

НАУКА ВЕЛИЧАЙШИЕ ТЕОРИИ

ФЕЙНМАН

6

Квантовая электродинамика



Когда фотон встречается
электрон

DeAGOSTINI

ФЕЙНМАН квантовая электродинамика

6



ФЕЙНМАН

Квантовая электродинамика

ФЕЙНМАН

Квантовая электродинамика

Когда фотон
встречает
электрон

Наука. Величайшие теории: выпуск 6: Когда фотон встречает электрон. Фейнман. Квантовая электродинамика. / Пер. с франц. — М.: Де Агостини, 2015. — 176 с.

Ричард Фейнман считается не только одним из самых значительных физиков XX века, но и одной из самых завораживающих и уникальных фигур современной науки. Этот ученый внес огромный вклад в изучение квантовой электродинамики — основной области физики, исследующей взаимодействие излучения с веществом, а также электромагнитные взаимодействия заряженных частиц. Кроме того, он широко известен как преподаватель и популяризатор науки. Яркая личность Фейнмана и его сокрушительные суждения вызывали как восхищение, так и враждебность, но несомненно одно: современная физика не была бы такой, какой она является сегодня, без участия этого удивительного человека.

ISSN 2409-0069

© Miguel Ángel Sabadell, 2012 (текст)

© RBA Colleccionables S.A., 2013

© ООО «Де Агостини», 2014–2015

Иллюстрации предоставлены:

Aisa: 91b; Archives RBA: 30, 35, 39, 88, 123ad, 138;

Bibliothèque du Congrès des États-Unis: 33, 67; Corbis:

91ag, 91ad, 98, 123ag, 123b, 132, 165a, 165b; Département de

l'Énergie des États-Unis: 46, 72, 75a, 75b; Getty Images: 107;

Gert-Martin Greuel: 145; istockphoto: 53; Musée Boerhaave,

Leiden, Pays-Bas: 120; Smithsonian Institution: 80. Photos de

couverture: akg / Science Photo Library.

Все права защищены.

Полное или частичное воспроизведение
без разрешения издателя запрещено.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. Новый квантовый мир	17
ГЛАВА 2. От Принстона до атомной бомбы	43
ГЛАВА 3. Квантовая электродинамика: КЭД	77
ГЛАВА 4. Новый старт, новые препятствия: сверхтекучесть	113
ГЛАВА 5. От атомов к кваркам	129
ГЛАВА 6. Нанотехнология и общественная наука	149
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	169
УКАЗАТЕЛЬ	171

Введение

Вот несколько фактов из моей жизни: я родился в 1918 году в маленьком городке под названием Фар-Рокуэй, недалеко от Нью-Йорка, рядом с океаном. Я прожил там 17 лет до 1935 года. Четыре года я проучился в Массачусетском технологическом институте (МТИ), после чего, в середине 1939 года, я поступил в Принстонский университет. В период моей учебы в Принстоне я начал работать над Манхэттенским проектом, а затем, в апреле 1943 года, переехал в Лос-Аламос. Там я жил примерно до октября или ноября 1945 года, пока не получил приглашение от Корнелльского университета. Я женился на Арлин в 1941 году. Она умерла от туберкулеза в 1945 году, в тот момент я находился в Лос-Аламосе. Я пробыл в Корнелле до 1951 года. В 1950 году я отправился в Бразилию и оставался там около шести месяцев. Наконец, я был принят в Калифорнийский технологический институт (Калтех), в котором работаю до сих пор. Две недели в конце 1951 года я провёл в Японии, а через несколько лет сочетался браком с Мэри Лу. В настоящее время я женат на Гвинет, она англичанка, и у нас двое детей, Карл и Мишель.

Именно в такой лаконичной манере Ричард Филлипс Фейнман (его еще называют Дик Фейнман) рассказал свою историю в 1985 году при публикации своей книги «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман!», где были собраны анекдоты из жизни уче-

ного. Данное произведение 14 недель оставалось на пике славы, находясь в списке бестселлеров *New York Times*; сейчас оно значится в перечне уникальных научных книг, которые продолжают переиздавать. Так же, как и другая автобиография Фейнмана под названием «Какое тебе дело до того, что думают другие?», эта книга раскрывает характер одинокого человека, владеющего незаурядной интуицией в области физики. Свидетельством признания его исключительных способностей стало и то, что его интервью 1979 года журналу *Omni* было озаглавлено как «Самый умный человек в мире». Молва утверждает, что когда мать Фейнмана прочитала это название, она не смогла сдержаться и воскликнула: «Наш Ричард? Самый умный человек в мире? В хорошенькое же положение мы попали!»

В декабре 1999 года журнал *Physics World* направил анкету 250 физикам, где их просили, между прочим, указать пять человек, внесших, по их мнению, важнейший вклад в физическую науку: в результате Фейнман занял седьмое место после Эйнштейна, Ньютона, Максвелла, Бора, Гейзенберга и Галилея. Многие современные физики были поражены, увидев, что их коллега был поставлен на один пьедестал с Эйнштейном. Одним из самых ошеломленных ученых оказался и Марри Гелл-Ман, который тоже являлся лауреатом Нобелевской премии по физике. Давний коллега Фейнмана пришел в физику, чтобы навести порядок в субатомном «зверинце», создав свою теорию о кварках, этих маленьких «осколках», из которых состоят протоны, нейтроны и ряд других частиц. И в течение многих лет одной из любимых тем для разговора в мире физики был вопрос: «Кто умнее? Марри или Дик?»

Достаточно окинуть взглядом библиотеку Калифорнийского технологического института в Пасадене, знаменитого Калтеха, в котором Фейнман проработал до самой смерти, чтобы понять значимость его роли в науке. На стеллажах можно увидеть образцы его незаурядных достижений. Это сочинения человека, которого расценивают как великого физика второй половины XX века. Там также находятся три биографии ученого, два тома его автобиографических воспоминаний, коллекция рисунков, сделанных его рукой, и свидетельства его участия

в спектаклях, в которых он играл на бонго, — сложно остановить свой выбор на чем-то одном. С момента смерти физика в 1988 году его дело, которое можно назвать «индустрией Фейнмана», отнюдь не ушло в прошлое. Недавние произведения, такие как *«Шесть лекций попроще и шесть посложнее»*, *«Лекция, потерянная Фейнманом»* или *«Курс физики Фейнмана»*, сборник задач по элементарной физике в трех томах, который мэтр издал в начале 1960 года (и который был переиздан и дополнен в 2005 году), продолжают демонстрировать, насколько незаурядным ученым был их автор.

Очарованность многих поколений физиков этой личностью отчасти объясняется магнетизмом, неотразимым шармом, которым обладал Фейнман и который не переставал покорять как мужчин, так и женщин, даже после смерти ученого. Выражения признательности, изданные после его кончины, изобилуют такими определениями, как «самый оригинальный физик-теоретик нашей эпохи», «исключительно честный по отношению к самому себе и другим», «он не любил ни церемоний, ни роскоши», «в высшей степени неформальный»... Все это делает несомненным то, что Фейнман являлся физиком-ниспровергателем традиций, самым блестящим и влиятельным во второй половине XX века. Он был одним из тех, кто работал над квантовой теорией, он также изобрел диаграммы, которые сегодня носят его имя. Эксцентричный и веселый, наделенный неутолимой любознательностью, он, кроме того, являлся блестящим рассказчиком, особенно когда речь шла о его собственной жизни. Способность Фейнмана видеть мир атомов, позволившая ему заново изобрести квантовую теорию, стала одной из фундаментальных в физике.

Многое было написано о Фейнмане, и его имя сопровождалось широкой гаммой прилагательных, от «эгоцентричный» до «милый». Во время его преподавательской деятельности, когда Фейнман входил в кафетерий Калтеха, все, включая его коллег, замолкали на мгновение, так как хотели услышать, что он говорил. Молодые физики имитировали его манеру писать и его манеру «набрасывать» уравнения на доске. Однажды даже случился шуточный спор о том, человек ли он вообще...

Многие завидовали вспышкам вдохновения этого ученого, его непоколебимой вере в простые природные истины, его скептическому отношению ко всему «официальному» и нетерпимости по отношению к посредственности. Две автобиографии Фейнмана (которые он не составлял сам; кстати, ни одна из его многочисленных книг не была написана им самим, на самом деле использовались стенограммы конференций или разговоров) вызывают столько же смеха, сколько и поводов задуматься. Эти два издания представляют собой сборники анекдотов настолько бурлескных, что практически невозможно поверить, будто все они повествуют об одном человеке. После смерти Фейнмана Марри Гелл-Ман, Нобелевский лауреат по физике 1969 года, заявил (чем вызвал огромное недовольство семьи Фейнман): «Он окружил себя множеством мифов и посвятил большую часть своего времени и своей энергии сочинению анекдотов о самом себе». Фейнман стал иконой стиля, бунтарем, не цепляющимся за прошлое, то есть одним из тех героев, которые обычно так популярны в США. Он стал прообразом американской идеологии «человека, который сделал себя сам», для которого небо — это единственный предел. Таким образом, нет ничего удивительного в том, что этому ученому была посвящена театральная пьеса. Названная «КЭД», она показывает историю нескольких дней из жизни Фейнмана в 1986 году, за два года до его смерти. Пьеса была написана по настоятельной просьбе актера Алана Алды, известного прежде своей ролью Ястребиного Глаза Пирса в телевизионном сериале М*А*S*Н, снимавшемся в 1970-х годах (через 12 лет он представил имевшую успех научно-популярную передачу *Scientific American Frontiers*, поэтому интерес актера к науке явно не нуждается в доказательствах).

Надо заметить, что наибольшую научную солидарность по отношению к интеллектуальным достижениям Фейнмана выражал Марк Кац, выдающийся польский и американский математик. Последний стал знаменитым в 1966 году, сформулировав свой вопрос в стиле Фейнмана, более того, затронув в нем тему инструмента, который этот физик обожал: «Мож-

но ли услышать форму барабана?» В статье, опубликованной под этим названием в журнале *American Mathematical Monthly*, Кац пытался разобраться, возможно ли вывести геометрию барабана исходя из звукового спектра, который он производит. В общем, ответ был отрицательным.

