



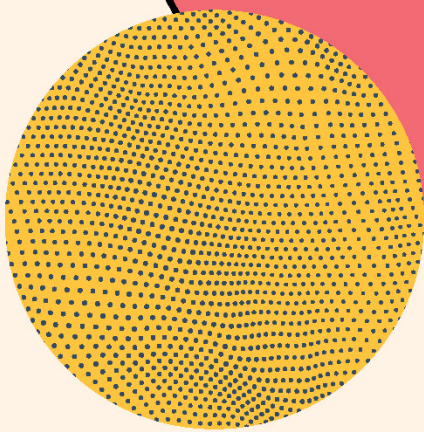
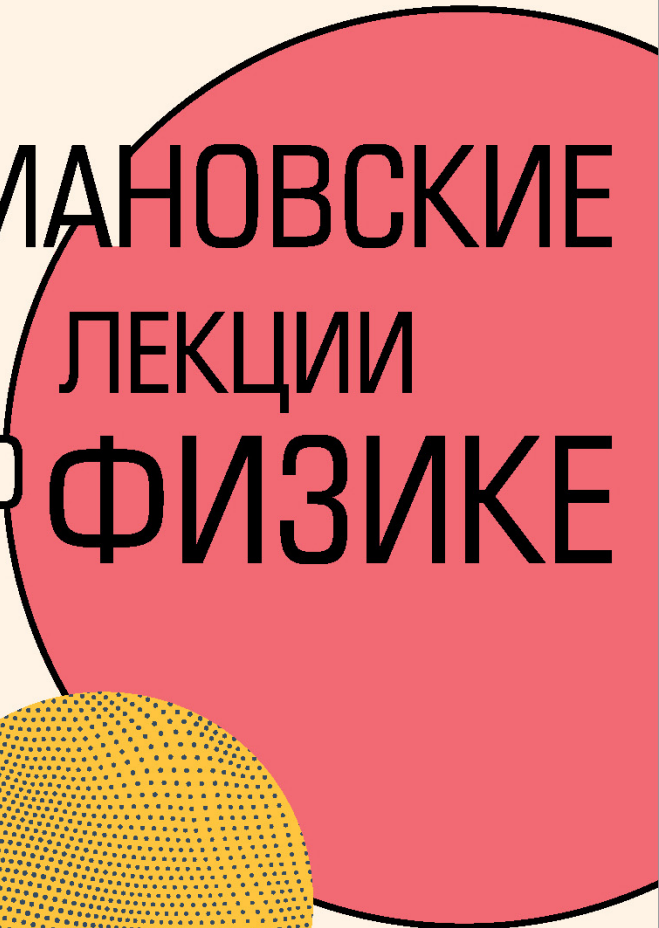
Р. ФЕЙНМАН



Р. ЛЕЙТОН



М. СЭНДС



ФЕЙНМАНОВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ



Том 1

СОВРЕМЕННАЯ НАУКА О ПРИРОДЕ
ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ
ПРОСТРАНСТВО. ВРЕМЯ. ДВИЖЕНИЕ

УДК 53
ББК 22.3
Ф36

Серия «Фейнмановские лекции по физике»

THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS:
THE NEW MILLENNIUM EDITION

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands

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

Компьютерный дизайн *В.А. Воронина*

Перевод с английского *А.В. Ефремова, Г.И. Копылова, О.А. Хрусталева*,
под редакцией *Я.А. Смородинского*

Фейнман, Ричард.

Ф36 Фейнмановские лекции по физике. Т. I (1–2) / Ричард Фейнман, Роберт Лейтон, Мэтью Сэндс; [пер. с англ. О.А. Хрусталева, Г.И. Копылова, А.В. Ефремова]. — Москва : Издательство АСТ, 2019. — 448 с. — (Фейнмановские лекции по физике).

