

Richard P. Feynman

РИЧАРД ФЕЙНМАН

Дюжина лекций:

**ШЕСТЬ ПОПРОЩЕ
И ШЕСТЬ ПОСЛОЖНЕЕ**

УДК 53
ББК 22.3
Ф36

Перевод: ч. 1 — Е. В. Фалёв, ч. 2 — В. А. Носенко

Фейнман Р.

Ф36 Дюжина лекций: шесть попроще и шесть посложнее / Р. Фейнман ; пер. с англ. — 9-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 321 с. — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-924-4

Приводятся избранные лекции выдающегося американского физика, лауреата Нобелевской премии Р. Фейнмана. В них рассматриваются этапы становления современной физики и ее концепций, связь физики с другими науками, теория тяготения, квантовая механика, симметрия законов физики, специальная теория относительности, искривленное пространство-время и другие важные вопросы, разработанные автором в процессе его плодотворной научной деятельности.

Для студентов, изучающих теоретическую и экспериментальную физику, преподавателей вузов и широкого круга читателей, интересующихся проблемами современной физики.

УДК 53
ББК 22.3

Деривативное издание на основе печатного аналога: Дюжина лекций: шесть попроще и шесть посложнее / Р. Фейнман ; пер. с англ. — 8-е изд. — М. : Лаборатория знаний, 2018. — 318 с. : ил. — ISBN 978-5-00101-127-9.

Оригинальные издания:

1. SIX EASY PIECES: ESSENTIALS OF PHYSICS EXPLAINED BY ITS MOST BRILLIANT TEACHER by RICHARD P. FEYNMAN.
2. SIX NOT-SO-EASY PIECES: EINSTEIN'S RELATIVITY, SYMMETRY, AND SPACE-TIME by RICHARD P. FEYNMAN.

Публикуется с разрешения издательства

DA CAPO PRESS, an imprint of PERSEUS BOOKS LLC. (США)

при содействии Агентства Александра Корженевского (Россия)

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации

1. Copyright © 1963, 1989, 1995, 2011
by the California Institute of Technology
2. Copyright © 1963, 1989, 1997, 2011
by the California Institute of Technology
Introduction copyright © 1997 by Roger
Penrose

ISBN 978-5-00101-924-4

© Лаборатория знаний, 2015

Оглавление

1. Шесть простых фрагментов

От издателя	11
Введение	12
Специальное предисловие	22
Предисловие автора	27
1. Атомы в движении.	33
Введение	33
Вещество состоит из атомов	36
Атомные процессы	42
Химические реакции.	46
2. Основы физики	53
Введение	53
Физика до 1920 года	56
Квантовая физика.	62
Ядра и частицы	67
3. Отношение физики к другим наукам	75
Введение	75
Химия.	75
Биология.	77
Астрономия	86
Геология	88
Психология	90
С чего все началось?	91
4. Сохранение энергии	95
Что такое энергия?	95
Потенциальная энергия тяготения	98
Кинетическая энергия	105
Другие формы энергии.	107

5. Теория тяготения	113
Движение планет	113
Законы Кеплера	114
Развитие динамики	116
Ньютоновский закон тяготения	117
Всемирное тяготение	122
Эксперимент Кавендиша	128
Что такое тяготение?	130
Тяготение и относительность	134
6. Квантовое поведение	137
Атомная механика	137
Эксперимент с пулеметной стрельбой	139
Эксперимент с волнами	141
Эксперимент с электронами	144
Интерференция электронных волн	146
Наблюдение за электронами	149
Исходные принципы квантовой механики	155
Принцип неопределенности	157

II. Шесть не столь простых фрагментов

От издателя	163
Введение	164
1. Векторы	173
1.1. Симметрия в физике	173
1.2. Переносы начала координат	174
1.3. Вращения	177
1.4. Векторы	181
1.5. Векторная алгебра	184
1.6. Законы Ньютона в векторной записи	187
1.7. Скалярное произведение векторов	190
2. Симметрия законов физики	195
2.1. Операции симметрии	195
2.2. Симметрия в пространстве и времени	196
2.3. Симметрия и законы сохранения	200
2.4. Зеркальные отражения	201
2.5. Полярный и аксиальный векторы	206
2.6. Какая же рука — правая?	209
2.7. Четность не сохраняется!	210
2.8. Антивещество	213
2.9. Нарушенная симметрия	216