В своей автобиографии Марк Кац пишет:

«В науке, как в любой другой области человеческого труда, существует два типа гениев: «обычные» гении и «чародеи». Обычный гений — это как вы и я, но бесконечно более умный. Манера, в которой работает его мозг, не является таинством. В тот момент, когда мы поняли, что он сделал, мы чувствуем, что смогли бы сделать то же самое. С чародеями все по-другому. [...] Функционирование их разума до конца нам непонятно. У них почти никогда, а возможно и вообще никогда не было учеников, так как их методы невозможно повторить, и должно быть, ужасное чувство неудовлетворенности охватывает молодой блестящий ум, когда он сталкивался с непроходимыми путями разума чародея. Ричард Фейнман [являлся] чародеем высшей категории».

Фейнман не был обычным физиком и не желал им быть. В то время как все его коллеги для своего первого путешествия за границу выбирали Европу, он решил посетить Бразилию. Сильная любовь соединила его с Арлин и Гвинет — двумя из трех жен, которые были в его жизни, но он также довольно часто увлекался и другими женщинами, однако подобные романы не имели серьезного продолжения.

Фейнман очень редко читал статьи, опубликованные его коллегами, так как он предпочитал собственными усилиями приходить к выводам, которые уже сделали другие. Он исповедовал принцип никогда не доверять идее, которую он не извлекал из себя самого. Такова была отличительная черта Фейнмана, опасное свойство, способное привести к многочисленным ошибкам и потерянное время — но не для него. «Дик мог сделать все, потому что он был блистателен, — заявил однажды по этому поводу другой физик-теоретик. — Он смог бы подняться босиком на Монблан».

Работа этого любопытного «персонажа» (как он сам себя называл в своей автобиографии) крайне абстрактна. Областью его предпочтения была квантовая теория, которая родилась за несколько лет до него. Установить законы, которые управляют субатомным миром, было сложной задачей, требовавшей участия великих умов физики первой половины XX века. Мир элементарных частиц противоречит здравому смыслу, который основан на нашем повседневном опыте, и понимание этого мира все еще ускользает от нас сегодня. Однако познавательные возможности квантовой физики не вызывают никакого сомнения. Мы можем критиковать ее с точки зрения философии, она даже может показаться нам нелепой, принимая во внимание наше восприятие Вселенной (между прочим, это причина, по которой ее отверг Эйнштейн), но мы не можем закрыть глаза на ее научное и технологическое значение.

Квантовая физика требовала развития многочисленных средств для изучения феноменов, которые она намеревалась объяснить. В период первой половины XX века физикам пришлось использовать математические понятия, разработанные в предыдущие десятилетия (причем никто не верил, что они смогут иметь практическое применение) для того, чтобы решать проблемы, которые возникали перед ними. Но этого было недостаточно: необходимо было разработать совершенно новый математический арсенал. Именно в этой области Ричард Фейнман отличился и сделал самый большой вклад. Одной из наиболее острых проблем, на которую физик должен был обратить внимание в 1930-х годах, было появление бесконечных величин в теории, объясняющей взаимодействие между материей и светом. При попытках просчитать, что происходит в тот момент, когда электрон взаимодействует с фотоном, результат получался катастрофический, так как бесконечные величины извращали подсчеты, и никто не знал, как решить этот вопрос. Ученые были настолько обескуражены, что организовали конгресс, целиком посвященный этому вопросу. Фейнман стал одним из трех физиков, взявших за его решение, наряду с японцем Синъитиро Томонагой и американцем Джулианом

Швингером. Результатом было создание нового варианта квантовой электродинамики, который актуален и поныне. Также актуальны созданные в тот же период известные диаграммы Фейнмана, которые используются практически во всех дисциплинах физики, связанных с микромиром.

Более того, вклад Фейнмана в физику на этом не заканчивается. Невероятная интуиция привела его к решению загадки жидкого гелия, который при температуре, близкой к абсолютному нулю ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$), может перетекать через край сосуда, где он находится: речь идет о явлении сверхтекучести гелия. Фейнман также внес существенный вклад в создание теории слабого взаимодействия, одного из четырех фундаментальных взаимодействий природы, которое несет ответственность за некоторые радиоактивные распады. Наконец, он помог убедить научное сообщество в том, что кварки, частицы, из которых состоят протоны и нейтроны, открытые его коллегой Марри Гелл-Маном, не являются математической абстракцией, а действительно существуют.

Тем не менее Ричард Фейнман не интересовался только научными исследованиями, его увлекали также популяризация науки и преподавание. Лекции Фейнмана под названием «Что есть наука?» и «Значение науки» остаются источниками вдохновения как для студентов, так и для исследователей. Его лекции по физике собраны в серию книг и продолжают издаваться в течение 50 лет после первой публикации. Они демонстрируют метод Фейнмана, применявшийся им для занятий этой наукой, которая стала его настоящей большой любовью. Его две фразы-талисманы («То, что я не могу создать, я не могу понять» и «Знать, как решить любую решенную проблему») были написаны на доске его аудитории. Физика была страстью Фейнмана, любая физика. Для него наука была в постоянном развитии. Он сравнивал ее с формой облаков: «Когда наблюдаешь за ними, они кажутся застывшими, но через несколько минут ты отдаешь себе отчет, что все поменялось».

Фейнман исследовал уже пройденные пути, но использовал совокупность искусных математических приемов, которые, совмещенные с сильной интуицией ученого, изменяли

представления в этой области. Его несколько хаотичный способ работать никогда не следовал канону «аксиома — теорема — доказательство». На самом деле Фейнман предчувствовал результат, а затем проверял его столько раз, сколько это было необходимо, при любых возможных обстоятельствах. Тем не менее он никогда не старался быть оригинальным, скорее его интересовал способ никогда не ошибаться. «Физика всегда меня неотступно преследовала, — объяснял он. — Если идея казалась мне плохой, я это говорил. И если она казалась мне хорошей, я это также говорил».

Одна из самых удивительных способностей Фейнмана заключалась в умении концентрироваться в течение многих часов на одной и той же проблеме, что не могло не волновать его родителей в те времена, когда он был подростком. В тот период Ричард увлекался починкой радиоприемников. Он их разбирали и долго сидел неподвижно, пытаясь понять, в чем причина поломки. Пожалуй, не вызывает удивления возникший среди его соседей слух, что он чинил радио с помощью мысли... Позднее, когда ученый закончил свою докторскую диссертацию, команда Манхэттенского проекта отправила его в Чикаго, где Фейнман решил проблему, на которую они натолкнулись месяц назад. И, надо сказать, самое большое впечатление на коллег произвел не столько его интеллектуальный подвиг, сколько его не соответствующий образу ученого имидж: «Было очевидно, что Фейнман не относится к большинству послевоенной университетской молодежи. Он имел выразительную пластику танцора и манеру очень быстро говорить, которая напоминала нам Бродвей — фразы как у мошенника, ни с чем не сравнимая говорливость и много апломба».

В конце своей жизни Фейнман приобрел широкую известность вне научного сообщества. Произошло это благодаря его работе в 1986 году, за два года до смерти, в комиссии, созданной НАСА для расследования аварии шаттла «Челленджер». Фейнман, будучи тогда больным, решил следовать тому же принципу, который он применял в науке: пользоваться только собственноручно проверенной информацией. Таким образом, вместо того чтобы читать многочисленные страницы отчетов,

он принялся опрашивать инженеров и ученых НАСА и ставить эксперименты, казавшиеся ему необходимыми, чтобы обрести полную уверенность в причинах катастрофы. Звездный час для ученого пробил во время одного из публичных заседаний комиссии, в ходе которого он провел маленький эксперимент. Фейнман предположил, что причиной аварии могла быть неисправность кольцеобразных резиновых уплотнителей, используемых для ракетных ускорителей и топливного бака (известных под техническим термином *O-ring* по причине их характерной формы). Вследствие переохлаждения эти уплотнители потеряли свою эластичность, из-за чего герметичность была нарушена. Горячие газы прожгли корпус правого ускорителя, что привело к разрушению топливного бака и взрыву топлива. На фотографиях, сделанных во время аварии, можно было увидеть пламя, выходящее из зоны, в которой находились уплотнители. Так, перед всеми журналистами и телевизионными камерами Фейнман сжал пассатижами небольшое резиновое кольцо, а затем оставил его на несколько секунд в стеклянном стакане со льдом, чтобы наглядно объяснить свою теорию: из-за низкой температуры ночью перед стартом уплотнители потеряли упругость. В конце своего выступления Фейнман не был уверен в том, что убедил присутствующих, но он недооценил проницательность журналистов. В эту ночь все телеканалы распространили новость: причина аварии очевидна. Фейнман стал героем для всех американцев.

После смерти физика многие отдавали ему должное и выражали свое восхищение им. Но, наверное, лучше всех о нем сказал Джулиан Швингер, крупный послевоенный ученый, с которым Фейнман поделил Нобелевскую премию и который был его главным соперником: «Честный человек с прекрасной интуицией, самая выдающаяся личность нашей эпохи и лучший пример того, чего может добиться тот, кто осмелится следовать за многообразием барабанных ритмов».