ISBN 978-5-17-113006-0

Американский физик Ричард Фейнман — один из величайших ученых XX века, лауреат Нобелевской премии 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. Ричард Фейнман с энтузиазмом подхватил эту идею и согласился прочитать авторский двухгодичный курс лекций по общей физике, но только один раз. Университет, для которого это событие стало историческим, организовал запись лекций, и затем команда физиков подготовила издание в нескольких томах, которое и поныне считается одним из лучших вводных курсов по физике.

В настоящий том включены разделы «Современная наука о природе», «Законы механики», «Пространство. Время. Движение».

УДК 53
ББК 22.3

© Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands, 1965
© Перевод. А.В. Ефремов, 2018
© Перевод. Г.И. Копылов, наследники, 2018
© Перевод. О.А. Хрусталева, наследники, 2019
© Примечания. Я.А. Смородинский, наследники, 2018
© Издание на русском языке AST Publishers, 2019

К читателям русского издания

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 разработала 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 важными были созданные лектором оригинальные методы изложения, 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, ко-

торое 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, 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 обошелся 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

Предисловие к третьему изданию

Сейчас фейнмановские лекции получили широкую известность: их много читают и часто цитируют. Поэтому вполне естественно, что давно возникла потребность в переиздании этого курса.

Первый том лекций не требует никаких дополнений: классическая механика не изменилась за это время. Мы исправили лишь опечатки, о которых нам сообщили многочисленные читатели. Кроме того, приведены новые значения фундаментальных постоянных и новые данные об элементарных частицах.

Изменился внешний вид курса: первый том выйдет в двух книгах, однако мы сохранили старую нумерацию выпусков. Первая книга содержит выпуски 1, 2, вторая — 3, 4.

Я. Смородинский



ПРЕДИСЛОВИЕ Р. 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 пригласили — 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. Весь вопрос был в том, сможем ли мы так построить курс, чтобы у самых способных, самых горячих студентов сохранился и укрепился их энтузиазм.

Не считайте 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

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 в первой части 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, немного 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, я бы непременно вернулся 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 именно ее вы и обнаружите в конце настоящего курса.

Совершенно ясно, что студентам, желающим хорошо разобратся 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, этот общепринятый 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 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 за квантовую механику надо бы приниматься 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 координат 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 решает 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 корпевших 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, 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.

Июнь 1963

Ричард Фейнман

Глава 1

АТОМЫ В ДВИЖЕНИИ

§ 1. Введение

§ 2. Вещество состоит из атомов

§ 3. Атомные процессы

§ 4. 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 вообще 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 узнаем, 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 истинной. Все, что мы узнаем, — 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 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 км/сек, масса с точностью до одной миллионной по-

стоянна. 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.

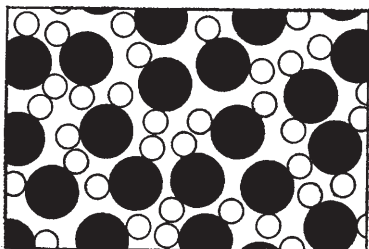
Так что же нам нужно изучить сначала? Учить ли нам *правильные*, но необычные законы с их странными и трудными понятиями, например теорию относительности, четырехмерное пространство-время и т. д.? Или же начать с простого закона «постоянной массы»? Он хоть и приближенный, но зато обходится без трудных 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*

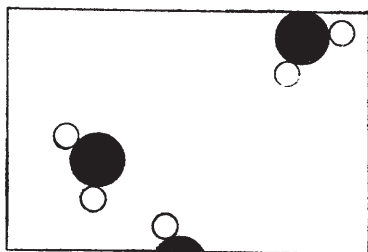


Ф и г. 1.1. Капля воды (увеличенная в миллиард раз).

в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому. В одной этой фразе, как вы убедились, 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 проществуем 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 зору представится что-то похожее на фиг. 1.1. 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

Фиг. 1.2. Пар под микроскопом.

