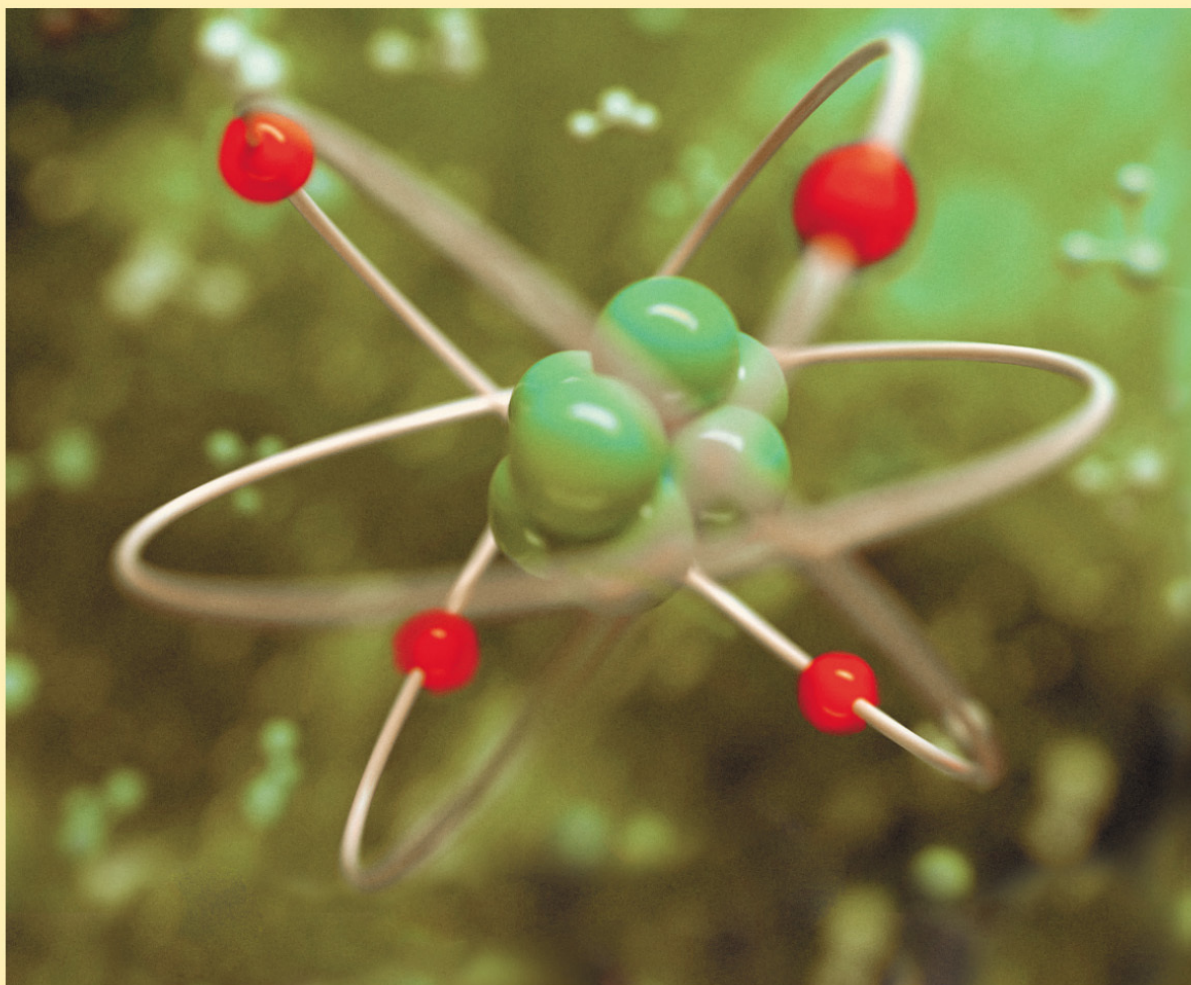




ФЕЙНМАНОВСКИЕ

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

Эксклюзивная классика (АСТ)

Ричард Фейнман

**Фейнмановские лекции по физике.
Современная наука о природе**

«Издательство АСТ»

2013

УДК 53(73)
ББК 22.3Г

Фейнман Р. Ф.