- 1918** 11 мая в Фар-Рокуэй, Нью-Йорк, родился Ричард Ф. Фейнман.
- 1939** Фейнман выигрывает математический конкурс William Lowell Putnam. Получает диплом МТИ.
- 1941** Брак с Арлин Гринбаум, больной туберкулезом.
- 1942** Получение предложения работать над Манхэттенским проектом. Докторская диссертация «Принцип наименьшего действия в квантовой механике».
- 1945** Смерть Арлин. Взрыв первой атомной бомбы и окончание войны. Поступление в Корнелльский университет в качестве преподавателя.
- 1948** Участие в конференции в Поконо по теме квантовой электродинамики (КЭД). Публикация диаграмм Фейнмана в статье Фримена Дайсона «Теории излучения Томонаги, Швингера и Фейнмана».
- 1949** Публикация работы «Пространственно-временной подход к нерелятивистской квантовой механике», в которой он применяет свои диаграммы для фундаментальных взаимодействий между двумя электронами. Успешная презентация своих идей во время третьей конференции по теме КЭД в Oldstone-on-the-Hudson.
- 1953** Объясняет сверхтекучесть гелия.
- 1955** Читает свою знаменитую лекцию «О значении науки» в американской Национальной академии наук (НАН).
- 1958** Вместе с Марри Гелл-Маном публикует свое объяснение слабого взаимодействия — статью «Теория взаимодействия Ферми» в *Physical Review*.
- 1960** Выступает с лекцией, посвященной нанотехнологиям, во время ежегодной встречи Американского физического общества.
- 1961** Исследования в области биохимии, в частности бактериофага T4D.
- 1961** Издание лекций по физике, которые
- 1963** делают Фейнмана знаменитым: «Фейнмановские лекции по физике».
- 1965** Фейнман становится лауреатом Нобелевской премии по физике наряду с Джулианом Швингером и Синъитиро Томонагой.
- 1985** Публикует книгу «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман!» — сборник анекдотов о своей жизни.
- 1986** Участвует в комиссии по установлению причины аварии космического корабля «Челленджер».
- 1988** 15 февраля — смерть Ричарда Ф. Фейнмана в Лос-Анджелесе, Калифорния, в возрасте 69 лет.

Новый квантовый мир

Попытки понять строение материи имеют долгую историю, которая восходит к античной Греции и Демокриту. Тем не менее только в конце XIX века стало ясно, что есть мир атомов. В 1890 году зародилась революционная концепция, которая достигла пика своего развития в 1930-х: квантовая теория.

Одиннадцатое мая 1918 года. Начало политической полемики: через несколько дней Вудро Вильсон, президент Соединенных Штатов Америки, подпишет закон «О подстрекательстве к мятежу» — «самый строгий закон против свободы слова в американской истории», по словам Джеффри Р. Стоуна, историка, специализирующегося в области американского гражданского права. Этот текст расширяет закон о шпионаже от 1917 года, квалифицируя как правонарушения любое мнение или любую речь, произнесенные на публике с использованием, как напишут в *New York Times*, «оскорбительной, грубой, нецензурной лексики по отношению к правительству Соединенных Штатов Америки, Конституции, флагу или армии». В целом данный закон был направлен на подавление любого антипатриотического выступления во время войны, которая, к слову сказать, уже подходила к концу. Но в тот день около миллиона американских солдат еще находились на Западном фронте, и половина из них была в арьергарде. Большая часть из этих солдат прибыла всего лишь несколько месяцев назад на окровавленную европейскую землю. В то время генерал Эрх Лудендорф начал на Западном фронте генеральное наступление. Он понимал, что необходимо уничтожить французскую и британскую армии, чтобы помешать американцам закрепиться на боевых позициях. К тому же, прорвав фронт, Германия смогла бы под-

писать выгодное для себя перемирие. В таких условиях, несмотря на то что закон Вильсона стал ошеломляющим ударом для свободы слова, американские газеты едва ли не единогласно его приветствовали.

Никто не знал, что думал о происходящем Мелвилл Фейнман, этот еврей-ашкенази, эмигрировавший из Минска (Белоруссия), который учил своих детей бросать вызов ортодоксальности и всегда задавать вопросы. В конце Первой мировой войны он жил со своей женой Люсиль Филлипс в местечке Фар-Рокуэй, расположенном в Куинсе (одном из пяти районов Нью-Йорка), на южном побережье Лонг-Айленда. Здесь обосновалась большая еврейская община, исповедовавшая реформистский иудаизм (течение, зародившееся в Германии в XVIII веке), достаточно либеральная и открытая, чтобы принять таких атеистов, как Мелвилл. Тем не менее, когда Ричард Фейнман за несколько лет до своей смерти посетит места своего детства, то обнаружит, что местные жители стали самыми строгими ортодоксами.

Трудолюбие — единственная основа любого открытия.

Ричард Фейнман

А в тот день, 11 мая 1918 года, мысли Мелвилла были заняты не политикой, а рождением его первого сына. Согласно семейной легенде, он сказал своей жене Люсиль: «Если родится мальчик, то он будет ученым», на что она ответила: «Не дели шкуру не убитого медведя».

Мелвилл всегда интересовался науками, но в те времена стать ученым для еврея-иммигранта было недостижимой мечтой. Поэтому он занялся торговлей: продавал униформу для полиции, грузовики для почтовой службы, воск для автомобилей... Однако его методы воспитания оказались весьма успешными. По прошествии лет его сын Ричард признался в том, что не заметил, как отец подтолкнул его к увлечению наукой, поскольку никогда не слышал от него фраз вроде: «Ты должен изучать физику». Зато Мелвилл показал своему сыну, как сле-

дует заниматься наукой, то есть задавать себе вопросы вместо того, чтобы довольствоваться уже готовыми ответами; быть более внимательным к тому, что еще остается тайной, чем к тому, что уже известно. Подобным образом он показал ему, что можно жить, не зная существующих ответов на важные вопросы, и что даже лучше так жить. Со своей стороны, Люсиль привила своему сыну чувство юмора, самоиронию и, особенно, мужество первооткрывателя. Все эти качества окажутся решающими в будущей жизни молодого Ричарда.

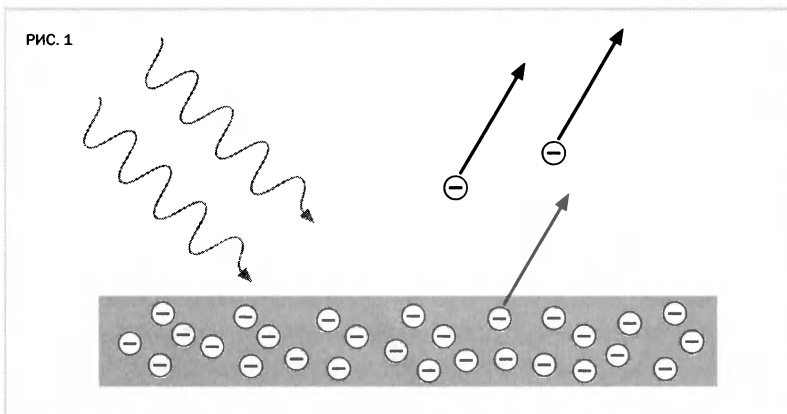
Когда «Ритти» было пять лет, у него появился младший брат. Его назвали Генри Филлипс в честь дедушки по материнской линии, умершего за год до его рождения. Однако семью ждало несчастье: через месяц, 25 февраля 1924 года, в возрасте четырех недель малыш заболел и умер, вероятнее всего от менингита. А в ноябре этого же года, в 5800 километрах от этого места, Луи де Бройль представил свою докторскую диссертацию по физике, по поводу которой Эйнштейн заявил: «Он поднял край великого занавеса», так как этот ученый только что навеки изменил представления о материи. Наступил решающий момент в революции, которая началась еще 30 лет назад, во время так называемого сиреневого десятилетия.

ЗАГАДКИ И РЕВОЛЮЦИИ

Последние годы XIX века были беспокойными для научного мира. Несмотря на мнение британского физика Уильяма Томсона (лорда Кельвина), который поддержал в 1900 году идею о том, что «больше нечего открывать в современной физике, остается лишь совершенствовать уже имеющееся», наука открыла электрон, частицу, происхождение которой никто не знал, и доказала, что некоторые урановые соединения являются источником неизвестных лучей. Новая загадка — радиоактивность — вошла в науку. Наконец, ситуация окончательно запутывалась тем, что две великие физические теории XIX века оказались несовместимыми между собой. С одной стороны

находилась механика Ньютона, которая относилась к движению тел, а с другой — электромагнетизм, объясненный шотландцем Джеймсом Максвеллом в 1873 году. Принцип относительности Галилея гласил, что законы механики в инерциальных системах отсчета всегда работают одинаково, независимо от того, находятся ли эти системы в неподвижности или в состоянии равномерного и прямолинейного движения. Этот принцип отлично работал для воздушных шаров и камней, но не применялся к свету. Противоречия были сняты теорией относительности Эйнштейна, согласно которой механика Ньютона оказалась применима к телам,двигающимся с малой скоростью, и не годилась для тел, перемещающихся со скоростью, близкой к скорости света.

Кроме того, развитие термодинамики возродило гипотезу, немного устаревшую, но всегда являвшуюся источником полемики: материя состоит из крошечных и неделимых атомов. Это предположение позволило применить законы механики и благодаря им просчитать многочисленные физические свойства материи. Однако не все ученые были убеждены в правомерности такого подхода. Среди них был и немецкий ученый Макс Планк, специалист по классической термодинамике. Он считал, что атомы — «враги прогресса», и в конце концов они «должны быть забыты ради предположения о непрерывности материи». Любопытно, что этот же ученый станет протагонистом самых важных концептуальных революций в истории науки. Он сообщит абсурдный для его современников факт 14 декабря 1900 года в Немецком физическом обществе: материя не может поглощать энергию бесконечно маленькими порциями. Существует минимальное количество энергии, квант, ниже которого нельзя опускаться. Его значение можно получить с помощью простого уравнения, соединяющего энергию и частоту света («цвет» света): $E = h\nu$; h — коэффициент пропорциональности, известный впоследствии как постоянная Планка. Через пять лет Альберт Эйнштейн пошел дальше, чтобы объяснить фотоэлектрический эффект (рисунок 1), который благодаря ему прочно вошел в нашу жизнь: он используется, например, при работе автоматических дверей, цифровых фото-

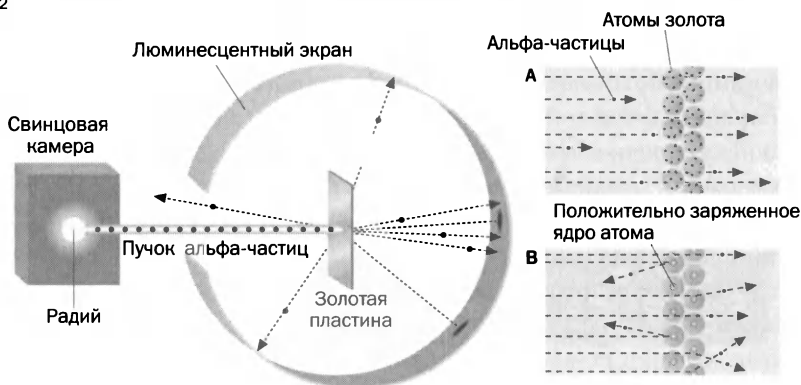


Фотоэлектрический эффект заключается в испускании электронов с металлической поверхности под действием света определенной частоты. Именно Эйнштейн объяснил это явление.

