

РИЧАРД ФЕЙНМАН

*КЭД – СТРАННАЯ ТЕОРИЯ
СВЕТА И ВЕЩЕСТВА*



*ИЗДАТЕЛЬСТВО АСТ
МОСКВА*

УДК 53(73)
ББК 22.3г
Ф31

Серия «Эксклюзивная классика»

Richard P. Feynman

**QED: THE STRANGE THEORY OF LIGHT
AND MATTER**

Перевод с английского *С.Г. Тиходеева, О.Л. Тиходеевой*

Под редакцией действительного члена Академии наук *Л.Б. Окуня*

Серийное оформление и компьютерный дизайн *Е. Фереэ*

Печатается с разрешения издательства Princeton University Press
при содействии литературного агентства Synopsis.

Фейнман, Ричард.

Ф31 КЭД — странная теория света и вещества / Ричард Фейнман ; [пер. с англ. С. Г. Тиходеева, О.Л. Тиходеевой]. — Москва : Издательство АСТ, 2023. — 208 с. — (Эксклюзивная классика).

ISBN 978-5-17-982850-1

Американский физик Ричард Фейнман — один из создателей атомной бомбы, специалист по квантовой электродинамике, Нобелевский лауреат, но прежде всего — незаурядная, многогранная личность, не вписывающаяся в привычные рамки образа «человека науки». Великолепный оратор, он превращал каждую свою лекцию в захватывающую интеллектуальную игру. На его выступления рвались не только студенты и коллеги, но и люди просто увлеченные физикой.

В основу этой книги легли знаменитые лекции Ричарда Фейнмана, прочитанные им в Калифорнийском университете.

В этих лекциях прославленный физик рассказывает о квантовой электродинамике — теории, в создании которой принимал участие он сам, — рассказывает простым и доступным языком, понятным даже самому обычному читателю.

Не зря даже о самом первом, принстонском издании «КЭД» критики писали: «Книга, которая полностью передает захватывающий и остроумный стиль Фейнмана, сделавшего квантовую электродинамику не только понятной, но и занимательной!»

УДК 53(73)
ББК 22.3г

© Richard P. Feynman, 1985

© Перевод. С. Тиходеев, 2012

ISBN 978-5-17-982850-1

© Издание на русском языке AST Publishers, 2023



Richard P. Feynman

Уникальный автограф знаменитой диаграммы Фейнмана, подписанный самим Фейнманом; изображение любезно предоставил Дж. М. Пасачофф (Jay M. Pasachoff, Fields Memorial Professor of Astronomy at Williams College). Диаграмма была изображена на первых страницах его экземпляра первого издания КЭД.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Книга, которую Вы держите в руках, уникальна. Ее автор — замечательный физик-теоретик, один из главных создателей современной квантовой электродинамики — рассказал об основах этой науки с необыкновенным мастерством.

Хотя лекции, составившие книгу, были адресованы гуманитариям, книгу, без сомнения, с живым интересом и большой пользой для себя прочтут и старшеклассник, и студент-физик, и преподаватель физики, и физик-профессионал.

Узнав о готовящемся русском издании, Ричард Фейнман прислал письмо, содержащее некоторые исправления и уточнения исходного английского текста. Все они учтены при переводе.

Когда книга была еще в производстве, пришло печальное известие о кончине 15 февраля 1988 г. замечательного физика-теоретика нашего столетия, великого физика-педагога Ричарда Фейнмана.

Л. Б. Окунь

ПРЕДИСЛОВИЕ ЛЕОНАРДА МОТНЕРА

Чтение лекций «Памяти Эликс Дж. Мотнер» было организовано в честь моей жены Эликс, скончавшейся в 1982 г. Эликс занималась английской литературой, но неизменно проявляла интерес ко многим областям науки. Поэтому и был создан фонд ее имени в целях ежегодного проведения цикла лекций, которые приобщали бы думающих и заинтересованных людей к идеям и достижениям науки.

Я очень рад, что Ричард Фейнман согласился прочитать первый цикл лекций. Мы дружим уже 55 лет, с самого детства в Фар-Рокуэй, штат Нью-Йорк. Ричард был знаком с Эликс около 22 лет, и ей давно хотелось, чтобы он составил такое объяснение физики элементарных частиц, которое было бы понятно ей и другим неспециалистам.

В дополнение я хотел бы выразить свою благодарность тем, кто принял участие в создании Фонда Эликс Дж. Мотнер и сделал возможным проведение этих лекций.