Фейнмановские лекции по физике. Современная наука о природе /
Р. Ф. Фейнман — «Издательство АСТ», 2013 — (Эксклюзивная
классика (АСТ))

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

ISBN 978-5-17-113087-9

© Фейнман Р. Ф., 2013
© Издательство АСТ, 2013

Содержание

От редакции Neoclassic	7
Предисловие к первому русскоязычному изданию	8
Предисловие Ричарда Фейнмана	11
Предисловие Роберта Б. Лейтона	14
Глава 1	16
§ 1. Введение	17
§ 2. Вещество состоит из атомов	19
§ 3. Атомные процессы	25
§ 4. Химические реакции	29
Глава 2	34
§ 1. Введение	35
Конец ознакомительного фрагмента.	37

Ричард Фейнман

Фейнмановские лекции по физике

Современная наука о природе

Richard P. Feynman

The Feynman Lectures On Physics: The New Millennium Edition (1–7)

* * *

Печатается с разрешения Basic Books, an imprint of Perseus Books, LLC, a subsidiary of Hachette Book Group, Inc. (USA) via Alexander Korzhenevski Agency (Russia).

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

© California Institute of Technology, Michael A. Gottlieb, and Rudolf Pfeiffer, 1963, 2006, 2013

© Перевод. А. Ефремов, 2018

© Перевод. Г. Копылов, наследники, 2019

© Перевод. О. Хрусталеv, наследники, 2019

© Предисловие. Я. Смородинский, наследники, 2019

© Издание на русском языке AST Publishers, 2019

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, саму 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 группы, 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 «переводе» 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 общепринятыми. 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 получат 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 ряде 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, кажущимися 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 большему 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 могли 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 большую 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 нервничать, если не поймет в лекции всего. Пусть не понимает всего, пусть ухватит только самую суть, самое быющее 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 прочесть 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 применениях, в частности в таких более сложных применениях, как электроника и химия. Поэтому я попробовал описать принципы квантовой механики так, чтобы знания 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 лучше.

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 задачки 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 расположен 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, личная 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 побольше 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 участников 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 окончательную «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 профессора Р. Лейтон, Г. Неер и М. Сэндс. Официально в этой работе принимали участие профессора Р. Фейнман, Г. Нойгебауер, Р. Саттон, Г. Стаблер, Ф. Стронг и Р. Фогт с кафедр физики, математики и астрономии, а также профессора Т. Кофи, М. Плессет и К. Уилтс с кафедры 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, проделанной 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 ско-

рости растет, но только для заметного роста нужны скорости, близкие к световой. *Правильный* закон таков: если скорость предмета меньше 100 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 картины 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.

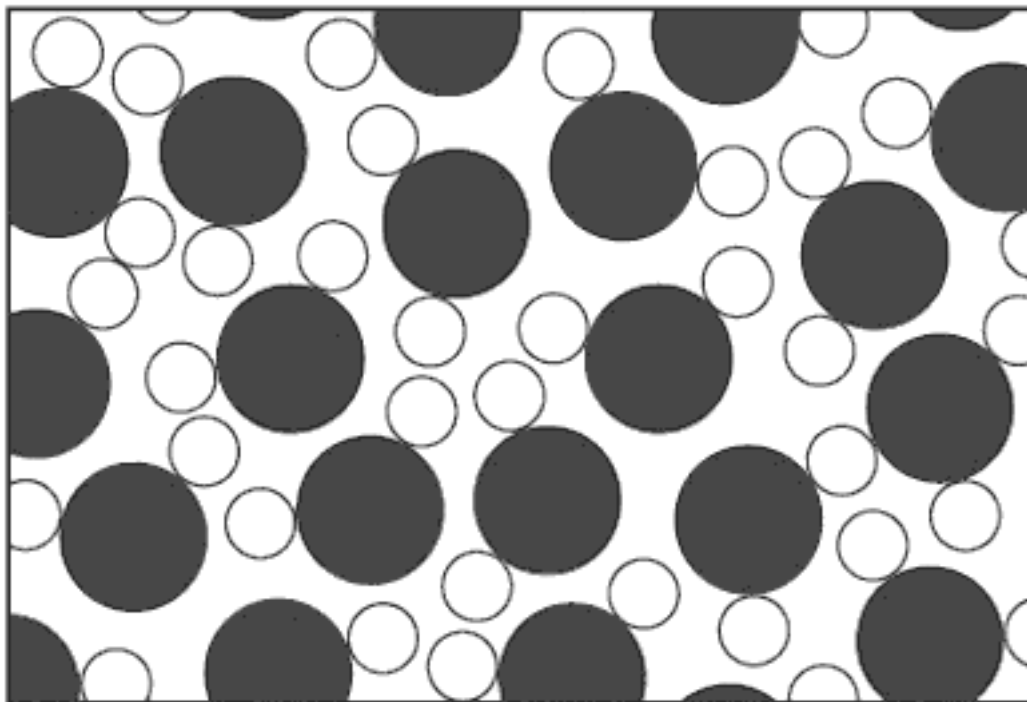
Давайте перейдем к нашей схеме, к очерку нашего понимания современной науки (в первую очередь физики, но также и прочих близких к ней наук), так что, когда позже нам придется вникать в разные вопросы, мы сможем видеть, что лежит в их основе, чем они интересны и как укладываются в общую структуру.