аппаратов и турникетов, при включении уличных фонарей при наступлении темноты и так далее. В одной из своих больших статей (опубликованной в легендарном 17-м выпуске журнала *Annalen der Physik*) он утверждал, что не только материя поглощает излучения квантами, но и сам свет имеет квантовую природу. Идея, о которой не упоминали со времен Ньютона: свет действует как поток частиц, фотонов.

Понемногу материя начинала приоткрывать свои тайны. В 1904 году Джозеф Томсон предложил модель атома, в которой электроны были распределены внутри сферы, как изюм в пудинге. Но опыты, проведенные в 1911 году новозеландцем Эрнестом Резерфордом, доказали несостоятельность этой модели. Резерфорд, совместно с Хансом Гейгером и Эрнестом Марсденом, бомбардировал альфа-частицами (состоящими из двух протонов и двух нейтронов, что идентично ядру атома гелия-4) очень тонкую золотую пластинку. Вопреки всем ожиданиям, было обнаружено отклонение альфа-частиц на большие углы. На углы более 90° отклонялась одна частица из 8000, иногда наблюдался даже их отскок назад. Резерфорд очень удивился: это было столь же невероятно, как если бы он стрелял снарядом в лист бумаги, а снаряд отбросило бы назад! Согласно модели атома Томсона, такой результат был невозможен. Единственный способ интерпретировать эти результаты — предло-

РИС. 2



А. То, что ожидается, если модель атома Томсона правильная.
В. То, что наблюдаем в действительности.

Модель Томсона предполагает, что электроны распределены внутри положительно заряженного атома как «изюм в пудинге». Эксперимент, проведенный Резерфордом, в котором альфа-частицы отскакивают в момент удара от атомов золотой пластинки, может быть объяснен, только если большая часть массы атома сконцентрирована в очень маленьком объеме, в виде ядра, и имеет положительный заряд.

жить иную атомную модель, аналогичную Солнечной системе в миниатюре. Она будет образована очень маленьким ядром, содержащим почти всю массу атома и положительно заряженным, вокруг которого будут вращаться электроны. Однако, согласно законам классической электродинамики,двигающиеся по круговой орбите электроны должны неизбежно потерять энергию при излучении электромагнитных волн и в конечном итоге упасть на ядро. То есть если модель Резерфорда (рисунок 2) была правильной, то материя не могла существовать. Но она существует!

Наука сумела выйти из этого тупика благодаря блестящему датскому физiku Нильсу Бору (1885–1962). В 1911 году Бор приехал в Великобританию с переводом своей диссертации на английский язык и стипендией Фонда Карлсберга для работы в Кавендишской лаборатории. Сразу же по приезде он поспешил в офис руководителя лаборатории Джозефа Томсона, захватив с собой одну из книг ученого о структуре атома. Отметив отрывок во вступлении, Нильс Бор прямо ему сказал: «Это неверно!» В следующем году он переехал в Манчестер, чтобы

работать с Резерфордом, а в 1913 году Бор опубликовал свои постулаты, снявшие противоречия между планетарной моделью и электродинамикой. Ученый утверждал, что существуют орбиты, на которых электрон не будет терять энергию; при переходе от одной подобной орбиты к другой электрон излучает или поглощает (в зависимости от того, удаляется он или приближается к ядру) фотон, энергия которого равна разности энергий этих дозволенных орбит. Такое радикальное предположение означает разрыв с классической электродинамикой. Но в то же время благодаря ему стало возможным объяснить спектр атома водорода.

Публикация статьи Бора ознаменовала начало конца классического представления о мире, но худшее было еще впереди. Эйнштейн доказал, что свет имеет двойственную природу: он распространяется как непрерывные волны, но при поглощении и излучении ведет себя подобно частицам. В 1924 году француз Луи де Бройль дополнил это утверждение гипотезой о волновом характере материи: частицы (например, электрон) при соответствующих условиях могут вести себя как волны.

После Первой мировой войны де Бройль начал работать со своим братом Морисом над исследованием рентгеновских лучей. Именно здесь проявились его страсть к физике и интерес к революционным идеям Планка, Эйнштейна и Бора. Для своей докторской диссертации он выбрал исследование двух самых известных уравнений, с которых начинался новый век: $E = mc^2$ (теория относительности Эйнштейна) и $E = h\nu$ (квантовая гипотеза Планка). Эти выводы оставили членов комиссии ошеломленными, но они вряд ли поняли все их значение: де Бройль утверждал, что любой частице, в том числе и электрону, соответствует своя длина волны, которую можно обнаружить и измерить экспериментальным путем.

Согласно основному выводу из его гипотезы, если электроны ведут себя как волны, они должны в каких-то случаях вести себя подобно свету. Самое удивительное, что еще в 1920 году подобное явление наблюдал физик Лаборатории Белла Клинтон Джозеф Дэвиссон. Он пропускал пучок электронов через

пластинку из кристалла никеля и заметил некоторое постоянство в их рассеянии. Но только в 1927 году он понял, что речь шла о феномене дифракции электронов.

При помощи своей революционной идеи де Бройль получил и другой важный результат: он смог объяснить существование орбит электронов, о которых говорил Бор в своих постулатах. Результаты, которые легли в основу его диссертации, были опубликованы де Бройлем в нескольких небольших статьях, вышедших между сентябрем и октябрем 1923 года в журнале *Compte Rendus* Французской академии наук. Его идеи распространились тогда с быстротой молнии. Нидерландский физик Хендрик Лоренц писал в то время Эйнштейну: «Это первый слабый проблеск надежды в худшей из наших головоломок».

Наука нуждается в воображении, но воображение находится в ужасной смирительной рубашке знания.

Ричард Фейнман

Следующий шаг был сделан в 1925 году молодым немецким физиком Вернером Гейзенбергом. Он защитил свою докторскую диссертацию двумя годами ранее в Мюнхене, и его пренебрежение экспериментальной физикой, к слову сказать, принесло ему некоторые проблемы во время устного экзамена. Гейзенберг пришел к мысли, что для настоящего прогресса в физике следует отказаться от любой попытки «понять» внутреннюю работу атома. Он считал, что в теории, согласно которой электроны вращаются вокруг ядра, нет никакого смысла, так как никто их никогда не наблюдал. А вот фотоны, выпущенные электронами во время смены «орбиты», доступны для наблюдения, и только такого рода доказательства следует принимать во внимание для развития теории. В результате Гейзенберг создал *матричную механику*, с помощью которой он смог подтвердить выводы квантовой теории Бора. Почти в то же время, в 1926 году, австрийский физик Эрвин Шрёдингер осуществил синтез идей де Бройля и Гейзенберга, создав *волновую*

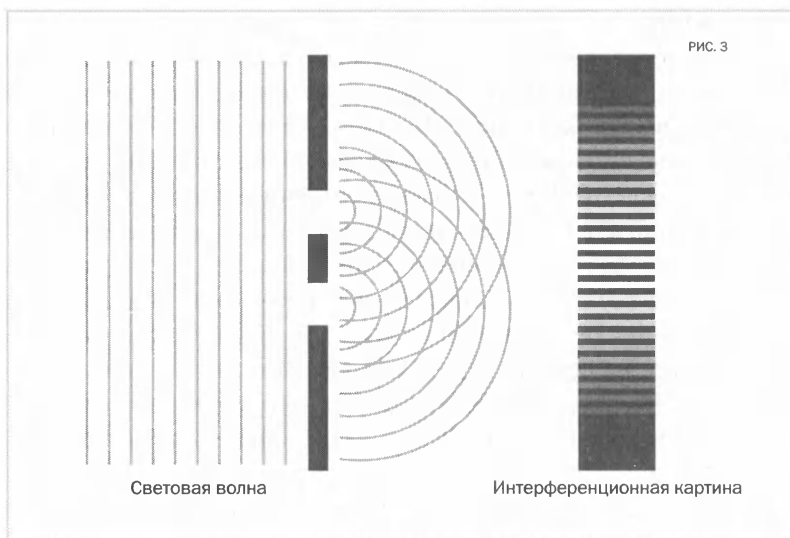
механику, которая стала одним из основных «инструментов» физиков-теоретиков. По сути, волновая механика и матричная механика представляли собой разные формулировки одной и той же квантовой теории. Идеи Шрёдингера не понравились Гейзенбергу: они оставляли место для предположений, что эти «волны» реальны. Баталия между сторонниками двух формулировок достигла своей крайней степени, когда Макс Борн доказал, что эти математические инструменты служат только для расчета вероятности найти электрон в конкретной точке пространства. Все закончилось, когда Поль Дирак окончательно доказал, что Гейзенберг и Шрёдингер оба правы: их видения атомного мира были равноценны и легли в основу того, что мы называем *квантовой механикой*.

Начиная с этого момента разрыв с классическим миром — миром, который можно было увидеть невооруженным глазом, — стал окончательным. Квантовая механика предлагала иное видение: тело не находится в определенном месте, существует лишь некоторая вероятность, что оно там есть. А значит, тело может находиться в любой части Вселенной. Даже понятие причинности исчезает, и остается только вероятность. Мы можем кидать мячик о стену столько раз, сколько захотим, но нельзя утверждать, что он будет постоянно отскакивать: это утверждение только возможно верное. Всегда существует некоторая вероятность того, что мячик начнет двигаться совсем в другом направлении. На самом деле, как говорит об этом Фейнман в своих знаменитых лекциях по физике, «очень мелкие предметы ведут себя не так, как вы ожидаете на основании своего повседневного опыта». Нужно заплатить очень высокую цену, если желаешь понять секреты материи.