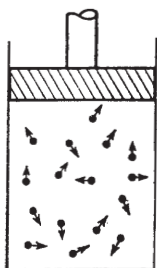


в том, что настоящие частицы в природе беспрерывно дрожат и подпрыгивают, крутятся и вертятся одна вокруг другой. Вы должны представить себе на картинке не покой, а движение. На рисунке нельзя также показать, как частицы «липнут друг к другу», притягиваются, пристают одна к одной и т. д. Можно сказать, что целые их группы чем-то «склеены». Однако ни одно из телец не способно протиснуться сквозь другое. Если вы 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 яблока 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 ка-тясь 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. 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 $105^\circ 3'$,



Фиг. 1.3. Цилиндр с поршнем.

а промежуток между центрами атомов кислорода и водорода равен 0,957 А. 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 немолкаемую 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. 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.

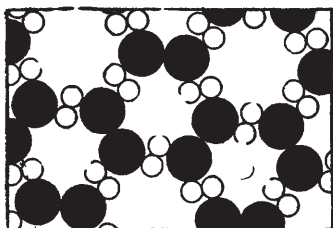
А если в сосуде число молекул удвоится (и соответственно возрастет их плотность), а скорости их (и соответственно температура) останутся прежними? Тогда довольно точно удвоится и число ударов, а так как каждый из них столь же «энергичен», как и раньше, то выйдет, что давление пропорционально плотности. Если принять во внимание истинный характер сил взаимодействия атомов, то следует ожидать и 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 толчея среди молекул воды постепенно утихает. Меж ними, как мы знаем, существуют силы притяжения; притянувшимся 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



Ф и г. 1.4. Молекулы льда.

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. 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 (типграфского сплава), при плавлении *расширяется*, потому что в твердых кристаллах атомы упакованы плотнее, а после плавления им понадобится место, чтобы колебаться; сквозные же структуры, наподобие льда, разрушаясь, становятся компактнее.

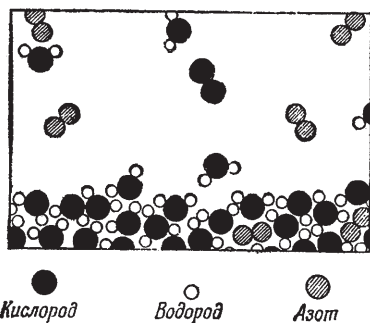
Но хотя лед обладает «жесткой» кристаллической структурой, его температура может тоже меняться, в нем есть запас тепла. Этот запас можно менять по своему желанию. Что же это за тепло? Атомы льда все равно не находятся в покое. Они дрожат и колеблются. Даже когда существует определенный порядок в кристалле (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. 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 непрерывно 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, с другой случилось то же самое и т. д. Так, молекула за молекулой, вода исчезает — она испаряется. Если *заккрыть* 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

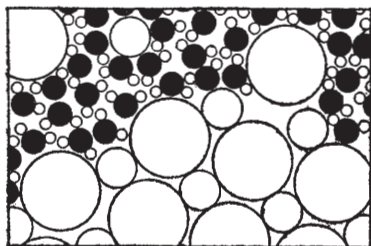
Ф и г. 1.5. Молекулы воды, испаряющейся в воздух.



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. Мораль: 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. Мораль: чтобы остудить суп, дуйте на него!

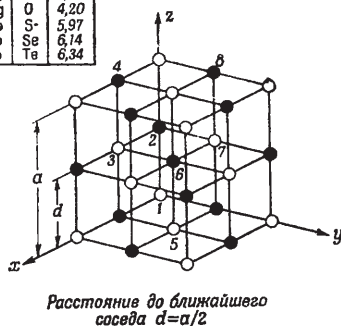


Фиг. 1.6. Молекулы соли, растворяющейся в воде.



Кристалл	●	○	$a, \text{Å}$
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.



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

понять, *растворяется* ли 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.