Лос-Анджелес, Калифорния, май 1983 г.

ВСТУПЛЕНИЕ РАЛЬФА ЛЕЙТОНА

Ричард Фейнман стал легендарным в мире физики из-за своего особого взгляда на мир: ничего не принимая на веру и обдумывая каждую вещь заново, он часто достигает оригинального и глубокого понимания природы, причем его стиль отличают свежесть и элегантная простота.

Он известен также как энтузиаст преподавания физики. Фейнман, отклонявший бесчисленное множество предложений произнести речь в престижном обществе или организации, может быть «легкой добычей» для студента, который, проходя мимо его кабинета, попросит выступить в физическом клубе местной школы.

Эта книга представляет собой рискованную затею, на которую, насколько нам известно, никто еще не решался. Это честное прямое объяснение непрофессиональной аудитории довольно сложного предмета — квантовой электродинамики. Она задумана таким образом, чтобы дать заинтересованному читателю правильное представление о типе рассуждений, к которым прибегают физики, чтобы объяснить поведение Природы.

Если вы собираетесь изучать физику (или уже изучаете), вы не найдете в этой книге ничего такого, что придется «переучивать». Это полное описание,

точное в каждой детали, некоего каркаса, на который новые, усовершенствованные концепции лягут без изменений. Для тех из вас, кто уже изучал физику, это будет открытием того, что же вы *в действительности* делали, производя сложные вычисления!

В детстве Ричарда Фейнмана вдохновила на занятия математическим анализом книга, которая начиналась так: «То, что может сделать один глупец, может и другой». Он хотел бы обратиться к своим читателям с похожими словами: «То, что может понять один глупец, может и другой».

Пасадина, Калифорния, февраль 1985 г.

ОТ АВТОРА

Эта книга представляет собой запись лекций по квантовой электродинамике, прочитанных мною в Калифорнийском университете. Лекции записаны и отредактированы моим добрым другом Ральфом Лейтоном. Надо сказать, что рукопись претерпела значительные изменения. Преподавательский и писательский опыт мистера Лейтона оказался очень ценным, когда мы предприняли попытку ознакомить широкую аудиторию с этим центральным разделом физики.

Часто в «популярных» изложениях науки кажущаяся простота достигается за счет описания чего-то совсем другого, за счет существенного искажения того, что берется описывать. Уважение к нашему предмету не позволило нам этого сделать. Мы провели в обсуждениях много часов, стараясь добиться максимальной ясности и простоты, и бескомпромиссно отвергали искажения истины.

Лекция 1

ВВЕДЕНИЕ

Эликс Мотнер очень интересовалась физикой и часто просила меня что-нибудь ей объяснить. Я все хорошо объяснял (так же, как я объясняю студентам в Калтехе, когда они приходят ко мне по четвергам), но в итоге я так и не смог рассказать самого для меня интересного: мы каждый раз застревали на сумасшедших идеях квантовой механики. Я говорил ей, что не могу объяснить это за час или за вечер — на это потребуется много времени, — но я обещал, что когда-нибудь подготовлю цикл лекций на эту тему.

Я подготовил несколько лекций и отправился проверить их в Новую Зеландию — потому что Новая Зеландия далеко, и если бы лекции не имели успеха, это было бы ничего! В Новой Зеландии решили, что лекции хорошие. Итак, вот лекции, которые я на самом деле подготовил для Эликс, но, к несчастью, теперь я не могу обратиться непосредственно к ней.

Я хотел бы рассказать про *известное* в физике, а не про неизвестное. Обычно люди интересуются новейшими достижениями, которые позволяют перейти от одной теории к другой, так что не удастся рассказать хоть что-нибудь про теорию, с которой мы как следует разобрались. Они всегда хотят знать то, чего мы сами не знаем. Поэтому вместо того, чтобы запутать вас множеством полуготовых малоизученных теорий,

я хотел бы рассказать о предмете, исследованном весьма досконально. Я люблю эту область физики и считаю ее замечательной. Она называется квантовой электродинамикой, или, сокращенно, КЭД.

Основная задача моих лекций — как можно точнее описать странную теорию взаимодействия света и вещества или, точнее, взаимодействия света и электронов. Чтобы объяснить все, что я хочу, потребуется много времени. Но у нас впереди четыре лекции, так что я не буду торопиться, и мы во всем разберемся.