3. Специальная теория относительности	219
3.1. Принцип относительности	219
3.2. Преобразование Лоренца	222
3.3. Опыт Майкельсона—Морли	224
3.4. Преобразование времени	228
3.5. Лоренцево сокращение	232
3.6. Одновременность	232
3.7. 4-векторы	234
3.8. Релятивистская динамика	235
3.9. Связь массы и энергии	237
4. Релятивистская энергия и релятивистский импульс . . .	241
4.1. Относительность и философы	241
4.2. Парадокс близнецов	245
4.3. Преобразование скоростей	246
4.4. Релятивистская масса	251
4.5. Релятивистская энергия	255
5. Пространство-время	261
5.1. Геометрия пространства-времени	261
5.2. Пространственно-временные интервалы	265
5.3. Прошедшее, настоящее и будущее	267
5.4. Еще немного о 4-векторах	270
5.5. Алгебра 4-векторов	274
6. Искривленное пространство	279
6.1. Искривленное пространство двух измерений	279
6.2. Кривизна в трехмерном пространстве	290
6.3. Наше пространство искривлено	292
6.4. Геометрия в пространстве-времени	295
6.5. Сила притяжения и принцип эквивалентности	296
6.6. Ход часов в поле сил тяготения	297
6.7. Кривизна пространства-времени	303
6.8. Движение в искривленном пространстве-времени . . .	304
6.9. Эйнштейновская теория тяготения	308
О Ричарде Фейнмане	311
Предметный указатель	313

I

Шесть простых
фрагментов

От издателя*

Книга «Шесть простых фрагментов» выросла из потребности сделать доступным для как можно более широкой аудитории некий базовый учебник по физике, который содержит необходимые и в то же время не слишком специальные технические знания и основывается на научных достижениях Ричарда Фейнмана. Мы выбрали шесть наиболее простых глав из знаменитой и исторически важной книги «Лекции по физике» (впервые опубликованной в 1963 г.), которая остается самой известной из публикаций этого ученого. Широкие круги читателей могут воспользоваться тем, что Фейнман решил представить определенные ключевые вопросы физики почти исключительно в качественных понятиях, без использования формальной математики, и эти вопросы собраны в «Шести простых фрагментах».

Издательство Эддисон-Уэсли хотело бы выразить благодарность Полю Дэвису за его проникновенное введение к этому новому сборнику. Следуя этому введению, мы решили воспроизвести два предисловия из «Лекций по физике», одно из них — принадлежащее самому Фейнману, и другое — двум его коллегам, так как они создают контекст для последующих фрагментов и помогают понять как самого Фейнмана, так и его научные достижения.

И наконец, мы хотели бы поблагодарить физический факультет Калифорнийского технологического института и архив института, в особенности д-ра Джудит Гудстейн и д-ра Брайана Хэтфилда за их замечательные советы и рекомендации, очень помогавшие нам на протяжении всей работы над этим проектом.

* На языке оригинала книга была опубликована издательством Addison-Wesley. — *Прим. перев.*

Предисловие автора

(Из «Лекций по физике»)

Это лекции по физике, которые я читал в прошлом и позапрошлом году для студентов первого и второго курсов КАЛТЕХ'а. Лекции переданы, конечно, не дословно: их приглаживали, иногда довольно сильно, иногда не очень. Эти лекции составляют только часть полного курса. Весь поток из 180 студентов собирался в большой лекционной аудитории дважды в неделю, чтобы прослушать эти лекции, а затем они разбивались на маленькие группы по 15–20 человек для семинарских занятий под руководством ассистентов. Кроме того, раз в неделю были лабораторные работы.