ОПЫТ С ДВУМЯ ЩЕЛЯМИ

Ричард Фейнман утверждал, что этот опыт скрывает в себе тайну и волшебство квантовой теории:

Волна приближается к перегородке, в которой на небольшом расстоянии друг от друга прорезаны две очень узкие щели. При прохождении волны каждая из щелей сама становится источником волн, взаимодействующих между собой, образуя на экране детектора характерное изображение.



«[Это] явление, которое невозможно, абсолютно невозможно объяснить с помощью классической теории и которое содержит в себе самую суть квантовой механики. Здесь коренится тайна».

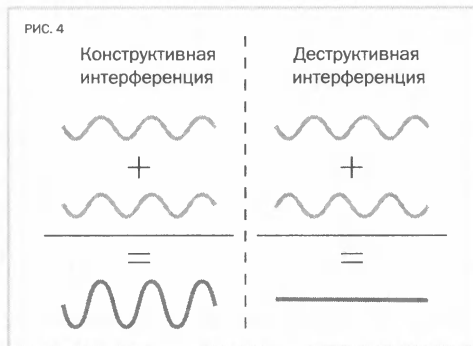
В 2002 году журнал *Physics World* опросил физиков, какой из экспериментов в истории, по их мнению, был самым красивым: первое место занял эксперимент с двумя щелями. Но более удивительным является то, что между теоретическим обоснованием и практической реализацией этого опыта прошло 30 лет. Изначально имел место мысленный эксперимент. А в 1961 году, когда квантовая теория уже хорошо себя зарекомендовала, немецкий физик Клаус Йонссон из Тюбингенского университета провел опыт и опубликовал данные в журнале *Zeitschrift für Physik*.

Впервые подобный эксперимент был поставлен в 1801 году, когда английский ученый Томас Юнг изложил идею об интерференции света. Один из опытов состоял в том, чтобы осветить пластинку, в которой были сделаны две маленькие щели, и наблюдать интерференционную картину, которая появлялась на экране, расположенном сзади (рисунок 3). Каждая щель

сама становится источником света; взаимодействуя друг с другом, эти источники образуют видимую интерференционную картину на экране. Вот наблюдаемый на экране результат: освещенная полоса в центре экрана, точно посередине между двумя щелями, темные полосы с двух сторон от нее, и дальше в обе стороны продолжается чередование освещенных и темных полос, причем чем дальше от центра, тем менее яркими становятся освещенные полосы. Это и называют *картиной интерференции* (рисунок 3): рисунок, способный появиться только при условии, что свет распространяется как волна, — идея, которую Юнг противопоставлял мнению Ньютона.

В настоящее время в опыт вводят маленькое изменение, об этом Фейнман рассказывал в своих лекциях. Прежде всего, представим пулемет, который выстреливает пули в устройство, подобное тому, что придумал Юнг, но в котором каждая щель имеет заслонку, позволяющую закрыть ее по нашему желанию. Разумеется, щели имеют такой размер, чтобы пуля могла пройти сквозь них. Итак, мы начинаем стрелять из нашего пулемета, закрывая одну из этих двух щелей. Вот полученный результат: за исключением нескольких пуль, задевших края щели или отскочивших в совсем непредвиденном направлении, пули попали в экран, расположенный напротив открытой щели. Если сейчас мы откроем вторую из щелей, то пули попадут в экран напротив каждого из двух отверстий. Важный момент: попадание пуль в экран напротив одной из щелей не зависит от открытия или закрытия второй щели.

Давайте воспроизведем этот же опыт со светом. Если мы закроем одну из щелей, то на экране отобразится полоса света, которая теряет яркость к своим границам. Если же мы откроем вторую щель, то увидим, что, в отличие от примера с пулями, на экране появятся не две яркие полосы, а картина интерфе-



Как показывает схема, темные и освещенные линии, которые наблюдаются во время опыта с двойной щелью, своим появлением обязаны волнам, взаимодействующим между собой, суммируя свои амплитуды (высоту своей вершины), если их фазы совпадают, или компенсируя их, если они находятся в противофазе.

ВОЛНОВЫЕ ФУНКЦИИ

Согласно квантовой теории, любой частице сопоставляется «волновая функция», описанная в уравнении Шрёдингера. Она становится более «интенсивной» в той области пространства, в которой можно надеяться встретить электрон. По мере того как мы удаляемся от этой области, волновая функция ослабевает, но она никогда не исчезает, именно поэтому всегда есть вероятность встретить электрон в определенной зоне пространства. Когда электрон обнаруживается, волновая функция «быстро исчезает», и тогда мы тотчас и точно узнаем о его местоположении. Но в момент, когда мы прекращаем наблюдение, «волновая функция распространяется заново по всему пространству и взаимодействует с волновыми функциями других электронов, и даже, при определенных условиях, с самой собой», — по словам британского физика Джона Гриббина.



Эрвин Шрёдингер.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{8\pi^2 m}{h^2} (V - E) \psi.$$

Волновая механика, созданная Эрвином Шрёдингером (1887–1961), основывается на решении этого уравнения для различных физических ситуаций.

ренции Юнга. Таким образом, изображение на экране зависит от открытия или закрытия второй щели.

Что же произойдет, если мы воспроизведем то же самое с электронами? Если мы закрываем одну из щелей, то наблюдаем тот же самый результат, что и во время опыта с пулями. Однако самое странное возникает тогда, когда мы открываем вторую щель: в таком случае мы видим, как на экране формируется картина интерференции, полученная в ходе опыта со све-

том! Именно такой вывод и сделал Дэвиссон в 1927 году: электроны ведут себя как волны в бассейне.

Мы могли бы подумать, что испускаемые электроны одновременно проходят через щели и, взаимодействуя, накладываются друг на друга, как и положено волнам материи, о которых писал де Бройль. Для проверки сократим частоту выстрелов электронов, чтобы они выходили в меньшем количестве за один раз. Наш экран подсоединен к счетчикам Гейгера, подающим сигнал («клик») каждый раз, когда их касается один электрон (не будем забывать, что счетчики Гейгера обнаруживают частицы, а не волны). Мы начинаем выстреливать электроны по одному таким образом, что наша пушка выбрасывает следующий электрон только тогда, когда раздается сигнал, означающий попадание предыдущего электрона в экран. Через определенный срок, будучи уверенными в том, что выпустили достаточное количество электронов, мы начинаем изучать распределение попаданий в экран и видим, опять же, волновую картину интерференции! Как это возможно? Электрон взаимодействует сам с собой? Похоже, эксперимент указывает именно на это. Но если он ведет себя как волна, тогда почему счетчики Гейгера реагировали на него, сообщая, что в экран попала частица? Иными словами: картина интерференции говорит нам о том, что электрон пересекает две щели в одно и то же время, затем взаимодействует сам с собой и ведет себя при этом как волна. Но в то же время счетчик Гейгера обнаруживает его на экране, и следовательно, он — частица. Это просто безумие!

Действительно ли электрон проходит через две щели? Вот что легко доказать. Давайте поставим перед одной из щелей детектор, регистрирующий событие прохождения электрона сквозь нее, и повторим опыт. Нас ждет новый сюрприз: электроны перестают вести себя как волны и начинают вести себя как классические частицы, пролетая либо через первую, либо через вторую щель, но не через две одновременно, образуя на экране только две полосы напротив каждой из щелей. Как только детектор выключали, восстанавливалась прежняя интерференционная картина.

В заключение можно сказать, что в микромире наш повседневный опыт ничего не стоит. Существует фундаментальная неопределенность в природе, мешающая нам, например, одновременно точно измерить скорость и расположение одной частицы или энергию и продолжительность данного процесса. Объяснение заключается в невозможности отделить явление от процесса наблюдения. Наблюдая, мы изменяем мир тем, что постигаем его именно таким способом, а не каким-либо иным. И каким мы увидим электрон — как волну или как частицу — зависит от того, что мы хотим видеть. И еще одно: мы не можем утверждать, что электрон перемещается из одной точки в другую по определенной траектории; нам необходимо отбросить понятие «пути». Электроны не следуют по определенным траекториям, как это делают пули станкового пулемета. Когда атом поглощает фотон и электрон поднимается на более высокую орбиту, то он достигает ее мгновенно, не пересекая промежуточное пространство. Электрон перестает существовать в одном месте, чтобы одновременно появиться в другом: в этом и состоит удивительный и невероятный квантовый скачок.

Все это наглядно показывает, каким запутанным делом может быть изучение физики — науки, с которой Ричард Фейнман связал свою жизнь.

МИР, УВИДЕННЫЙ В МТИ

В начале XX века в физике задавали тон европейские ученые. Квантовая теория развивалась вне Соединенных Штатов Америки, которые стремились компенсировать свое отставание с помощью чековой книжки, покупая «умы». Зимой 1932 года Авраам Флекснер, создатель и первый директор Института перспективных исследований Принстона, убедил Альберта Эйнштейна стать в нем профессором. Эйнштейн вместе со своей супругой Эльзой, секретарем Элен Дукас и ассистентом Вальтером Майером 17 октября 1933 года прибыл в Нью-Йорк.

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ «ПО АЗИМОВУ»

В своей книге *Asimov on physics* (1976) писатель Айзек Азимов (1920–1992) объясняет связь между энергией и временем, используя для этого следующую аналогию: в классе один ученик любит проказничать каждый раз, когда учитель поворачивается, чтобы писать на доске. Если мальчик двигается мало (то, что в квантовом мире соответствует явлению, требующему малое количество энергии) и только показывает язык, он сможет кривляться в течение значительно долгого интервала времени. Однако, если он совершает другие «геройства», например встает из-за своей парты (то, что требует много энергии), ему нужно быть очень быстрым, чтобы учитель его не подловил. Это могло бы показаться нарушением святейшего принципа сохранения энергии, но принцип неопределенности Гейзенберга остается неопровержимым: допустимо «позаимствовать» энергию в таком количестве, чтобы можно было ее вернуть по окончании срока «займа». Чем больше количество позаимствованной энергии, тем более недолговременным будет займ.