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 парameция – очень интересная штука. На этом вы можете задержаться и заняться парameцией, ее ресничками, смотреть, как она сжимается и разжимается, и на дальнейшее увеличение махнуть рукой (если только вам не захочется рассмотреть ее изнутри). Парameциями 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.



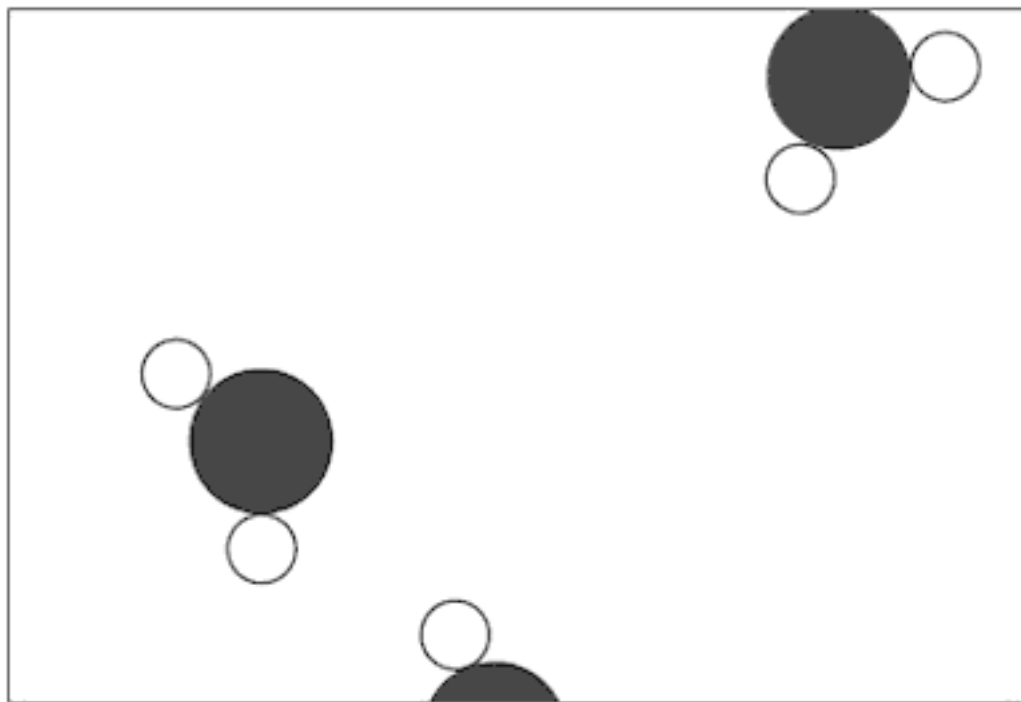
Фиг. 1.1. Капля воды (увеличенная в миллиард раз).

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 беспрерывно 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 попытаете 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 льнут 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.