Этими лекциями мы хотели достичь особой цели: поддержать интерес у молодых энтузиастов и сообразительных студентов, приходящих в КАЛТЕХ из средней школы. Они много слышали о том, как захватывающе интересна современная физика — теория относительности, квантовая механика и т. д. Но если бы этот курс читался так, как он читался раньше, то к концу двух лет многие из них испытывали бы большое разочарование, потому что на самом деле им предлагалось очень уж много грандиозных, новых, современных идей. Их заставляли изучать наклонные плоскости, электростатику и так далее, и после двух лет их энтузиазм сходил на нет. Было неясно, сможем ли мы создать курс, который удержал бы наиболее продвинутых и устремленных к знанию студентов, укрепив их энтузиазм.

Эти лекции никоим образом не задумывались как обзорный курс, напротив, их цель весьма серьезна. Я предполагал адресовать их наиболее сообразительным слушателям, добиваясь, если возможно, чтобы и самые понимающие студенты не могли полностью охватить все, что содержится в лекции. Для этого я подкидывал им мысли о возможных приложениях идей и концепций вне основного направления атаки. Именно по этой при-

чине я очень старался формулировать все свои утверждения как можно более точно, указывая в каждом случае, какие уравнения и идеи укладываются в физической картине мира, а также — когда они узнают немного больше — как что-то может измениться. Я также понимал, что для таких студентов важно указать, что они должны (если они достаточно сообразительны) уметь вывести сами из того, что было сказано ранее, а что вводится как нечто принципиально новое. Формулируя новые идеи, я пытался либо вывести их, если они были выводимы, либо объяснить, что это *действительно* новая идея, которая не основана ни на каких понятиях, уже известных им, и которая не считается доказуемой, а просто принимается.

Приступая к этим лекциям, я предполагал, что студенты кое-что знают, выходя из средней школы, — например, геометрическую оптику, простые понятия химии и т. д. Я также не видел никакого смысла располагать эти лекции в строгом порядке, чтобы нельзя было упоминать о чем-либо, что будет обсуждаться позже в подробностях. Упоминалось много разных вещей без их развернутого обсуждения. Эти детали предполагалось обсуждать подробнее позже, на более высоких ступенях их обучения. Например, так говорилось об индуктивности, энергетических уровнях, которые вначале давались очень приблизительно, а позже разрабатывались более полно.

Расчитывая на самых активных студентов, я не хотел забывать и о тех, для кого чрезмерное остроумие и многосторонние приложения будут только лишним поводом для волнения, и от кого вообще нельзя ждать, что они усвоят большую часть лекций. Таким студентам я хотел указать хотя бы на основное ядро или костяк материала, который они *могли бы* усвоить. И даже если бы кто-то не понял ничего из лекции, я надеялся, что это не вызовет у него раздражения. Пусть он поймет не все, но только центральное, самую суть. Конечно, он должен проявить некоторую сообразительность, чтобы понять, какие теоремы и какие идеи являются главными, а какие — более сложными или побочными вопросами и приложениями, которые он сможет понять лишь в последующие годы.

При создании этих лекций существовала одна серьезная трудность: в ходе чтения курса не работала обратная связь от студентов к лектору, позволяющая понять, насколько лекции достигают своей цели. Это действительно очень серьезная помеха, и я не знаю, насколько эти лекции хороши на самом деле.

Все это в сущности эксперимент. И если бы я взялся за него еще раз, я делал бы все иначе, но надеюсь, мне *не придется* делать этого еще раз! Думаю, однако, что, если говорить о физике, материал первой части проработан вполне удовлетворительно.

А вот второй частью я не так удовлетворен. В начале этой части курса, излагая темы электричества и магнетизма, я не мог помыслить о каком-то особенном или своеобразном способе изложения — таком, который вызывал бы больший интерес, чем обычный способ изложения этих тем. Так что я думаю, что мне удалось сделать немного в лекциях об электричестве и магнетизме. Изначально предполагалось, что после этой темы я прочту несколько лекций о свойствах твердых тел, но главным образом затрону такие вещи, как решения уравнений диффузии, колебательные системы, ортогональные функции и т. д., прорабатывая начала так называемого «метода математической физики». Бросая теперь взгляд назад, я думаю, что, случись мне читать такой курс еще раз, я вернулся бы к этой первоначальной идее. Но поскольку повторения этих лекций не планируется, мне предложили попытаться дать введение в квантовую механику — которое вы и найдете в конце курса.