Айзек Азимов в 1965 году.

Французский физик Поль Ланжевен высказался по этому поводу так: «Это такое же важное событие, как и воображаемый переезд Ватикана в Новый Свет. Папа физики уехал, и Соединенные Штаты Америки стали мировым центром естественных наук». Здесь, в Нью-Йорке, обсаженная деревьями аллея вела в дом ученого на улице Мерсер, где и был создан его легендарный образ.

Представления американских физиков были иными, чем в Европе. В то время как в Старом Свете обсуждали философ-

ские аспекты квантовой механики, американские взгляды еще находилась под влиянием идей Томаса Эдисона: теоретическая физика должна служить экспериментальной физике. В свете концептуальной революции, пришедшей из Европы, Джон К. Слейтер позволил себе провокационное заявление: «Физик-теоретик должен требовать от своих теорий лишь одно: делать достаточно точные прогнозы результатов экспериментов». Физик-ядерщик Эдвард Кондон (который станет известным в 1960-е годы во время руководства Боулдеровским проектом по НЛО в Колорадском университете) объяснял с иронией свое видение работы физиков-теоретиков: «Они тщательно изучают результаты, полученные от физиков-экспериментаторов, затем переформулируют их труд в статьях, настолько математических, что даже им самим сложно их читать».

Такое отношение к теоретической физике не предвещало ничего хорошего для математиков... Несмотря на все это, Фейнман прибыл в МТИ с намерением изучать именно математику. К середине первого семестра он вошел в кабинет директора департамента математики и задал ему классический вопрос: «Для чего необходима математика?» И получил вполне классический ответ: «Если вы задаете себе подобный вопрос, значит, вы ошиблись в выборе профессии». Директор не преминул проинформировать его о том, что существовала возможность избежать карьеры преподавателя математики: необходимо было стать агентом в страховой компании. Карьера офисного сотрудника совсем не привлекала Фейнмана, и он даже захотел заняться электротехникой. Но ему не понравилось, что этот предмет слишком сосредоточен на практических результатах. И далее он уже обратился к физике.

МТИ имел очень четкую идею управления своим научным департаментом. Джордж Истмен, изобретатель фотопленки, профинансировал работу новых лабораторий физики и химии. Среди главных объектов исследований фигурировало использование электромагнитного спектра для обнаружения тайн, спрятанных внутри материи: приближалась эпоха масштабной спектроскопии. В качестве дополнения к этой экспериментальной программе для студентов читали курс «Введение в теоре-

МАССОВАЯ НАУЧНАЯ ЭМИГРАЦИЯ

Большая диаспора еврейских ученых начала формироваться в 1933 году, с приходом к власти нацистской партии. Начиная с 1928 года антисемитизм все более усиливался в Германии: сам Эйнштейн для собственной безопасности решил не появляться больше на публике. Арнольд Зоммерфельд, сделавший большой вклад в квантовую теорию, посередине лекции разбил в аудитории доску, когда открыл ее и увидел надпись «Проклятые евреи!» В Германии был принят закон, запрещающий евреям, их детям и внукам занимать административные должности. Из-за этого мать Ханса Бете потеряла работу. Как и многие другие, он покинул Германию: уехал в Англию и в феврале 1935 года окончательно поселился в Итаке, на территории Соединенных Штатов Америки. Так же как и Бете, много европейских ученых поднялись на палубу нового Мэйфлауэра, чтобы отправиться в США. В этом же году Фейнман покинул свой город и отправился в Бостон, чтобы учиться в МТИ. Его прошение для поступления в Колумбийский университет в Нью-Йорке было отклонено. Трое лучших американских физиков работали на тот момент в МТИ: Джон С. Слейтер, Филип М. Морс и Джулиус А. Страттон.



Начиная с 1935 года магазины в нацистской Германии, принадлежащие евреям, подвергались погромам, чтобы люди ничего в них не покупали. На витринах можно было прочесть: «Еврей!»

ПЕРВЫЙ КОНТАКТ С КВАНТОВОЙ ТЕОРИЕЙ ПОЛЯ

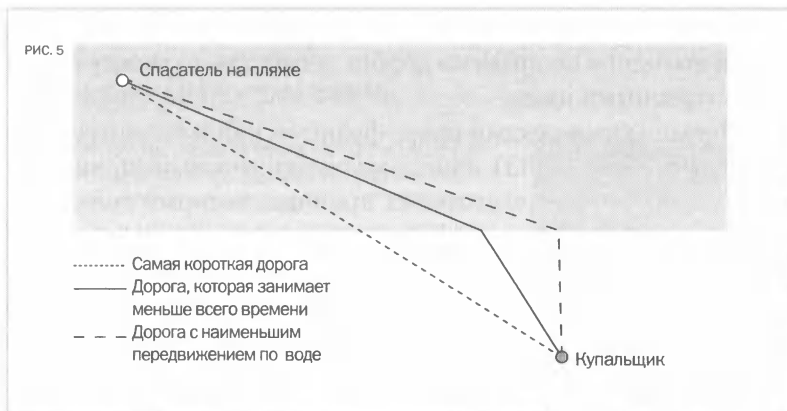
Весной 1936 года Теодор А. Велтон и Фейнман горели желанием изучить новую квантовую теорию. С малым количеством книг, которые были в их распоряжении, два молодых человека решили заняться самообразованием, и буквально через несколько месяцев они уже знали мельчайшие детали квантовой революции. В письме, датированном от 23 июля 1936 года, Велтон пишет:

«Дорогой Р.Ф... Я понял, что ты написал это уравнение:

$$\left[(P_\mu - K_\mu) g^{\mu\nu} (P_\mu - K_\mu) + m^2 c^2 \right] \psi = 0.$$

То, что недавно «открыл» молодой Фейнман, является уравнением Клейна — Гордона, релятивистской версией уравнения Шрёдингера. «Почему ты не применяешь его к водородному атому?» — давит на него тогда Велтон. Фейнман проводит расчеты и, как это было в случае со Шрёдингером десятью годами ранее, приходит к выводу, что данное уравнение не годится для достаточно точных прогнозов. И действительно, уравнение Клейна — Гордона не подходит для исследования поведения релятивистских электронов: когда речь идет о релятивистской частице, это означает, что она движется со скоростью, близкой к скорости света. Факт, доказанный Полем Дираком, за который он получил Нобелевскую премию. Для Фейнмана это настоящий шок. Но он извлекает из него урок: красота какой-либо теории заключается не в математической элегантности, а в том, что она является «лакмусовой бумажкой» реального мира. Сам того не зная, он впервые сталкивается с теорией поля, которая принесет ему Нобелевскую премию.

тическую физику». Целью курса было объединить предметы, которые студенты изучили, такие как электромагнетизм, термодинамика, оптика и так далее. Но главной задачей было преподавать основы спектроскопии, а именно современную атомную теорию. Среди немногих учеников, посещавших этот курс, присутствовали двое новичков: Фейнман и один молодой человек, уроженец Саратога-Спрингс, штат Нью-Йорк, Теодор А. Велтон. Они быстро стали друзьями: Велтон говорил, что он знал теорию относительности Эйнштейна, а Фейнман изучил квантовую механику, читая книгу некоего Дирака. Другие студенты



Чтобы решить эту классическую проблему, нужно учесть тот факт, что спасатель передвигается быстрее по песку, чем в воде. Таким образом, самая быстрая дорога расположена между самой короткой дорогой по прямой линии и той, которая занимает меньше всего времени в воде.

курса очень скоро заметили, что эти двое были весьма одаренными учениками. В курсе введения в теоретическую физику Фейнман узнал небольшой математический прием, сыгравший ключевую роль в его манере исследования. Однако, в отличие от своих товарищей, он отнесся к данному приему довольно прохладно, когда услышал о нем впервые.

СПАСАТЕЛЬ И КУПАЛЬЩИК

Давайте представим спасателя на пляже, удобно сидящего на своем стуле и вглядывающегося в океан. Вдруг в свой бинокль он замечает в воде купальщика, который зовет на помощь. Какой дорогой можно добраться до него быстрее всего (рисунок 5)? Прямая линия, как мы все знаем, является самой короткой, однако спасатель проведет слишком много времени в воде, в которой он будет передвигаться не так быстро, как бегом по песку. Самым оптимальным путем был бы тот, что требует меньше всего времени на пребывание в воде (который идет перпендикулярно к берегу). Однако даже в этом случае спасатель слишком долго добирался бы до купальщика, так как дополнительная дистанция, которую нужно преодолеть на пля-

же, скомпенсировала бы время, выигранное при быстром беге. Самая выгодная по времени дорога лежит где-то между двумя рассмотренными нами.

Несколькими веками ранее французский математик Пьер де Ферма (1601–1665) нашел математическое решение для этой задачи. Он сформулировал принцип, который делал возможным иной подход к вопросам распространения света: принцип наименьшего времени. Некогда Ферма на самом деле столкнулся с дилеммой, похожей на проблему спасателя. По какой траектории будет двигаться свет, когда он проходит через границу раздела двух сред, имеющих разную плотность? Мы все знаем, что ложка, опущенная в стакан с водой, кажется сломанной: это и есть феномен преломления. В этом случае свет ведет себя таким же образом, как и спасатель: его скорость в воде меньше, чем в воздухе, что и приводит к эффекту «искажения». В 1621 году голландский астроном Виллеброрд Снелл ван Ройен рассчитал угол отклонения светового луча на границе двух прозрачных сред. Этот закон, более известный как закон Снеллиуса, в дальнейшем будет изучаться всеми лицеистами. Формулируя свой принцип, Ферма доказал, что свет подчиняется данному закону, потому что он всегда выбирает самый быстрый путь, чтобы пройти между двумя пунктами, как и наш спасатель.

