . . . . | 119 |

## **Глава 4. СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ . . . . . 124**

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| § 1. Что такое энергия? . . . . .             | 124 |
| § 2. Потенциальная энергия тяготения. . . . . | 128 |
| § 3. Кинетическая энергия . . . . .           | 140 |
| § 4. Прочие формы энергии . . . . .           | 143 |

## **Глава 5. ВРЕМЯ И РАССТОЯНИЕ . . . . . 151**

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| § 1. Движение . . . . .                    | 151 |
| § 2. Время . . . . .                       | 153 |
| § 3. Короткие времена . . . . .            | 155 |
| § 4. Большие времена . . . . .             | 160 |
| § 5. Единицы и стандарты времени . . . . . | 165 |
| § 6. Большие расстояния . . . . .          | 167 |
| § 7. Малые расстояния . . . . .            | 174 |

## **Глава 6. ВЕРОЯТНОСТЬ . . . . . 182**

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| § 1. Вероятность и правдоподобие . . . . . | 182 |
| § 2. Флуктуации. . . . .                   | 189 |
| § 3. Случайные блуждания . . . . .         | 196 |
| § 4. Распределение вероятностей . . . . .  | 204 |
| § 5. Принцип неопределенности . . . . .    | 212 |

## **Глава 7. ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ . . . . . 217**

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| § 1. Движение планет . . . . . | 217 |
|--------------------------------|-----|

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| § 2. Законы Кеплера . . . . .              | 219 |
| § 3. Развитие динамики . . . . .           | 222 |
| § 4. Ньютонов закон тяготения . . . . .    | 224 |
| § 5. Всемирное тяготение . . . . .         | 231 |
| § 6. Опыт Кавендиша . . . . .              | 241 |
| § 7. Что такое тяготение? . . . . .        | 243 |
| § 8. Тяготение и относительность . . . . . | 250 |



Исключительные права на публикацию книги  
на русском языке принадлежат издательству AST Publishers.  
Любое использование материала данной книги,  
полностью или частично, без разрешения  
правообладателя запрещается.

Научно-популярное издание

## ФЕЙНМАНОВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ СОВРЕМЕННАЯ НАУКА О ПРИРОДЕ

Компьютерная верстка: *Р. Рыдалин*  
Технический редактор *Т. Полонская*

Подписано в печать 18.02.2025. Формат 76x100  $\frac{1}{32}$ .  
Печать офсетная. Гарнитура Newton.  
Усл. печ. л. 11,26. Доп. тираж 3000 экз. Заказ № 1375.

Общероссийский классификатор продукции ОК-034-2014 (КПЕС 2008);  
58.11.1 – книги, брошюры печатные

Произведено в Российской Федерации  
Изготовлено в 2025 г.

ООО «Издательство АСТ»  
129085, г. Москва, Звёздный бульвар, дом 21, строение 1, комната 705, пом. I, 7 этаж.  
Наш электронный адрес: [www.ast.ru](http://www.ast.ru)  
E-mail: [ask@ast.ru](mailto:ask@ast.ru)  
ВКонтакте: [vk.com/ast\\_neoclassic](https://vk.com/ast_neoclassic)

«Баспа Аста» деген ООО  
129085, Мәскеу қ., Звёздный бульвары, 21-үй, 1-құрылыс, 705-бөлме, I жай, 7-қабат.  
Біздің электрондық мекенжайымыз: [www.ast.ru](http://www.ast.ru)  
E-mail: [ask@ast.ru](mailto:ask@ast.ru)

Интернет-магазин: [www.book24.kz](http://www.book24.kz)

Интернет-дүкен: [www.book24.kz](http://www.book24.kz)

Импортер в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».

Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.

Дистрибьютор и представитель по приему претензий на продукцию в Республике Казахстан:  
ТОО «РДЦ-Алматы»

Қазақстан Республикасында дистрибьютор  
және өнім бойынша арыз-талаптарды қабылдаушының  
өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3-а, литер Б, офис 1.  
Тел.: 8(727) 2 51 59 89, 90, 91, 92, факс: 8 (727) 251 58 12 вн. 107;  
E-mail: [RDC-Almaty@eksmo.kz](mailto:RDC-Almaty@eksmo.kz)  
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.

Өндірген мемлекет: Ресей  
Сертификация қарастырылмаған

Отпечатано с готовых файлов заказчика  
в АО «Первая Образцовая типография»,  
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»  
432980, Россия, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

ISBN 978-5-17-113087-9

book 24.ru

Официальный  
интернет-магазин  
издательской группы  
«ЭКсмо-АСТ»



9 785171 130879 >

12+

Американский ученый Ричард Фейнман — один из величайших физиков XX века, создатель квантовой электродинамики, лауреат Нобелевской премии, но прежде всего — незаурядная многогранная личность, не вписывающаяся в привычные рамки образа «человека науки».

# ФЕЙНМАНОВСКИЕ

# ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ

В свое время преподаватели Калифорнийского технологического университета задумались о том, как можно было бы перестроить курс физики, чтобы сделать его более занимательным и современным. Изложение материала в старых учебниках было настолько скучным, что отбивало охоту к учению даже у самых усердных студентов. Ричард Фейнман с энтузиазмом подхватил эту идею и разработал новый, авторский курс лекций по общей физике. Читая эти лекции, он, по его собственным словам, ориентировался на самых сообразительных и одаренных, однако постарался учесть интересы и того студента, которого весь этот фейерверк мыслей может встревожить и отпугнуть, и выстроил материал таким образом, чтобы даже у этого студента осталось в голове основное ядро и понимание того, что он может получить в перспективе, продолжив изучение физики на более серьезном уровне. В настоящее издание включена вступительная часть лекций, посвященная общим законам природы.

ISBN 978-5-17-113087-9



9 785171 130879



**МОСКВА**  
ПОЛ ПРОФИЛЬНЫЙ ДИЗАЙН

200-216-003

978=5=17=113087=9 1605

Фейнман.м.о.Фейнмановские лек



8018157

440.00

Э К С К Л Ю З И В Н А Я      К Л А С С И К А