

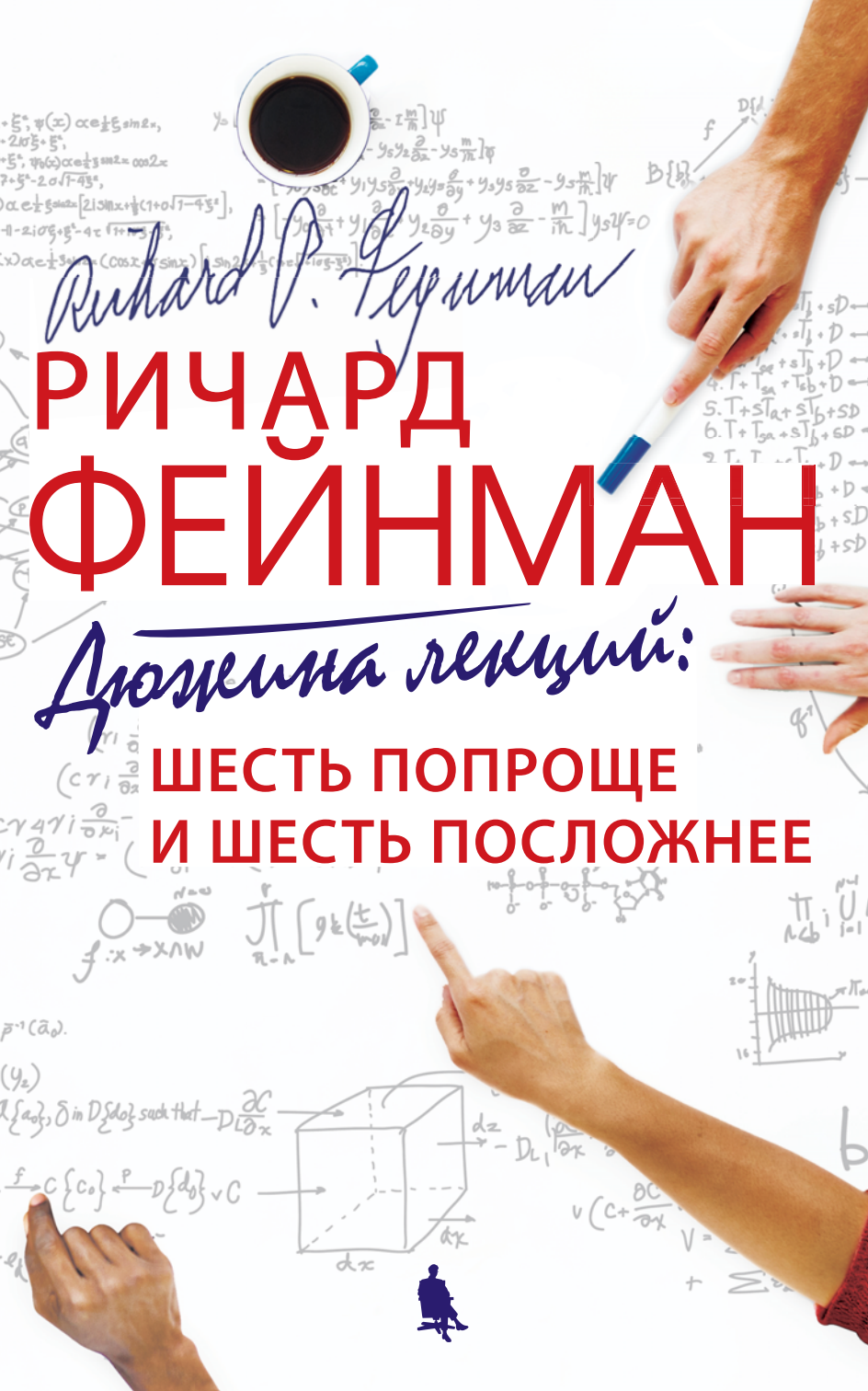


Richard P. Feynman

РИЧАРД ФЕЙНМАН

Дюжина лекций:

ШЕСТЬ ПОПРОЩЕ И ШЕСТЬ ПОСЛОЖНЕЕ



**ДЮЖИНА ЛЕКЦИЙ:
ШЕСТЬ ПОПРОЩЕ
И ШЕСТЬ ПОСЛОЖНЕЕ**

SIX EASY PIECES

*Essentials of Physics
Explained by Its Most
Brilliant Teacher*

RICHARD P.
FEYNMAN

*Originally prepared for publication by
Robert B. Leighton and Matthew Sands*

New Introduction by Paul Davies

BASIC BOOKS

A MEMBER OF THE PERSEUS BOOKS GROUP

New York

SIX NOT-SO-EASY PIECES

*Einstein's
Relativity, Symmetry
and Space-Time*

RICHARD P.
FEYNMAN

*Originally prepared for publication by
Robert B. Leighton and Matthew Sands*

New Introduction by Roger Penrose

BASIC BOOKS

A MEMBER OF THE PERSEUS BOOKS GROUP

New York

РИЧАРД ФЕЙНМАН

ДЮЖИНА ЛЕКЦИЙ:

ШЕСТЬ ПОПРОЩЕ
И ШЕСТЬ ПОСЛОЖНЕЕ

8-е издание

Перевод с английского
Е. В. Фалёва и В. А. Носенко



Москва
Лаборатория знаний

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. — 8-е изд. — М. : Лаборатория знаний, 2018. — 318 с. : ил.

ISBN 978-5-00101-127-9

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

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)

Научное издание

Фейнман Ричард

**ДЮЖИНА ЛЕКЦИЙ:
ШЕСТЬ ПОПРОЩЕ И ШЕСТЬ ПОСЛОЖНЕЕ**

Ведущий редактор *Б. И. Копьлов*. Редактор *А. Н. Евсеевичева*
Художник *В. А. Прокудин*. Компьютерная верстка *В. А. Носенко*

Подписано в печать 21.11.17. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 20,00. Заказ

Издательство «Лаборатория знаний»

125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3

Телефон: (499) 157-5272, e-mail: info@pilotLZ.ru, <http://www.pilotLZ.ru>

ISBN 978-5-00101-127-9

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
© Лаборатория знаний, 2018

Оглавление

1. Шесть простых фрагментов

От издателя	11
<i>Поль Дэвис</i> . Введение	12
<i>Дэвид Л. Гудстейн, Гери Нойгебауэр</i> . Специальное предисло- вие	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
<i>Роджер Пенроуз</i> . 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.*

Введение

Существует распространенное заблуждение, что наука — совершенно безличное, бесстрастное и полностью объективное занятие. В то время как большая часть прочих видов человеческой деятельности находится во власти моды, преходящих увлечений и особенностей личностей, науку считают подчиненной принятым точным методам и тщательной проверке. Имеют значение только результаты, но не люди, которые их получают.

Это, конечно, явная бессмыслица. Наука делается людьми, как и любое другое человеческое начинание, и также подвержена влиянию моды и личного вкуса. Правда, моду здесь устанавливает не выбор предмета обсуждения, а способ, каким ученые мыслят о мире. Каждый век вырабатывает свой собственный подход к научным проблемам, обычно следуя примеру некоторых ярких личностей, которые и ставят главные вопросы, и определяют наилучшие способы их решения. Случается, что ученый достигает достаточного положения в обществе и становится известен широкой публике, и если при этом он действительно обладает выдающимися способностями, то может стать образцом для подражания во всем научном сообществе. В прежние века таким образцом был Исаак Ньютон. Ньютон олицетворял ученого-джентльмена — с большими связями в высшем свете, глубоко религиозного, неторопливого и методичного в своей работе. Его стиль научной работы оставался образцом на протяжении двух столетий. В первой половине XX века Альберт Эйнштейн заменил Ньютона в роли популярного образа ученого. Эксцентричный, растрепанный, родом из Германии, рассеянный, полностью погруженный в свою работу, и при этом идеальный абстрактный мыслитель, Эйнштейн изменил прежний подход к физике, поставив вопрос о самих понятиях, определяющих ее как предмет.