Совершенно очевидно, что студенты, которые будут специализироваться в физике, могут подождать и до третьего года, когда им будет прочитан курс квантовой механики. С другой стороны, было высказано соображение, что многие студенты с моего курса изучают физику как основу для занятий другими науками. И обычный способ изучения квантовой механики делает этот предмет почти недоступным для огромного большинства студентов, поскольку его изучение требует слишком длительного времени. И все же, весь аппарат дифференциальных уравнений редко используется в своих областях приложения — особенно в своих наиболее сложных применениях, таких как электротехника и химия. Поэтому я попытался описать принципы квантовой механики так, чтобы это не требовало предварительного знакомства слушателя с математикой дифференциальных уравнений в частных производных. Думаю, эта задача — изложить квантовую механику в таком новом ключе — представляет интерес даже для физика (по нескольким причинам, которые станут очевидны уже из самих лекций). Однако я полагаю, что этот эксперимент с квантовой механикой был не вполне успешным — в значительной степени из-за того, что в конце у меня не было достаточно времени (мне не хватило

трех-четырёх лекций, чтобы полнее разобраться такие темы, как энергетические полосы и пространственная зависимость амплитуд). Кроме того, я никогда ранее не излагал эту тему таким образом, и отсутствие обратной связи ощущалось особенно остро. Теперь я считаю, что квантовую механику следовало бы давать попозже. Может быть, когда-нибудь мне представится возможность прочитать такой курс еще раз. Тогда я сделаю лучше.

В этих лекциях не рассматривались решения задач, так как для этого проводились семинарские занятия. Хотя первые три лекции я посвятил решению задач, они не вошли в эту книгу. Также была прочитана лекция об инерционной навигации. Эта тема естественно должна была следовать за темой «вращающиеся системы», но при издании, к сожалению, она была опущена. Пятую и шестую лекции прочитал Мэтью Сэндс, поскольку меня тогда не было в городе.

Конечно, можно спросить, насколько успешным оказался этот эксперимент. Моя собственная точка зрения весьма пессимистична — хотя ее не разделяют большинство работающих со студентами преподавателей. Не думаю, что я хорошо обходился со студентами. Когда я наблюдал, как студенты решают задачи на экзаменах, мне казалось, что вся система потерпела крах. Конечно, мои друзья сказали, что один-другой десяток студентов все-таки, как ни удивительно, усвоили почти все содержание лекций, очень активно работали над материалом и донимали преподавателей интересными и толковыми вопросами. Они получили первоклассную подготовку в физике, и именно к ним, в конце концов, и были обращены мои лекции. Впрочем, «обучение редко приносит плоды кому-либо, кроме тех, кто расположен к нему, но им оно почти не нужно» (Гиббон).

Все-таки я не хотел оставлять за бортом нашей работы ни одного студента, как, по-видимому, получалось. Как больше помочь студентам? Может быть более тщательно поработать над составлением задач, которые прояснили бы некоторые идеи этих лекций. Решение задач очень помогает усвоить материал лекций и сделать представленные идеи более реалистичными, более завершенными.

Думаю, однако, что эту педагогическую проблему нельзя решить, не поняв, что наилучшее обучение возможно только при непосредственном личном контакте между студентом и хорошим учителем. Студент должен иметь возможность обсуждать различные идеи, размышлять и высказывать свои мысли. Не-

возможно многому научиться, просто сидя на лекции, или даже просто решая предложенные задачки. Но в наше время мы должны обучить столько студентов, что приходится искать какую-то замену этому идеалу. Может быть, мои лекции помогут в этом. Надеюсь, те, кто имеет возможность учиться и преподавать в индивидуальном порядке, смогут почерпнуть из моих лекций какую-то пользу и какие-то идеи. Возможно, они получат удовольствие, вникая в них — или развивая их дальше.

Ричард Фейнман

Июнь 1963 г.