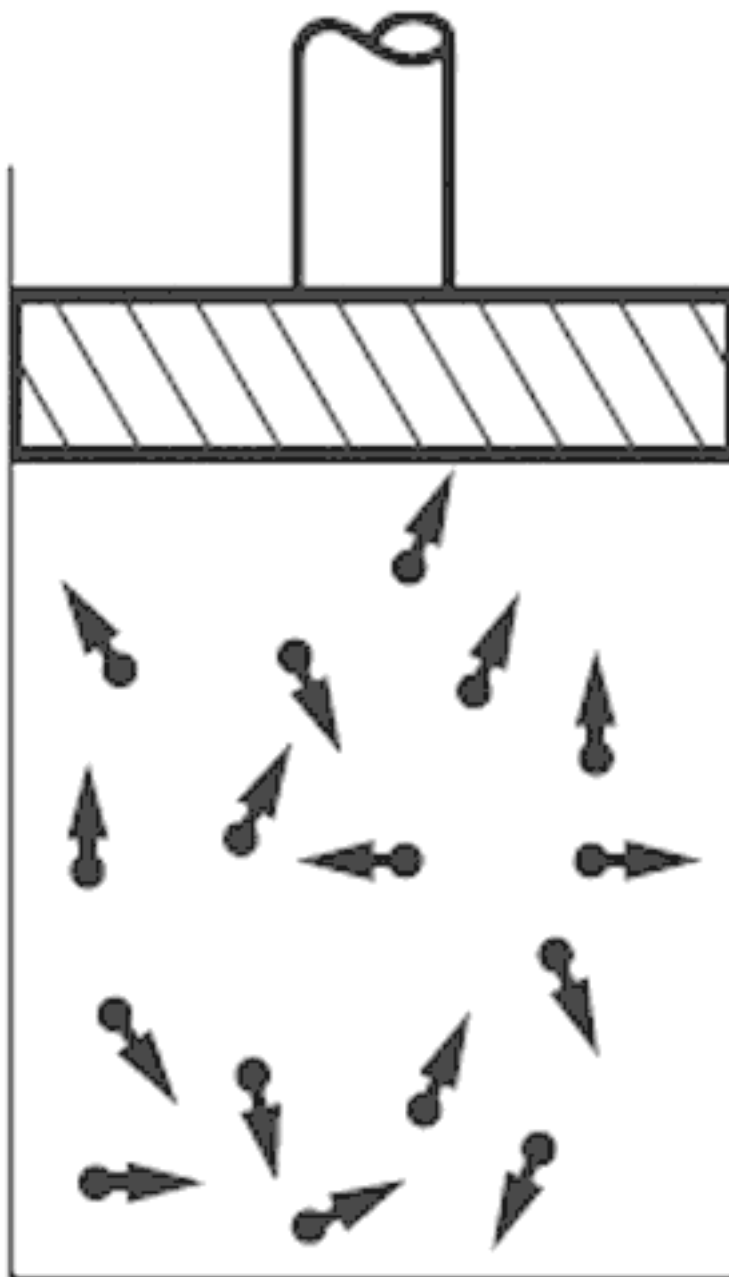
На фиг. 1.2 показан пар.



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° . 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 вый-

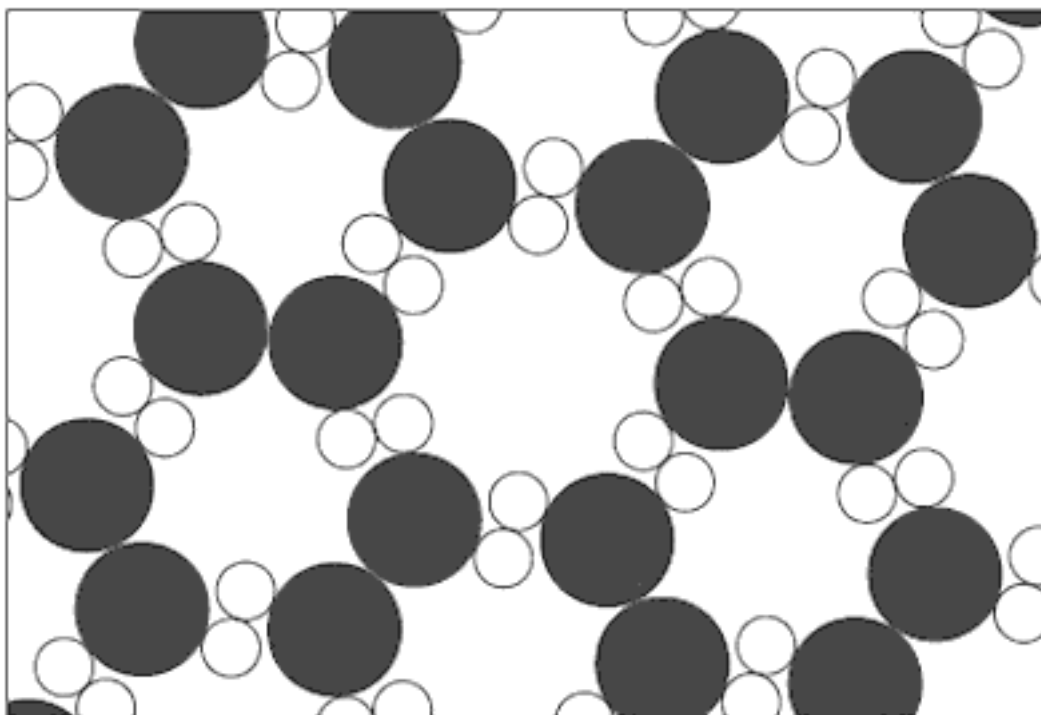
дет, что давление пропорционально плотности. Если принять во внимание истинный характер сил взаимодействия атомов, то следует ожидать и небольшого спада давления из-за увеличения притяжения между атомами и легкого роста давления из-за увеличения доли общего объема, занятого самими атомами. И все же в 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 толчая 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 телами 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° , 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.