Ричард Фейнман стал образцом для подражания в физике второй половины XX столетия — первым американцем, достигшим такого статуса. Родившийся в Нью-Йорке в 1918 г. и получивший образование на Восточном побережье, он опоздал для того, чтобы принять участие в Золотом Веке физики, который в первые три десятилетия этого века изменил наше видение мира в ходе двойной революции, ознаменовавшейся открытием теории относительности и квантовой механики. Эти стремительные прорывы заложили основание той системы взглядов, которую мы ныне называем Новой Физикой. Фейнман отталкивался от этих уже заложенных основ и участвовал в возведении «первого этажа» Новой Физики. Его вклад касался почти каждого ее аспекта и оказал существенное влияние на характер видения мира.

Фейнман был физиком-теоретиком по преимуществу. Ньютон был экспериментатором и теоретиком в равной мере. Эйнштейн просто-напросто пренебрегал экспериментом, предпочитая опираться на чистую мысль. Фейнману довелось развить глубоко теоретическое понимание природы, но он всегда оставался в тесной связи с реальным и часто неприглядным миром экспериментальных результатов. Никто из тех, кто видел, как Фейнман выяснил причину катастрофы космического челнока Челленджер, погрузив эластичную ленту в ледяную воду, не мог бы сомневаться в том, что имеет дело со специалистом по зрелищам и одновременно весьма практичным мыслителем.

Первоначально Фейнман сделал себе имя работой над теорией субатомных частиц, а именно в области так называемой квантовой электродинамики, или КЭД, с которой фактически начиналась квантовая теория. В 1900 г. немецкий физик Макс Планк предположил, что свет и прочее электромагнитное излучение, которое до того рассматривалось как волны, парадоксальным образом ведет себя при взаимодействии с веществом подобно миниатюрным сгусткам энергии, или «квантам». Именно эти кванты стали впоследствии называть фотонами. К началу 1930-х гг. архитекторы новой квантовой механики разработали математическую схему, способную описать эмиссию и поглощение фотонов электрически заряженными частицами, такими как электроны. Хотя эта ранняя версия КЭД достигла некоторых успехов, данная теория имела явные изъяны. Во многих случаях вычисления давали абсурдные и даже бесконечные ответы на хорошо поставленные физические вопросы.

[. . .]

Специальное предисловие

(из «Лекций по физике»)

К концу жизни Ричарда Фейнмана его слава вышла далеко за пределы научного сообщества. Его деятельность в роли члена комиссии по расследованию катастрофы космического челнока Челленджер придала ему широкую известность; аналогичным образом книга-бестселлер о его авантурных приключениях сделала его народным героем, почти в той же степени, что Альберта Эйнштейна. Но и в 1961 году, до того, как Нобелевская премия привлекла к нему внимание широкой публики, Фейнман был более чем только известен среди членов научного сообщества — он был легендарной личностью. Несомненно, его выдающийся дар наставника способствовал распространению и обогащению легенды о Ричарде Фейнмане.

Он был воистину великим преподавателем, возможно, величайшим в свою эпоху и в нашу. Для Фейнмана лекционная аудитория была театром, а лектор — исполнителем роли, который должен не только сообщить факты и сведения, но и произвести впечатление игрой и блеском ума. Он бродил перед аудиторией, размахивая руками, «невероятная смесь физика-теоретика и циркового зазывалы, весь — движение и звук», как писала «Нью-Йорк Таймс». Обращался ли он к аудитории студентов, коллег, или к широкой публике, для всех, кому посчастливилось присутствовать на лекциях Фейнмана, опыт был неожиданным и всегда незабываемым, как и сам этот человек.

Он был мастером высокой драмы, обладая даром приковывать к себе внимание любой аудитории. Много лет назад он вел курс по высшей квантовой механике для большого класса, состоявшего из нескольких выпускников и большей части студентов физического факультета КАЛТЕХ'а. На одной из лекций Фейнман начал объяснять, как представить сложные определенные интегралы с помощью диаграмм: время по этой оси,

пространство — по той, волнистая линия для этой прямой, и т. д. Описав то, что в мире физики называется диаграммой Фейнмана, он повернулся к классу лицом с озорной ухмылкой: «Вот это и называется “ДИАГРАММОЙ”»*. Наступила развязка, и зал разразился стихийными аплодисментами.