1

АТОМЫ В ДВИЖЕНИИ

Введение

Представляя этот двухгодичный курс физики, мы исходили из того, что вы, читатель, собираетесь быть физиком. Это, конечно, не обязательно, но это то, что предполагает каждый преподаватель по каждому предмету! Если вы собираетесь быть физиком, вам предстоит изучить очень многое — плоды двух сотен лет в самой быстро развивающейся области знания. Это так много, что вы, действительно, можете подумать, что это невозможно освоить за 4 года, и вы будете правы — придется еще идти в аспирантуру!

Как это ни удивительно, несмотря на колоссальную работу, которая была проделана за все это время, огромный объем ее результатов можно очень сильно сжать — выявив те *законы*, к которым сводятся все наши знания. И даже эти немногие законы так трудно усвоить, что было бы нечестно по отношению к вам начинать исследование этой обширной области, не снабдив вас некой картой или наброском взаимосвязи между различными частями науки. В соответствии с этими предварительными замечаниями, первые три главы будут содержать краткий очерк взаимоотношений физики с остальными науками, отношения наук друг к другу и значения науки как таковой. Это поможет «почувствовать» предмет.

Можно спросить, почему нельзя преподавать физику, просто перечислив основные законы на первой же странице, затем показывая, как они действуют во всех возможных случаях, как мы делаем в евклидовой геометрии, где мы устанавливаем аксиомы, а потом выводим разнообразные следствия. (Что же, не удовлетворенные четырехлетним курсом физики, вы хотите выучить ее за 4 минуты?) Мы не можем идти таким путем по двум

причинам. Во-первых, мы все еще *не знаем* всех основных законов: чем больше мы узнаем, тем больше встает вопросов. Во-вторых, точная формулировка законов физики предполагает использование некоторых очень нетривиальных идей, для описания которых требуется высшая математика. Поэтому необходима основательная предварительная подготовка уже для того, чтобы понять смысл *слов*. Нет, излагать физику таким образом невозможно. Можно давать ее лишь по частям.

Каждый шаг в изучении природы как целого — это всегда лишь *приближение* к совершенной истине, или к тому, что мы считаем совершенной истиной. На самом деле, все, что мы знаем, является тем или иным приближением, потому что *мы знаем, что не знаем еще всех законов*. Так что мы учимся лишь для того, чтобы разучиваться, или, точнее, переучиваться.

Основной принцип науки, почти что ее определение, гласит: *всякое знание проверяется экспериментально*. Эксперимент — *единственный судья* научной «истины». Но каков источник знания? Откуда берутся те законы, которые подлежат проверке? Эксперимент, сам по себе, помогает выводить эти законы, дает направление нашим догадкам. Но необходимо также *воображение*, чтобы, следуя этому направлению, прийти к глубоким обобщениям — чтобы угадать лежащие в основе чудесные, простые и неожиданные предположения. И затем — вновь путем эксперимента проверять их. Этот процесс воображения настолько непросто, что между физиками существует разделение труда: одни из них — *теоретики*, которые воображают, рассуждают и предполагают новые законы, но не экспериментируют. И есть физики-экспериментаторы, которые ставят опыты, воображают, рассуждают и отгадывают.

Мы сказали, что законы природы приближительны: что сначала мы открываем «неправильные» законы, а потом «правильные». Но как может эксперимент быть «неправильным»? Во-первых, по самой простой причине — если вы не заметили, что приборы не в порядке. Но это легко исправить, все проверяя и перепроверяя. Но, если не останавливаться на таких деталях, как результаты эксперимента *могут* быть ошибочными? Лишь будучи недостаточно точными. Например, масса предмета, по видимости, никогда не меняется: вращающийся волчок весит столько же, сколько неподвижный. Так был изобретен «закон»: масса постоянна и не зависит от скорости. Теперь установлено, что этот закон неверен. Оказалось, что масса растет с ростом

скорости, но заметное изменение требует скоростей, близких к скорости света. *Правильный* закон гласит: если предмет движется со скоростью меньшей, чем 100 миль в секунду, масса постоянна с точностью в одну миллионную. В такой приближенной форме данный закон верен. Так что можно подумать, что на практике нет существенной разницы между старым законом и новым. Это и верно, и неверно. Для обычных скоростей мы, конечно, можем забыть о новом законе и использовать старый закон постоянства массы как достаточно точный. Но при высоких скоростях мы будем получать неверные результаты, и чем больше скорость, тем больше будет ошибка.