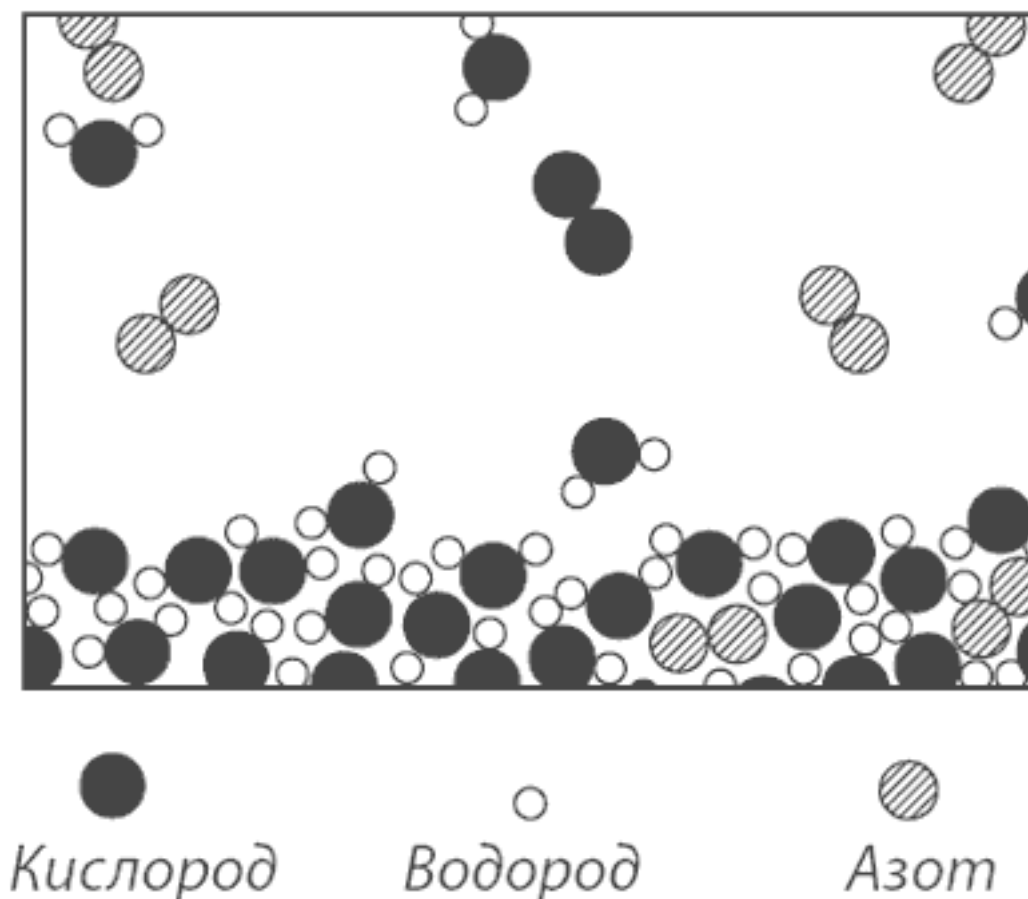
Смотрите, как много «пустот» на рисунке; у настоящего льда их тоже много. Когда система разрушается, все эти пустоты заполняются молекулами. Большинство простых веществ, за исключением льда и гарт (типографского сплава), при плавлении *расширяются*, потому что в твердых кристаллах атомы упакованы плотнее, 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 затвердения 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