Но разве можно утверждать, что любая вещь перемещается, следуя принципу наименьшей затраты времени? Распространяется ли этот принцип на движение футбольных мячей, пушечных ядер или астероидов? Или существует какой-либо иной параметр, нежели время, который так же минимизируется, когда объект совершает какое-то перемещение? Этот параметр установил французский ученый Пьер Луи Моро де Мопертюи в 1744 году. С его именем связан новый, почти магический способ понимать движение тела без необходимости использовать законы движения Ньютона. Фейнман открыл для себя данный закон в школе благодаря своему преподавателю физики М. Бадеру:

ВЕЛИКАЯ ТЕОРЕМА ФЕРМА

Имя Пьера де Ферма (1601–1665) ассоциируется с одной из самых известных теорем математики. В 1637 году он написал на скорую руку заметку на полях «Арифметики» знаменитого греческого математика Диофанта из Александрии (214–298 до н.э.). В ней он сформулировал теорему («для любого натурального числа $n > 2$ уравнение $x^n + y^n = z^n$ не имеет решений в целых, ненулевых числах x, y, z ») и сообщил, что найденное им остроумное доказательство слишком длинное, чтобы изложить его здесь. Скорее всего это утверждение Ферма недостоверно, не только потому, что понадобилось 350 лет, чтобы снова найти это доказательство, которое не является очевидным, а также потому, что это «действительно восхитительное доказательство» занимает не менее 109 страниц № 141 журнала *Annals of Mathematics*, вышедшего в 1995 году.



«Однажды он позвал меня в класс и сказал мне: «У тебя скучающий вид, сейчас я расскажу тебе кое-что интересное». И он рассказал мне об одной невероятно увлекательной вещи, которая не перестает интересовать меня: о принципе наименьшего действия».

Представим себе баскетбольный мяч, летящий к кольцу. Благодаря законам Ньютона мы можем рассчитать, какова будет его траектория, анализируя действующие на него силы. С принципом наименьшего действия это больше не понадобится: достаточно наблюдать за энергией мяча в каждый момент времени. Мы знаем, что мяч, находящийся на некоторой высоте над полом, обладает потенциальной энергией. А для того чтобы перемещаться с определенной скоростью, ему необходима

кинетическая энергия. Давайте подсчитаем кинетическую энергию в каждый момент движения и вычтем из нее потенциальную энергию. Далее вычислим сумму всех полученных результатов: итоговую величину принято называть действием. Принцип наименьшего действия гласит, что истинной траекторией мяча будет та, действие которой будет всегда иметь самое маленькое значение. Для любой другой траектории действие всегда будет больше действия реальной траектории. Мопертюи выразил это очень образно: «Природа бережлива во всех своих действиях».

Дальнейшее развитие принципа наименьшего действия было связано с именем Жозефа Луи Лагранжа. В 1788 году он опубликовал свой труд «Аналитическая механика», который лег в основу лагранжевой механики. Лагранж переформулировал механику Ньютона. В лагранжевой механике траектория вычисляется при помощи нахождения пути, который минимизирует действие. В основе вычислений лежит интеграл от функции Лагранжа по времени. Функция Лагранжа для классической механики вводится в виде разности между кинетической энергией и потенциальной энергией (лагранжиан). Использование лагранжиана позволяло решать некоторые проблемы, неразрешимые посредством ньютоновского подхода. Хотя школьник Фейнман был очарован принципом наименьшего действия, студент Фейнман был от него в ужасе. Его друг Тед Велтон позже заявлял:

«Фейнман отказывался соглашаться с тем, что Лагранж мог быть полезен в физике. Мы все были взволнованы элегантностью и полезностью его формулы, но Дик упрямо настаивал на том, что настоящая физика основана на идентификации сил и на правильном определении их составляющих».

По иронии судьбы, самый большой вклад Фейнмана в физику был сделан благодаря использованию этого подхода, который он так ненавидел в течение своих студенческих лет.

РЕВОЛЮЦИЯ В ДЕЙСТВИИ

Мир физики продвигался вперед гигантскими шагами. Весной 1938 года на устах всех ученых, работающих в этой области, были такие слова, как «ядерное деление» и «цепная реакция». Все задумывались над способом выражения энергетического потенциала атомного ядра. МТИ решил предложить своим студентам семинар Морса на тему структуры ядра. Очевидно, что ни Фейнман, ни Велтон не упустили бы такую возможность. Напряжение витало в воздухе от всеобщего предчувствия того, что еще немного — и кто-нибудь найдет доказательства возможности расщепить атом. Так и случилось: в конце этого же года немцы Отто Ган и Фриц Штрассман при помощи Лизы Мейтнер сумели расщепить ядро урана.

Реальный опыт часто противоречит фундаментальным законам.

РИЧАРД ФЕЙНМАН

Снова Велтон и Фейнман надолго оказались на неизвестной территории без какого-либо гида. Всякий, кто желал знать больше относительно ядерной физики, должен был изучить три монументальных статьи Ханса Бете, опубликованные в журнале *Reviews of Modern Physics* и известные как «Библия Бете». Фейнман заинтересовался ядерной физикой, что спустя несколько лет привело его к работе над созданием первой атомной бомбы. Его преподаватели были так восхищены своим учеником, что порекомендовали выдать ему диплом на год раньше: через три года обучения, вместо положенных четырех лет. Но университет отказал в их просьбе. Во время последнего учебного года Фейнман работал над своей первой научной статьей под названием «Молекулярные силы» (опубликованной в *Physical Review*), ходил на лекции по металлургии, а также придумал странный аппарат для измерения зависимости между скоростями двух осей при их вращении...

Осенью 1938 года, когда до получения диплома оставалось совсем немного, отец Фейнмана приехал в МТИ, чтобы встретиться с Морсом и узнать у него, был ли его сын достаточно прилежным. Преподаватель ответил однозначно: Фейнман был самым блестящим студентом, которого он когда-либо знал. Мелвилл мечтал видеть сына ученым еще со времени беременности своей жены, и вот, наконец, его заветное желание становилось реальностью. Но Фейнман еще должен был выбрать, чем он будет заниматься после учебы. Он хотел остаться в МТИ, но Джон Слейтер настоял, чтобы Ричард ехал куда-нибудь в другое место, «открывать для себя мир».

Гарвардский университет предложил ему место после математического конкурса William Powell Putnam, самого престижного испытания для университетских студентов. Никто не мог решить все конкурсные задачи, а значительный процент учащихся не мог справиться даже с одной. В 1939 году разрыв между результатами Фейнмана и других участников был настолько велик, что он удивил даже членов жюри. Тогда, не колеблясь, они предложили ему место в Гарварде, однако он отклонил предложение, так как его интересовал Принстон. Почему? Наверное, потому что в Принстоне, в Институте перспективных исследований, преподавал Эйнштейн; возможно, также и потому что многие статьи по физике, которые он читал в библиотеке, были написаны в университете Принстона.

От Принстона до атомной бомбы

В этот период Ричард Фейнман находится на пике своих способностей, готовый с помощью своих идей произвести революционный переворот в физике. При поддержке своего научного руководителя Джона Уилера, наделенного большим творческим потенциалом, он вскоре внесет колоссальный вклад в квантовую теорию. Но война ставит работу Фейнмана в тупик, так как она ослабляет его способность «чувствовать» сущность уравнений — талант, который за всю историю человечества выпал на долю лишь немногих избранных.

Фейнман прибыл в Принстон осенью 1939 года, намереваясь получить докторскую степень. Он был убежден, что будет работать с одним из великих специалистов по квантовой теории — Юджином Вигнером. Этот венгерский физик и математик, будущий лауреат Нобелевской премии, активно интересовался политикой. Особенно его всегда беспокоила воинственная позиция Гитлера. Тревогу Вигнера, кстати, разделял его соотечественник и коллега Лео Силард, известный своим даром предсказывать политические события. Ходят слухи, что в 1934 году он в деталях предсказал события, вызвавшие вскоре Вторую мировую войну. Встревоженный немецкой экспансией, Силард попросил Вигнера познакомить его с Альбертом Эйнштейном. На эту встречу, которая состоялась 2 августа 1939 года, Силард принес черновик письма, в котором настойчиво просил президента Франклина Д. Рузвельта запустить программу исследований с целью создания атомной бомбы. С помощью Вигнера и еще одного ученого, Эдварда Теллера, ему удалось убедить Эйнштейна. В этот же день гениальный физик подписал знаменитое письмо.

Такова была ситуация на тот момент, когда Фейнман прибыл в Принстон. Вопреки его ожиданиям, вместо Вигнера ему назначили другого руководителя, 28-летнего профессора, при-

ПЕРВЫЕ ШАГИ К АТОМНОЙ БОМБЕ

Американский физик венгерского происхождения Лео Силард (1898–1964) стал первым ученым, серьезно задумавшимся над созданием атомной бомбы. Эта идея пришла к нему после того, как он прочитал научно-фантастический роман Герберта Уэллса «Освобожденный мир». В 1933 году, стремясь избежать нацистского преследования, он приехал в Лондон, где в *The Times* ему попался отчет об одной конференции, организованной Эрнестом Резерфордом, во время которой тот отрицал возможность использования атомной энергии. Силард был уверен, что Резерфорд ошибается. Он чувствовал, что однажды станет возможно использовать энергию, скрытую в атоме, с помощью управляемой цепной реакции (процесса деления ядер, который, будучи однажды запущенным, начинает поддерживать сам себя).



Лео Силард, возможно первый ученый, который всерьез поднял тему создания атомной бомбы.

Во время своей первой попытки управлять цепной ядерной реакцией Силард использует бериллий и индий, но безуспешно (цепная реакция не началась). В 1936 году, чтобы сохранить свою работу в секрете, он уступает патент на реакцию британскому адмиралтейству. Затем, в 1938 году, он принимает предложение Колумбийского университета продолжить свои исследования по данной теме и переехать жить в Нью-Йорк. Уже там он знакомится с итальянским физиком Энрико Ферми.