В конце концов, что самое интересное, с *философской* точки зрения мы *в корне заблуждаемся* с самого начала, принимая приблизительный закон. Вся наша картина мира должна полностью измениться, даже если масса меняется хоть на чуточку. Это очень своеобразная особенность законов на уровне философского осмысления. Даже очень незначительный эффект иногда требует глубокого пересмотра наших воззрений.

Так с чего же мы должны начинать обучение? Должны ли мы предлагать *правильный*, но необычный закон, с его странными и трудными понятиями, например, теорию относительности, четырехмерное пространство-время и т. д.? Или же дать сначала простой закон «постоянства массы», который лишь приблизителен, зато не требует таких сложных понятий? Первый путь более приятный, заманчивый и мог бы доставить больше удовольствия, но со второго — проще начинать, и от него легче прийти к настоящему пониманию более сложных идей. Этот вопрос вновь и вновь встает при преподавании физики. На разных этапах мы будем решать его по-разному, но на любой ступени стоит учитывать уровень современных знаний, знать их точность, как это вписывается в общую картину и что может изменяться при дальнейшем развитии науки.

Итак, давайте перейдем к нашему очерку, или общей схеме, современного понимания науки (в частности, физики, но также и других близких к ней наук), чтобы впоследствии, когда мы сосредоточимся на каком-то вопросе, в нашем багаже уже было какое-то представление о том, почему это интересно, и как это вписывается в общую структуру.

Итак, *какова* же наша картина мира?

Вещество состоит из атомов

Если бы из-за некоей катастрофы все накопленные научные знания были бы уничтожены, и для последующих поколений живых существ сохранилось лишь одно предложение, то какое содержало бы наибольшую информацию при наименьшем количестве слов? Я считаю, что это — *атомная гипотеза* (или атомный факт, или как вам угодно его называть): *все тела состоят из атомов — маленьких частиц, которые пребывают в бесконечном движении и притягиваются друг к другу, когда их разделяет небольшое расстояние, но отталкиваются, если их прижимают плотнее друг к другу.* Как видите, в одном этом предложении огромное количество информации о мире, если только к нему приложить немного размышления и воображения.

Чтобы проиллюстрировать величие атомной идеи, представим себе каплю воды размером с полсантиметра. Даже очень пристально взглядевшись в нее, мы не увидим ничего, кроме воды, — однородной, сплошной воды. Даже если мы увеличим ее при помощи самого сильного из оптических микроскопов — примерно в 2000 раз, тогда капля воды станет размером в 10 метров, как большая комната, и если мы снова всмотримся в нее, то заметим маленькие шарики, плавающие туда-сюда. Очень интересно. Это парамеции. Можно задержаться на этом и так заинтересоваться парамециями с их извивающимися ресничками и гибкими тельцами, что не двигаться дальше (если только не захочется заглянуть внутрь них). Это, конечно, важно для биологии, но сейчас мы двинемся дальше и будем всматриваться в саму субстанцию воды, увеличив нашу каплю еще в 2000 раз. Теперь она примет размеры около 20 километров в поперечнике, и если мы вновь присмотримся к ней очень внимательно, то заметим какое-то хаотичное движение. Поверхность уже не будет гладкой — она будет выглядеть примерно как толпа на футбольном стадионе, если на нее смотреть с большой высоты. Чтобы разобраться, что это за хаос, мы увеличим еще в 250 раз и увидим нечто подобное тому, что изображено на рис. 1.1. Это капля воды при увеличении в миллиард раз, но упрощенная в нескольких аспектах. Частицы изображены, как нам привычнее, с четкими границами — это первая неточность. Во-вторых, для простоты, они изображены почти схематично в двухмерной проекции, тогда как они, конечно, движутся в трех