В течение многих лет после того, как были прочитаны лекции, составившие эту книгу, Фейнман от случая к случаю выступал с лекциями по курсу физики для первокурсников КАЛТЕХ'а. Естественно, его появления должны были держаться в тайне, чтобы в аудитории оставалось хоть какое-то место для зарегистрированных студентов. Темой одной из таких лекций было искривленное пространство-время, и Фейнман был как всегда великолепен. Но незабываемый момент случился в начале лекции. Тогда только что была открыта сверхновая 1987 года, и Фейнман был очень захвачен этим событием. Он сказал: «У Тихо Браге была своя сверхновая, и у Кеплера своя. И с тех пор их не было 400 лет. Но теперь и у меня есть своя». Аудитория застыла в полной тишине, и Фейнман продолжил: «В галактике 10^{11} звезд. Раньше это было *огромным* числом. Но это всего лишь сто миллиардов. Это меньше, чем дефицит национального бюджета! Раньше мы называли такие числа астрономическими. Теперь следовало бы называть их *экономическими*». Слушатели разразились смехом, и Фейнман, овладев вниманием аудитории, приступил к лекции.

Оставляя в стороне его умение произвести эффект на публику, педагогические приемы Фейнмана были просты. Квинтэссенция его преподавательских принципов была обнаружена среди его бумаг в архиве КАЛТЕХ'а, в записке, которую он нацарапал для себя в Бразилии в 1952 г.:

«Во-первых, уясни себе, почему ты хочешь, чтобы студенты узнали об этой теме, и что именно ты хочешь им сообщить, и метод сам выльется из здравого смысла».

То, что для Фейнмана было «здравым смыслом», зачастую оказывалось блестящим приемом, легко схватывающим суть проблемы. Однажды, во время публичной лекции, он пытался объяснить, почему невозможно подтвердить истинность идеи, используя те же данные, на основе которых она возникла. По видимости отклоняясь от темы, Фейнман начал говорить об автомобильных номерах: «Вы знаете, сегодня вечером со мной

* «And this is called *THE* diagram!»

приключилась удивительная вещь: я шел сюда, на лекцию, и проходил через парковку. И вы не поверите, что произошло. Я увидел машину с номером ARW 357. Вы можете себе представить? Из всех миллионов машинных номеров в стране, какова была вероятность того, что сегодня вечером я увижу именно этот номер? Поразительно!» Так при помощи Фейнмановского «здорового смысла» был прояснен вопрос, который даже многие ученые не могли понять.

После 35 лет преподавания в КАЛТЕХ'е (с 1952 по 1987) за Фейнманом числилось 34 прочитанных курса. 25 из них были высшими курсами строго для аспирантов, хотя студенты также просили разрешения посещать их (и часто посещали, так как разрешение почти всегда выдавалось). Оставшаяся часть — были вводные курсы для аспирантов. Лишь однажды Фейнман читал курсы именно для студентов и это было знаменательным событием в 1961/1962 и 1962/1963 учебных годах, с кратким повторением в 1964, когда он прочел те самые лекции, которые стали «Фейнмановскими лекциями по физике».

В то время в КАЛТЕХ'е существовало мнение, что студентов первого и второго курсов обязательный курс физики скорее оттолкнет, чем воодушевит. Чтобы исправить это положение, Фейнмана попросили подготовить такой цикл лекций для начинающих студентов — один год для первокурсников и второй год для них же, ставших второкурсниками. Когда он согласился, сразу же было решено, что лекции должны быть записаны для публикации. Никто не мог предположить, насколько сложной окажется эта работа. Подготовка книги к публикации потребовала огромных усилий от его коллег, равно как и от самого Фейнмана, который осуществлял окончательное редактирование каждой главы.

Также нужно было, чтобы кто-то взял на себя работу по организации курса. Эта задача была весьма осложнена тем, что никогда нельзя было заранее знать, о чем именно будет говорить Фейнман, пока он не появится перед аудиторией и не начнет лекцию. Профессора КАЛТЕХ'а, ассистировавшие ему, должны были затем лезть из кожи вон, чтобы уладить формальности вроде подготовки заданий для студентов и т. д.