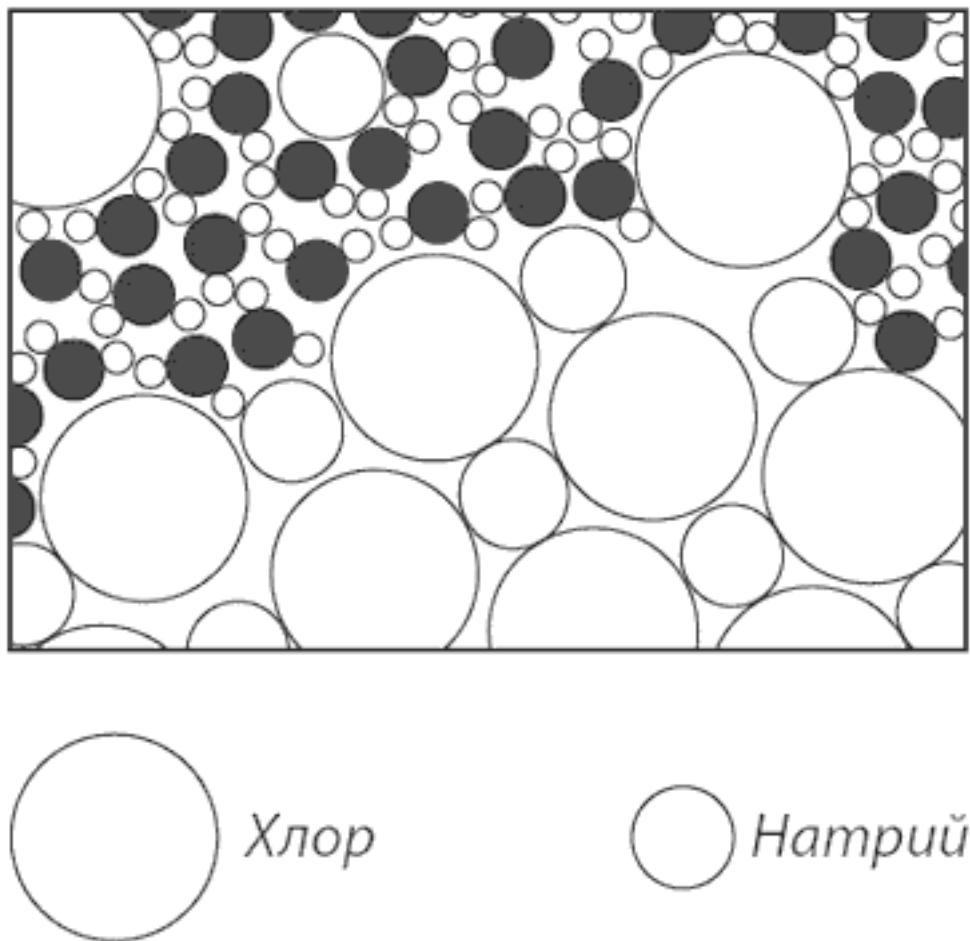
испаряется. Если *закрыть* сосуд, мы обнаружим среди молекул находящегося в нем воздуха множество молекул воды. То и дело некоторые из них снова попадают в воду и остаются там. То, что казалось нам мертвым и неинтересным (скажем, прикрытый чем-нибудь стакан воды, который, может быть, 20 лет простоял 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 увидели, 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 вдуть 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 пути притяжения соседей. Энергия вылетающих молекул превосходит среднюю 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, слыхали, что это явление очень вредно для ныряльщиков.