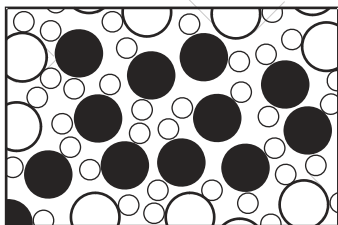


Рис. 1.1. Капля воды, увеличенная в миллиард раз

измерениях. На рисунке видны два вида «шариков» или кружочков, представляющих атомы кислорода (черные) и водорода (белые), каждый шарик кислорода соединен с двумя шариками водорода. (Каждая маленькая группа из атома кислорода с двумя атомами водорода называется молекулой.) Далее, картина упрощена в том отношении, что реальные частицы постоянно вибрируют и сталкиваются, поворачиваются и крутятся вокруг друг друга. Лучше представьте эту картину в движении, чем статичной. Еще одно обстоятельство, которое нельзя изобразить на рисунке, — это то, что в природе частицы «прилипают» друг к другу, что они притягиваются, эта тянет ту, и т. д. Вся группа как бы «склеена». С другой стороны, частицы не слишком тесно прижимаются друг к другу. Если попытаться прижать их слишком сильно, они оттолкнутся.

Радиус атомов 1 или 2×10^{-8} см. Отрезок в 10^{-8} см именуется ангстрем (просто другое название), так что мы говорим, что атомы имеют радиус 1 или 2 ангстрема (Å). Есть еще один способ представить себе их размер: если яблоко увеличить до размеров Земли, тогда атомы в яблоке сами станут размером с яблоко.

Вернемся к нашей капле воды со всеми этими склеенными вибрирующими частицами, тянущимися друг за другом. Вода сохраняет свой объем: она не распадается на части, вследствие притяжения молекул друг к другу. Если капля попадет на наклонную плоскость, по которой она сможет двигаться из одного места в другое, то она не исчезнет просто так, не разлетится на маленькие кусочки из-за молекулярного притяжения. Это хаотичное движение мы воспринимаем как *теплоту*: чем выше температура, тем интенсивнее движение. Если мы нагреваем воду, вибрация среди частиц усиливается, и промежутки между атомами увеличиваются. И если нагрев продолжается, то насту-

пает момент, когда притяжение между молекулами становится недостаточным для того, чтобы удерживать их вместе, и они действительно *разлетаются* и удаляются друг от друга. Конечно, так мы получаем из воды пар: при повышении температуры усиливается движение и частицы разлетаются.

На рис. 1.2 изображен пар. Это изображение неудачно в одном отношении: при обычном атмосферном давлении во всем помещении было бы не так много молекул воды, и уж точно их не набралось бы три штуки на таком промежутке, какой изображен на этом рисунке. Большинство квадратов такого размера не содержали бы ни одной молекулы. Но на картинке, чтобы она не была совсем пустой, нам изобразили две с половиной, или три молекулы. Рассматривая пар, мы можем увидеть характерные черты молекулы воды более четко. Для простоты на этом рисунке между атомами водорода дан угол 120° . На самом деле угол равен $105^\circ 3'$, а расстояние между центрами атомов кислорода и водорода равно $0,957 \text{ \AA}$, так что мы представляем эту молекулу довольно неплохо.

Давайте рассмотрим некоторые свойства водяного пара или любого другого газа. Молекулы, будучи отделены одна от другой, будут ударяться о стенки сосуда. Представьте себе комнату с кучей теннисных шаров (сто или больше), без конца прыгающих по ней. Град их ударов будет давить на стенки изнутри (так что нам придется придерживать их извне). Наши грубые органы чувств (их чувствительность ведь не увеличилась в миллиард раз) ощущают этот град ударов лишь как *обычный нажим*. Чтобы удерживать газ в каком-то объеме, мы должны приложить некоторое давление. На рисунке 1.3 показан обычный сосуд для содержания газов (использующийся во всех учебниках) — цилиндр с поршнем. В данном случае форма молекул воды не имеет значения, поэтому для простоты мы изобразим