Зачем Фейнман посвятил более двух лет коренной переработке методики преподавания основ физики? Об этом можно лишь догадываться, но, вероятно, для этого были три основные причины: во-первых, он любил выступать на публике, а это давало

ему бóльшую аудиторию, чем его обычные лекции для аспирантов; во-вторых, он искренне заботился о студентах, и попросту считал обучение первокурсников важным делом; третьей и, возможно, самой главной причиной была важная для него задача изложить физику, как он ее понимал, в такой форме, чтобы она была доступна молодым студентам. Это было его коньком и тем стандартом, которым он мерил, действительно ли им понятен некоторый вопрос. Однажды член факультета КАЛТЕХ'а попросил Фейнмана объяснить, почему частицы со спином $1/2$ подчиняются статистическим правилам Ферми—Дирака. Он измерил аудиторию пристальным взглядом и ответил: «Я подготовлю об этом лекцию для первокурсников». Но через несколько дней он заявил: «Вы знаете, я не могу этого сделать. Я не могу свести это до уровня первокурсников. Значит, мы не понимаем этого по-настоящему».

Этот его дар сводить глубокие идеи к простым, понятным терминам легко прослеживается на протяжении всех «Фейнмановских лекций по физике», но особенно в его трактовке квантовой механики. Специалисты в этой области могут оценить проделанный им труд. Он представил для начинающих студентов свой метод решения функциональных интегралов вдоль траекторий, разработанную им технику, позволившую ему разрешить одну из глубочайших проблем физики. Его собственная работа с использованием решения интегралов вдоль траекторий принесла ему Нобелевскую премию, которую он разделил в 1965 г. с Джулианом Швингером и Син-Итеро Томанагой.

Многие из бывших студентов, посещавших его лекции, по прошествии многих лет говорят, что два года занятий физикой с Фейнманом были для них событием, которое представляется раз в жизни. Но тогда это не было так очевидно. Многие из студентов испытывали боязнь перед занятиями, и по мере чтения лекций посещаемость зарегистрированных студентов стала пугающе падать. Но в то же время все больше и больше других студентов и аспирантов начинали посещать лекции. Лекционный зал оставался полным, и Фейнман так никогда и не узнал, что он теряет часть первоначальной аудитории. Но даже с точки зрения самого Фейнмана его педагогическое начинание не оказалось успешным. В 1963 г. он написал в предисловии к «Лекциям»: «Не думаю, что я очень хорошо справился со своей задачей». Перечитывая эти лекции, иногда кажется, что чувствуешь взгляд Фейнмана за своим плечом — но он обращен

не к его молодой аудитории, а напрямую к его коллегам, как бы говоря: «Вот! Смотрите, как я ловко обошелся с этой проблемой! Разве я не молодец?» Но даже тогда, когда ему казалось, что он совершенно четко объясняет что-то перво- или второкурсникам, не им это приносило наибольшую пользу. Главными ценителями его великих достижений были люди его же уровня — ученые, физики, профессора — которые имели возможность увидеть физику через призму свежей и динамичной точки зрения Ричарда Фейнмана.

Фейнман был более чем великим наставником. Его дар заключался в том, что он был выдающимся наставником преподавателей. Если бы целью «Фейнмановских лекций по физике» было подготовить определенный круг молодых студентов к сдаче экзамена по физике, то нельзя было бы сказать, что ему это особенно хорошо удалось. Более того, если бы эти лекции предназначались, чтобы стать основой вводного учебника по физике для университетов, пришлось бы сказать, что он не справился с такой задачей. Тем не менее, эти лекции были переведены на 10 иностранных языков, существуют также четыре двуязычных издания. Сам Фейнман считал, что его важнейшим вкладом в физику будет не КЭД или теория сверхтекучего гелия, или поляронов, или партонов. Его самым выдающимся вкладом будут эти три красные книги «Фейнмановских лекций по физике». Поэтому нет никаких сомнений в ценности настоящего памятного издания прославленных книг.

*Дэвид Л. Гудстейн
Гери Нойгебауэр*

Калифорнийский
технологический институт

Апрель 1989 г.

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 разобрать 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 получше.

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).