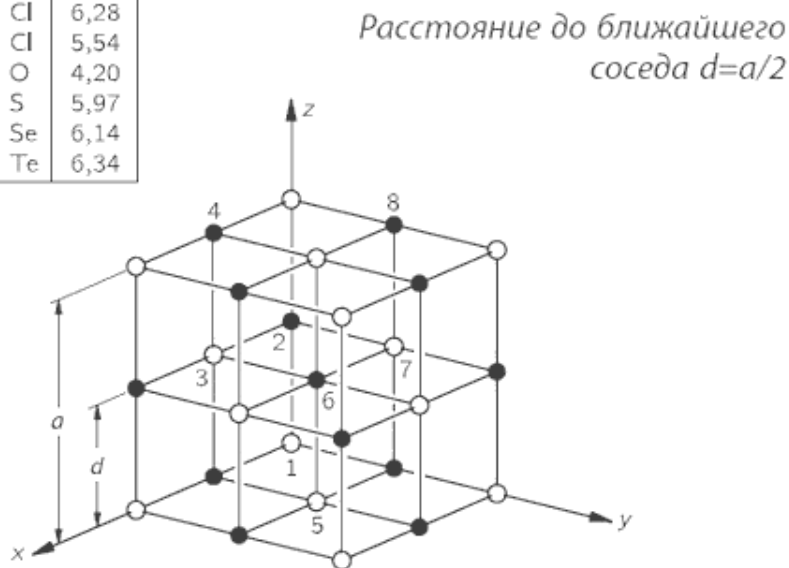
Перейдем теперь к другому процессу. На фиг. 1.6 мы видим, как (с атомной точки зрения) соль растворяется в воде.



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 (Å)
Каменная соль 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



Фиг. 1.7. Структура кристалла соли.

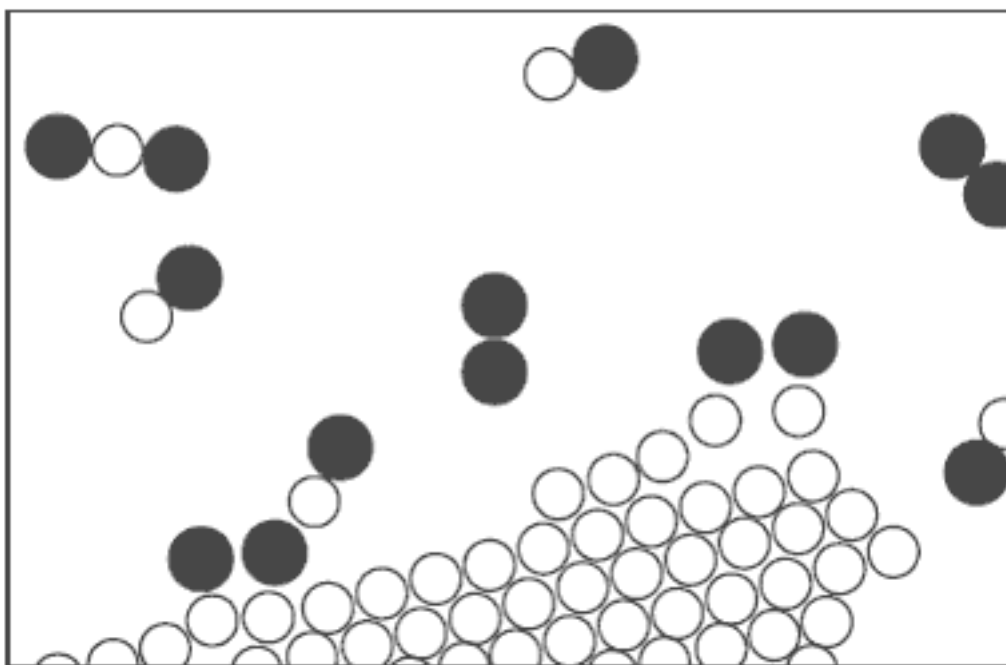
Строго говоря, кристалл состоит не из атомов, а из *ионов*. Ионы – это атомы с излишком или с нехваткой электронов. В кристалле соли мы находим ионы хлора (атомы хлора с лишним электроном) и ионы натрия (атомы натрия, лишенные одного электрона). Ионы в твердой соли скреплены друг с другом электрическим 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 атомные 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 алмаз¹). Одна из молекул кислорода может пробраться к углероду, 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

¹ Алмаз тоже может сгореть в воздухе.