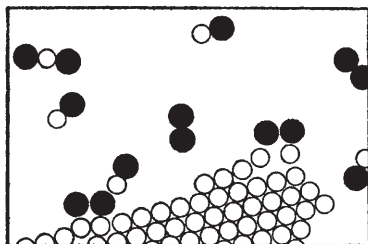
Мы мимоходом упомянули, что понятие *молекулы* вещества не совсем точно и имеет смысл только для некоторых видов веществ. Оно применимо к воде, в ней действительно три атома всегда скреплены между собой, но оно не очень подходит к твердому хлористому натрию. Хлористый натрий — это ионы хлора и натрия, 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 растворяемых атомов и число осаждаемых. Оказывается, что в общем случае трудно предсказать, в какую сторону сдвинется процесс, быстрее или медленнее 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.)

Ф и г. 1.8. Уголь, горящий
в кислороде.



Предположим, что атомы углерода образуют твердый кристалл (графит или алмаз*). 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 CO . Что это значит? Буквы CO — это фактически картинка такой молекулы: C — углерод, O — 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 CO 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 CO . Атом кислорода присоединится к CO 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*.

* Алмаз тоже может сгореть в воздухе.

К читателям русского издания	5
Предисловие к третьему изданию	9
Предисловие Р. Фейнмана	11
Предисловие	17

ВЫПУСК 1

Глава 1. Атомы в движении	21
§ 1. Введение.	21
§ 2. Вещество состоит из атомов.	23
§ 3. Атомные процессы	29
§ 4. Химические реакции	32
Глава 2. Основные физические воззрения	38
§ 1. Введение.	38
§ 2. Физика до 1920 года	41
§ 3. Квантовая физика	46
§ 4. Ядра и частицы	50
Глава 3. Физика и другие науки	56
§ 1. Введение.	56
§ 2. Химия	56
§ 3. Биология	58
§ 4. Астрономия	65
§ 5. Геология.	67
§ 6. Психология	69
§ 7. С чего все пошло?	70
Глава 4. Сохранение энергии	72
§ 1. Что такое энергия?	72
§ 2. Потенциальная энергия тяготения	74
§ 3. Кинетическая энергия	80
§ 4. Прочие формы энергии	81

Глава 5. Время и расстояние	86
§ 1. Движение	86
§ 2. Время	87
§ 3. Короткие времена	88
§ 4. Большие времена	91
§ 5. Единицы и стандарты времени	93
§ 6. Большие расстояния	94
§ 7. Малые расстояния	98
Глава 6. Вероятность	103
§ 1. Вероятность и правдоподобие	103
§ 2. Флуктуации	106
§ 3. Случайные блуждания	111
§ 4. Распределение вероятностей	115
§ 5. Принцип неопределенности	119
Глава 7. Теория тяготения	123
§ 1. Движение планет	123
§ 2. Законы Кеплера	124
§ 3. Развитие динамики	125
§ 4. Ньютонов закон тяготения	126
§ 5. Всемирное тяготение	130
§ 6. Опыт Кавендиша	135
§ 7. Что такое тяготение?	137
§ 8. Тяготение и относительность	140
Глава 8. Движение	142
§ 1. Описание движения	142
§ 2. Скорость	146
§ 3. Скорость как производная	151
§ 4. Расстояние как интеграл	153
§ 5. Ускорение	155
Глава 9. Динамические законы Ньютона	160
§ 1. Импульс и сила	160
§ 2. Компоненты скорости, ускорения и силы	163
§ 3. Что такое сила?	165
§ 4. Смысл динамических уравнений	166
§ 5. Численное решение уравнений	168
§ 6. Движение планет	170
Глава 10. Закон сохранения импульса	178
§ 1. Третий закон Ньютона	178
§ 2. Закон сохранения импульса	180
§ 3. Импульс все-таки сохраняется!	185