История физики состоит в синтезировании на основе множества явлений нескольких теорий. Например, с давних пор были известны тепловые, световые, звуковые явления, движение и гравитация. Однако после того как сэр Исаак Ньютон объяснил законы движения, оказалось, что некоторые из этих на первый взгляд не связанных вещей — разные стороны одного и того же явления. Например, звуковые явления — это не что иное, как движение атомов воздуха. Так что звук перестали считать чем-то отдельным от движения. Обнаружилось также, что и тепловые явления легко объясняются законами движения. Таким образом, огромные разделы физики сливались в более простую теорию. С другой стороны, гравитацию не удавалось объяснить законами движения, и даже сегодня она стоит обособленно от всех прочих теорий. Гравитацию пока нельзя объяснить никакими другими явлениями.

За синтезом явлений движения, тепла и звука последовало открытие целого ряда явлений, которые мы называем электрическими и магнитными. В 1873 г. Джеймс Кларк Максвелл объединил их со световыми и оптическими явлениями и создал единую теорию, в которой свет рассматривается как электромагнитная волна. Итак, на этой стадии существовали зако-

ны движения, законы электромагнетизма и законы гравитации.

Примерно в 1900 г. была создана теория, объясняющая, что такое вещество. Она получила название электронной теории вещества и гласила, что внутри атомов находятся маленькие заряженные частицы. Развитие этой теории привело к пониманию того, что электроны движутся вокруг тяжелых ядер.

Все попытки объяснить вращение электронов вокруг ядра законами механики — теми же, при помощи которых Ньютон вычислял движение Земли вокруг Солнца, — оказались неудачными. Ни одно предсказание не подтвердилось. (Между прочим, теория относительности, которую вы все считаете великой революцией в физике, разрабатывалась приблизительно в это же время. Но по сравнению с этим открытием — что законы движения Ньютона не годятся для атомов — теория относительности была всего лишь незначительным усовершенствованием.) Выработка новой системы взглядов, способной заменить законы Ньютона, заняла долгое время, так как все, что происходило на атомном уровне, казалось очень странным. Надо было расстаться со здравым смыслом, чтобы представить себе, что же происходит на атомном уровне. Наконец, в 1926 г. была разработана «бредовая» теория, объяснявшая «новый тип поведения» электронов в веществе. Она только казалась сумасшедшей. Ее называли квантовой механикой. Слово «квантовая» относится к той странной особенности природы, которая противоречит здравому смыслу. Про эту особенность я и собираюсь вам рассказать.

Квантовая механика объяснила, кроме того, всевозможные частные проблемы, например, почему при соединении атома кислорода с двумя атомами водорода получается вода и т. д. Таким образом, кван-

товая механика легла в основу теории химии. Так что фундаментальная теоретическая химия — это на самом деле физика.

Квантовая механика была замечательным достижением, так как смогла объяснить всю химию и различные свойства веществ. Но по-прежнему оставалась нерешенной проблема взаимодействия света и вещества. То есть требовалось изменить теорию электричества и магнетизма Максвелла, чтобы привести ее в соответствие со вновь разработанными принципами квантовой механики. И вот, наконец, в 1929 г. рядом физиков была создана новая теория — квантовая теория взаимодействия света и вещества, получившая ужасное название «квантовая электродинамика».

К несчастью, у этой теории был серьезный недостаток. Если вы считали что-то приближенно, ответ получался разумным. Но если вы пытались посчитать более точно, оказывалось, что поправка, которая, казалось бы, должна быть незначительной (например, следующий член ряда), была в действительности большой и даже очень большой. В действительности она равнялась *бесконечности*. Так что получалось, что *ничего* нельзя посчитать с высокой точностью.

Кстати, все, что я вам сейчас рассказал, представляет собой пример того, что я называю «история физики глазами физика», — а она всегда неправильна. Я передаю вам весьма условный миф, который физики рассказывают своим студентам, а эти студенты — своим студентам, и все это совсем не обязательно имеет отношение к реальному историческому развитию, которого я в действительности не знаю!

Но продолжим нашу «историю». Используя теорию относительности, Поль Дирак разработал релятивистскую теорию электрона, которая не учитывала всех эффектов взаимодействия электрона со светом.

Согласно теории Дирака электрон обладает магнитным моментом — как маленький магнетик, равным точно 1 в определенных единицах измерения. Затем примерно в 1948 г. экспериментаторы открыли, что действительная величина ближе к 1,00118 (с погрешностью около 3 в последней цифре). Поскольку, конечно, было известно, что электроны взаимодействуют со светом, ожидали небольшой поправки. Ожидали также, что эту поправку можно будет объяснить с точки зрения новой теории квантовой электродинамики. Но когда произвели вычисления, то вместо 1,00118 получили бесконечность — что, разумеется, противоречит опыту!