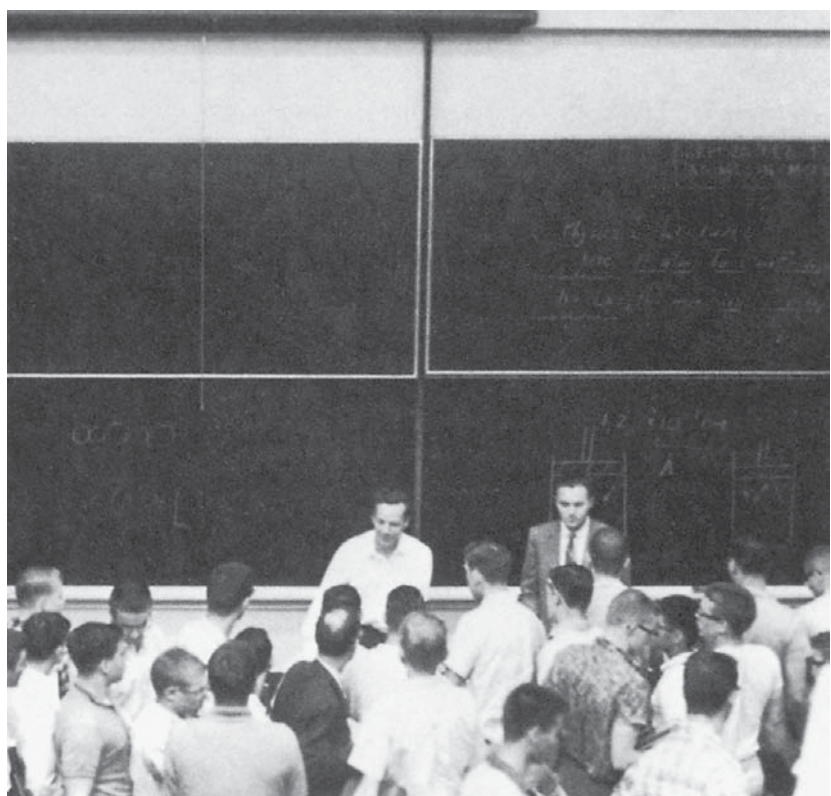
Все-таки я не хотел оставлять за бортом нашей работы ни одного студента, как, по-видимому, получалось. Как больше помочь студентам? Может быть более тщательно поработать над составлением задач, которые прояснили бы некоторые идеи этих лекций. Решение задач очень помогает усвоить материал лекций и сделать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

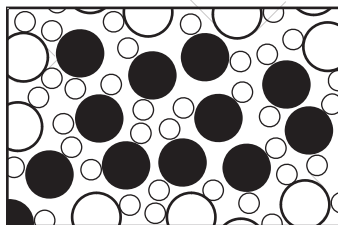


Рис. 1.1. Капля воды, увеличенная в миллиард раз

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

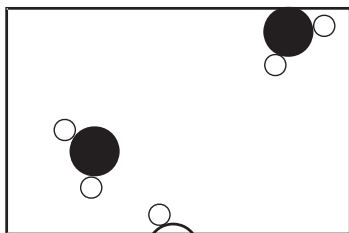


Рис. 1.2. Пар под микроскопом

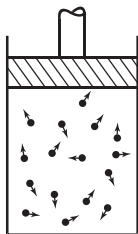


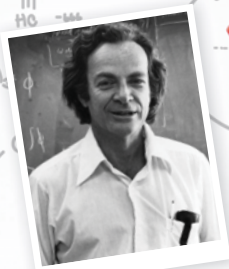
Рис. 1.3. Цилиндр с поршнем

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.

[. . .]



РИЧАРД ФЕЙНМАН

Имя выдающегося американского физика-теоретика, лауреата Нобелевской премии Ричарда Фейнмана (1918–1988), широко известно во всем мире. Одним из итогов его работ стали многотомные «Фейнмановские лекции по физике». На русском языке в полном объеме они были изданы более 40 лет назад и сегодня, по сути – библиографическая редкость.

Цель настоящего издания – в некоторой степени восполнить этот пробел. В книгу включены 12 избранных лекций Р. Фейнмана, прочитанных им в Калифорнийском технологическом институте и посвященных актуальным проблемам современной физики.

Эта книга наверняка будет интересна не только специалистам и студентам вузов, но – учитывая простоту и доступность изложения – и старшеклассникам, увлекающимся наукой.