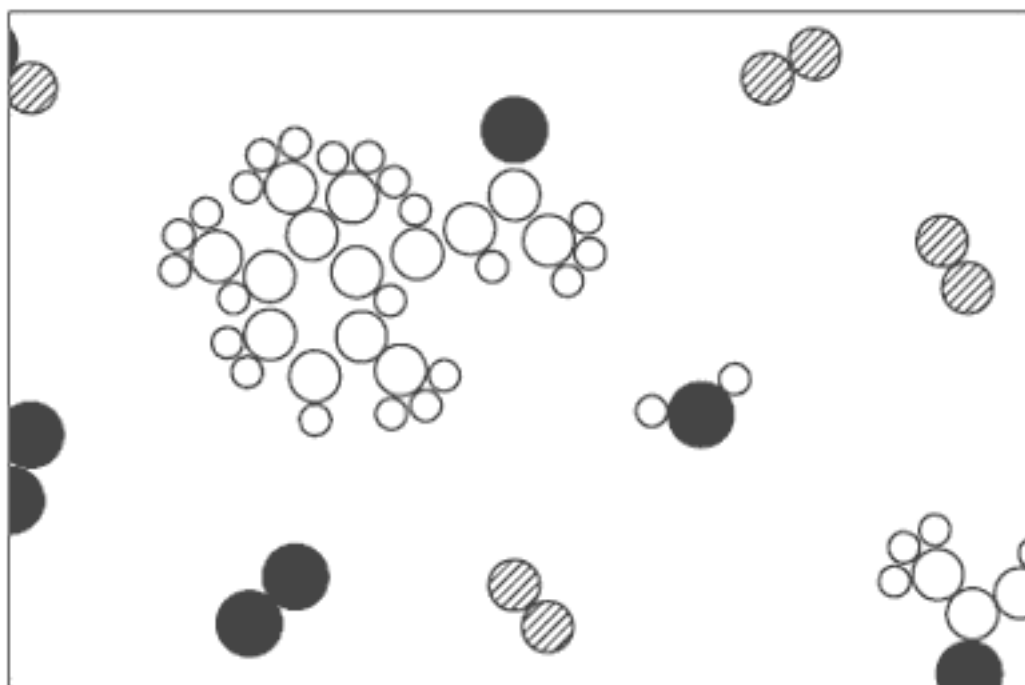
проявляется в виде движения молекул нагретого газа, но иногда ее может быть так много, что она вызывает и *свет*. Так получается *пламя*.

Вдобавок молекулы СО могут не удовольствоваться 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 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: О-С-О (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.

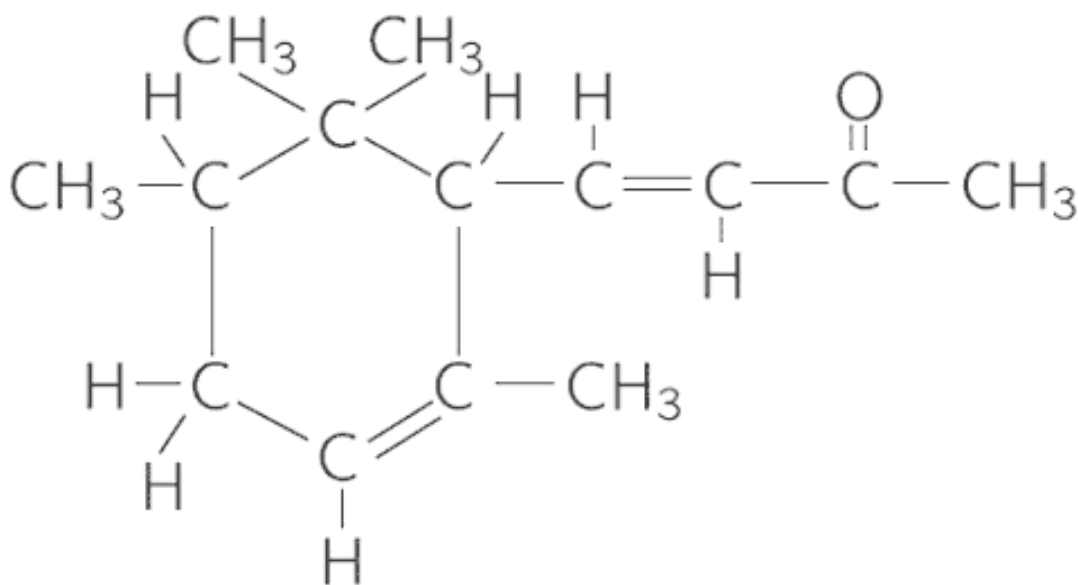
Снова мы находим здесь азот, кислород, водяной пар... (А он-то откуда здесь? От *влажных* фиалок. Все растения испаряют воду.)

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 большущий 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 многих 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 влияний? 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 устроиваем) 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 по тому, остается ли он все время на черном поле. Конечно, не исключено, что внезапно слон очутится на *белом* поле: после того как его побили, 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 когда детали процесса нам неизвестны, и вдруг иногда всплывает *новое правило*. Сточки 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 была 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.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.