Проблема вычислений в квантовой электродинамике была решена Джулианом Швингером, Синьитиро Томонагой и мною примерно в 1948 г. Швингер первым посчитал поправку, используя некую хитрость. Его теоретическая оценка была равна приблизительно 1,00116. Она оказалась достаточно близка к экспериментальным данным и подтвердила правильность избранного нами пути. Наконец у нас появилась квантовая теория электричества и магнетизма, при помощи которой мы могли считать! Эту теорию я собираюсь вам описать.

Квантовая электродинамика существует уже свыше пятидесяти лет. Она многократно подвергалась все более и более тщательной проверке во все более разнообразных условиях. В настоящее время я могу с гордостью сказать, что между экспериментом и теорией *нет существенных расхождений!*

Эту теорию, можно сказать, прокрутили в центрифуге, и она выдержала испытание на прочность. Приведу несколько последних данных. Эксперименты дают для числа Дирака 1,00115965221 (с погрешностью около 4 в последнем знаке), а теория —

1,00115965246 (с примерно в пять раз большей погрешностью). Чтобы вы смогли оценить точность этих чисел, представьте себе, что вы измерили расстояние от Лос-Анджелеса до Нью-Йорка с точностью до толщины человеческого волоса. Вот с какой точностью была проверена квантовая электродинамика за последние пятьдесят лет — как теоретически, так и экспериментально. Между прочим, я привел вам только один пример. И многие другие величины, измеренные со сравнимой точностью, также очень хорошо согласуются с теорией. Теория проверялась в диапазоне расстояний от ста размеров земного шара до одной сотой атомного ядра. Я привожу эти числа, чтобы заставить вас поверить, что теория не так уж плоха! Впоследствии я расскажу, как делались эти вычисления.

Я хотел бы еще раз поразить вас огромным диапазоном описываемых квантовой электродинамикой явлений. Проще сказать иначе: теория описывает *все* явления физического мира, за исключением гравитации — того, что удерживает вас на ваших местах (на самом деле, я думаю, это сочетание гравитации и вежливости), — и радиоактивных явлений, которые состоят в переходах ядер с уровня на уровень. Итак, что у нас остается помимо гравитации и радиоактивности (более точно, ядерной физики)? Бензин, сгорающий в автомобильных двигателях, пена и пузыри, твердость соли или меди, упругость стали. Да и биологи пытаются при помощи химии понять как можно больше свойств живого, а, как я уже объяснял, теория, стоящая за химией, — это квантовая электродинамика.

Я должен внести некоторую ясность. Хотя я и говорю, что все явления физического мира можно объяснить этой теорией, но в действительности мы этого

не знаем. Большинство известных нам явлений происходит с участием такого *гигантского* количества электронов, что проследить за ними не под силу нашему бедному рассудку. В подобных случаях мы можем использовать теорию, чтобы хоть приблизительно вычислить, что должно происходить. Примерно это и происходит на самом деле.

Но если мы поставим в лаборатории эксперимент всего с *несколькими* электронами в *простых* условиях, мы сможем с очень большой точностью рассчитать, что должно происходить, и провести очень точные измерения. В таких условиях квантовая электродинамика работает прекрасно.

Мы, физики, всегда стараемся проверить, все ли в порядке с теорией. Такова игра, потому что, если что-нибудь *не так*, становится интересно! Но до сих пор мы не нашли ничего неправильного в квантовой электродинамике. Поэтому я бы сказал, что это жемчужина физики и предмет нашей величайшей гордости.

Квантовая электродинамика является также прототипом новых теорий, которые пытаются объяснить ядерные явления — то, что происходит внутри атомных ядер. Если представить физический мир как театр, актерами в нем будут не только электроны, находящиеся вне ядер атомов, но и кварки, глюоны, и т. д. — десятки типов частиц внутри ядра. И хотя все эти «актеры» совершенно не похожи друг на друга, все они играют в определенном стиле — странном и необычном — в «квантовом стиле». В конце я расскажу вам немного про ядерные частицы. А сейчас, чтобы было проще, я буду рассказывать только про фотоны (частицы света) и электроны. Потому что тут важно, *как именно* они играют свои роли, а играют они их очень интересно.