§ 4. Импульс и энергия	190
§ 5. Релятивистский импульс	192
Глава 11. Векторы.	195
§ 1. Симметрия в физике	195
§ 2. Переносы начала	196
§ 3. Вращения	199
§ 4. Векторы	202
§ 5. Векторная алгебра.	205
§ 6. Законы Ньютона в векторной записи	207
§ 7. Скалярное произведение векторов	210
Глава 12. Характеристики силы	213
§ 1. Что такое сила?	213
§ 2. Трение	217
§ 3. Молекулярные силы	221
§ 4. Фундаментальные силы. Поля	223
§ 5. Псевдосилы	229
§ 6. Ядерные силы	232
Глава 13. Работа и потенциальная энергия (I)	233
§ 1. Работа падающего тела	233
§ 2. Работа, выполняемая тяжестью	237
§ 3. Сложение энергий.	242
§ 4. Поле тяготения больших тел	244
Глава 14. Работа и потенциальная энергия (II).	248
§ 1. Работа	248
§ 2. Движение при наложенных связях.	251
§ 3. Консервативные силы	252
§ 4. Неконсервативные силы	257
§ 5. Потенциалы и поля	259

ВЫПУСК 2

Глава 15. Специальная теория относительности	264
§ 1. Принцип относительности	264
§ 2. Преобразование Лоренца.	267
§ 3. Опыт Майкельсона — Морли.	268
§ 4. Преобразование времени.	271
§ 5. Лоренцево сокращение	276
§ 6. Одновременность	276
§ 7. Четырехвекторы	277
§ 8. Релятивистская динамика	278
§ 9. Связь массы и энергии.	280

Глава 16. Релятивистская энергия и релятивистский импульс . . .	283
§ 1. Относительность и «философы»	283
§ 2. Парадокс близнецов	287
§ 3. Преобразование скоростей	288
§ 4. Релятивистская масса	291
§ 5. Релятивистская энергия	295
Глава 17. Пространство-время.	299
§ 1. Геометрия пространства-времени	299
§ 2. Пространственно-временные интервалы	302
§ 3. Прошедшее, настоящее, будущее	304
§ 4. Еще о четырехвекторах.	306
§ 5. Алгебра четырехвекторов.	310
Глава 18. Двумерные вращения	313
§ 1. Центр масс	313
§ 2. Вращение твердого тела	316
§ 3. Момент количества движения	321
§ 4. Закон сохранения момента количества движения	323
Глава 19. Центр масс; момент инерции	327
§ 1. Свойства центра масс.	327
§ 2. Положение центра масс	332
§ 3. Вычисление момента инерции	334
§ 4. Кинетическая энергия вращения	338
Глава 20. Вращение в пространстве	343
§ 1. Моменты сил в трехмерном пространстве	343
§ 2. Уравнения вращения в векторном виде	349
§ 3. Гироскоп	351
§ 4. Момент количества движения твердого тела.	356
Глава 21. Гармонический осциллятор	359
§ 1. Линейные дифференциальные уравнения	359
§ 2. Гармонический осциллятор	360
§ 3. Гармоническое движение и движение по окружности	364
§ 4. Начальные условия	366
§ 5. Колебания под действием внешней силы	368
Глава 22. Алгебра	370
§ 1. Сложение и умножение	370
§ 2. Обратные операции	372
§ 3. Шаг в сторону и обобщение	373
§ 4. Приближенное вычисление иррациональных чисел	375
§ 5. Комплексные числа	380
§ 6. Мнимые экспоненты	384

Глава 23. Резонанс	387
§ 1. Комплексные числа и гармоническое движение	387
§ 2. Вынужденные колебания с торможением	390
§ 3. Электрический резонанс	394
§ 4. Резонанс в природе	398
Глава 24. Переходные решения	404
§ 1. Энергия осциллятора	404
§ 2. Затухающие колебания	407
§ 3. Переходные колебания в электрических цепях	411
Глава 25. Линейные системы и обзор	415
§ 1. Линейные дифференциальные уравнения	415
§ 2. Суперпозиция решений	417
§ 3. Колебания в линейных системах	423
§ 4. Аналогии в физике	426
§ 5. Последовательные и параллельные сопротивления	429
Приложение	431