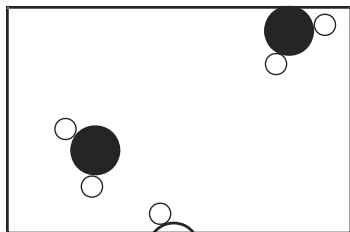


Рис. 1.2. Пар под микроскопом

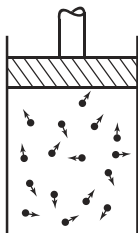


Рис. 1.3. Цилиндр с поршнем

их в виде теннисных мячиков или просто точек. Они непрерывно движутся во всех направлениях. Ударяясь о верхний поршень, множество молекул постоянно стремится вытолкнуть его из сосуда, и, чтобы воспрепятствовать этому, нам придется приложить к поршню определенную силу — *давление* (на самом деле сила — это давление, умноженное на площадь). Ясно, что сила пропорциональна площади, так как, если мы увеличим площадь, сохранив то же число молекул в кубическом сантиметре, то число столкновений с поршнем увеличится во столько раз, во сколько раз увеличилась площадь.

Теперь давайте поместим в тот же сосуд в два раза больше молекул, увеличив вдвое их плотность. Пусть их скорость (и, соответственно, температура газа) останется такой же. Тогда, в довольно строгом приближении, число столкновений удвоится, а поскольку каждое из них будет столь же «энергичным», как и раньше, то давление будет пропорционально плотности. Если принять во внимание истинный характер сил, действующих между атомами, мы могли бы ожидать небольшого снижения давления за счет увеличения притяжения между атомами, и небольшого роста давления из-за того, что они занимают конечный объем пространства. Тем не менее, с хорошей степенью точности, если плотность достаточно низкая и число атомов не слишком велико (т. е. при невысоких давлениях), *давление пропорционально плотности*.

Можно увидеть еще кое-что. Если мы повысим температуру газа (скорость атомов), не изменяя его плотности, что произойдет с давлением? Атомы будут с большей силой ударять о поршень, так как они движутся быстрее, и кроме того, ударять более часто, следовательно, давление возрастет. Вы видите, насколько просты идеи атомной теории.

Давайте рассмотрим другое явление. Предположим, что поршень двинулся внутрь, так что пространство, занимаемое атомами, медленно уменьшается. Что происходит, когда атом ударяется о движущийся поршень? Конечно, после удара его скорость повышается. Вы можете сами убедиться в этом, ударя мячик для настольного тенниса движущейся ракеткой, и вы увидите, что он отскакивает с большей скоростью, чем до удара. (Характерный пример: если случится, что атом будет неподвижен, и поршень ударит по нему, он, конечно, придет в движение.) Так что атомы, отлетев от поршня, становятся «горячее», чем были до столкновения с ним. Следовательно, возрастет скорость всех атомов, находящихся в сосуде. Это означает, что *если мы медленно сжимаем газ, его температура возрастает*. При медленном сжатии газа температура *возрастает*, при медленном расширении — *понижается*.

Теперь вернемся к нашей капле воды и пойдем в другом направлении. Допустим, что мы понижаем ее температуру. Тогда вибрация молекул воды будет постепенно снижаться. Мы знаем, что между атомами существуют силы притяжения, так что через какое-то время они уже не смогут так вибрировать. Что бывает при очень низкой температуре, показано на рис. 1.4: молекулы сплетаются в новый узор. Образовался лед. Это схематическое изображение льда неточно, поскольку двумерно, но все же оно дает правильное представление. Интересно, что в веществе *каждый атом занимает определенное место*. Можно легко представить, что если бы нам удалось каким-то образом расположить все атомы на одном конце нашей капли в некотором порядке, то, в силу жесткой структуры атомных связей на другом конце в километрах отсюда (при нашем увеличении) атомы также займут строго определенное положение. Поэтому если мы потянем ледяную сосульку за один конец, другой ее конец не отделится, в отличие от воды, атомы которой беспорядочно движутся во всех направлениях. Таким образом, отличие между твердыми телами и жидкостями заключается в том, что в первых атомы выстроены в особом порядке, именуемом *кристаллической решеткой*, так что положение атомов на одном конце кристалла находится в строгой зависимости от расстановки атомов на противоположном конце, даже если их разделяют миллионы других атомов. На рис. 1.4 показана расстановка молекул льда, и хотя она отражает кое-какие свойства льда, в реальности порядок иной. Одно из характерных