Эта встреча произошла в то время, когда немцы Ган и Штрассман объявили о первом удачном расщеплении атома. В 1939 году Ферми и Силард доказали возможность развития в уране самоподдерживающейся ядерной реакции. После этого Силард сказал: «Этой ночью я убедился, что миру вскоре предстоит пережить свои самые ужасные времена».

ехавшего в университет за год до него: Джона Арчибальда Уилера. Как и в случае с Вигнером, Принстон предложил ему работу, чтобы начать программу по ядерной физике. Владелец незаурядного ума, он стал наставником целого поколения

физиков, которые внесли огромный вклад в космологию и теорию относительности. И, между прочим, термин *черная дыра* придумал именно он.

В 1939 году Джон Уилер — это молодой сероглазый профессор с внешностью и манерами джентльмена. Фейнман являлся его ассистентом и заменял своего учителя, когда тот отсутствовал, сначала на лекциях по механике, затем — по ядерной физике. Каждую неделю они собирались, чтобы подвести итоги и проанализировать свою исследовательскую работу. Понемногу их отношения наставник-ученик переросли в отношения коллег. В это время физика частиц еще не была популярна. Как доказательство можно привести решение организаторов конгресса физиков-теоретиков, который должен был пройти в Вашингтоне в 1940 году и для которого необходимо было определить тему: поколебавшись между элементарными частицами и внутренним устройством Земли, они окончательно склонились ко второму.

Несмотря на все это Фейнман знал, что он интересуется очень перспективной областью. Читая книгу Дирака по квантовой механике, он был поражен охватившим его чувством: слишком многое оставалось неизведанным, требовались новые идеи. Дирак и другие пионеры квантовой электродинамики (отрасль науки, которая изучает связь между электричеством, магнетизмом, светом и материей) не могли дать ответы на все вопросы, и теория оставалась неполной. Вскоре Фейнман тоже отправится в путешествие по этому пути.

НЕОКОНЧЕННОЕ ПУТЕШЕСТВИЕ

Квантовая теория достигла своего расцвета в 1924–1927 годах, но ей предстоял еще очень долгий путь. Ученые еще не слишком хорошо представляли себе, как использовать принцип неопределенности Гейзенберга или волны материи де Бройля. Также было непонятно, как включить теорию относительности Эйнштейна в эту уже частично собранную мозаику.

Институт физиологии в Брюсселе организовал пятый Сольвеевский конгресс (его основная тема называлась «Электроны и фотоны»), открывшийся в понедельник 24 октября 1927 года. Речь идет о самом значимом конгрессе новейшей истории физики: 17 из 29 присутствующих ученых уже получили или получают в скором времени Нобелевскую премию. Название конференции не отражало настоящей цели конгресса: открыть дорогу квантовой физике.

Именно во время этого конгресса Эйнштейн, который не желал отказываться от детерминизма, произнес свою знаменитую фразу: «Бог не играет в кости». На что Бор ответил: «Кто вы такой, Эйнштейн, чтобы говорить Богу, что он должен делать?»

Природа сама не знает, какой путь выберет электрон.

Ричард Фейнман

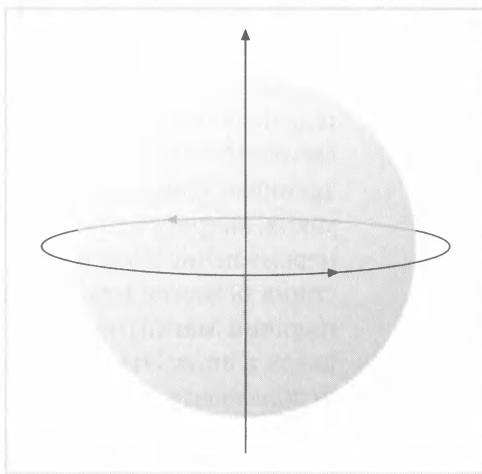
На этом историческом собрании также присутствовал молодой 25-летний британский физик Поль Адриен Морис Дирак. Бесконечные философские дискуссии по поводу интерпретации квантовой теории его не тронули. Что было и не удивительно: Дирак был образцом неразговорчивого и замкнутого английского студента. Молчаливый и несловоохотливый (его друзья даже придумали «дирак» — единицу минимума слов, которые могут быть произнесены в разговоре), он работал все дни в одиночестве, кроме воскресенья, когда он выходил на прогулку... один. В 1926 году ему удалось объединить в одном уравнении волновую механику Шрёдингера и матричную механику Гейзенберга, но ему хотелось добиться чего-то большего. Дирак испытывал такое увлечение теорией относительности Эйнштейна, что поставил себе новую задачу: получить релятивистское уравнение квантовой механики. Он безуспешно посвятил два года данному исследованию. Во время Сольвеевского конгресса молодой ученый поделился своими намерениями с Бором. Тот сообщил ему, что Клейн уже опередил его. Дирак

знал, что это не так, но у него не было возможности объяснить это Бору, поскольку конференция, в которой они принимали участие, началась.

Однако разговор с Бором убедил Дирака в необходимости ускорить работу. Надо сказать, что он был в большей степени математиком, нежели физиком, и поэтому подошел к вопросу как к математической задаче, а физическую интерпретацию оставил на потом. Проблема состояла в следующем: в теории относи-

тельности время входит в уравнения на тех же основаниях, что и три измерения (x, y, z ; то есть длина, высота и ширина), и таким образом является четвертым измерением. Шрёдингер же не рассматривает время как одно из измерений, поэтому его уравнение не является релятивистским. Уравнение Клейна – Гордона устраняло это противоречие, но оно не было способно объяснить спектр атома водорода. К тому же оно не учитывало новую характеристику электрона, предложенную Вольфгангом Паули (который уже в 18 лет был признанным специалистом по теории относительности), чтобы объяснить результаты, полученные экспериментальным путем Отто Штерном и Вальтером Герлахом в 1922 году: спин (см. рисунок). Чтобы сделать данное понятие более наглядным, можно представить электрон маленькой сферой, которая вращается вокруг себя подобно планетам: это вращение и понимают под спином. Но на этом вся аналогия и заканчивается, так как если оборот одной планеты может иметь любое значение, то спин электрона может принимать всего два: $+\frac{1}{2}$ и $-\frac{1}{2}$.

Благодаря творческому подходу к математике Дирак работал уравнение, объединявшее две великие теории начала XX века. Это действительно был подвиг, концептуальный триумф. Включив четырехмерное пространство-время

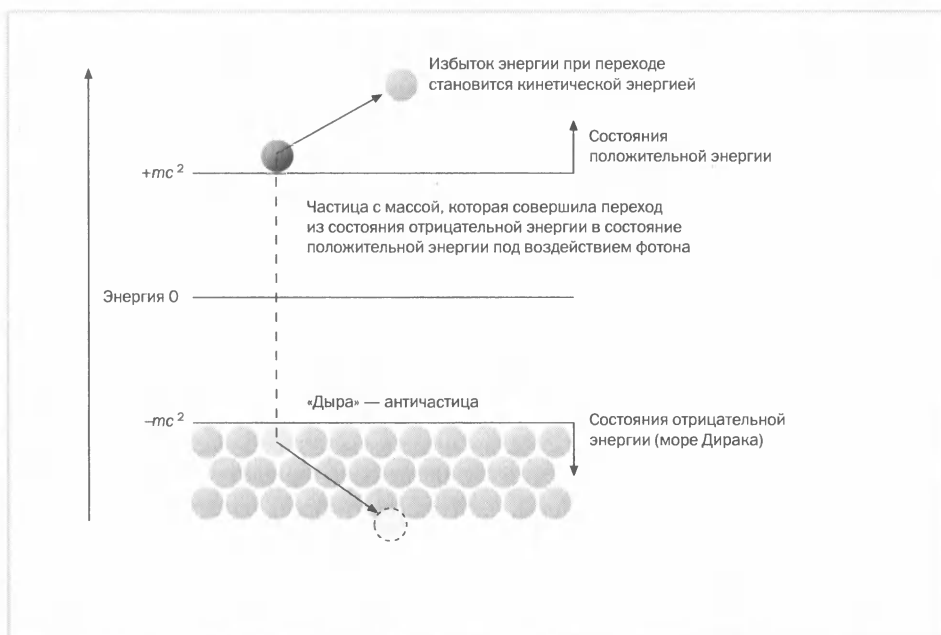


Очень часто (и неправильно) спин определяют как направление вращения субатомной частицы. На самом деле речь идет об исключительно квантовом понятии, не имеющем классических аналогов.

в квантовую теорию, он получил четвертую степень свободы электрона, которую определил как спин. Каким бы ни был спин, он ни в коем случае не означал вращения электрона. Речь шла исключительно о квантовом понятии, не связанном с классической физикой. Таким образом, спин был и остается внутренним свойством электрона, полностью отличным от других, таких, например, как орбитальный момент, который описывает перемещение электрона вокруг атомного ядра. Интерпретация спина остается неясной и в наши дни, но мы знаем, что при наличии магнитного поля он может иметь два направления: вверх и вниз. Эта особенность электрона позволяет, например, использовать магнитно-резонансную томографию в больницах.

Уравнение Дирака распространилось словно лесной пожар и получило широкое признание. Тем не менее существовала одна проблема: два состояния электрона с различной ориентацией спина, полученные Дираком, представляли только половину решения. Существовали два других состояния, которые характеризовались загадочной отрицательной энергией. Эти два «дополнительных» решения означали, что электрон мог перейти из своего нормального состояния с положительной энергией и отрицательным зарядом в состояние с отрицательной энергией и положительным зарядом. Экспериментально такой переход никем не наблюдался, что ставило под сомнение обоснованность уравнения Дирака. Бор писал в 1928 году: «Дирак был здесь (в Лейпциге, в июне 1928 года) и произнес хорошую речь о своей гениальной теории. Однако он знает не больше, чем мы, как решить задачу $+e \rightarrow -e$ ».

Дирак бился над этой проблемой в течение двух лет и, наконец, в декабре 1929 года нашел решение. Он предположил, что отрицательные уровни энергии заполнены морем ненаблюдаемых электронов. Они ни с чем не взаимодействуют: они находятся за декорациями театра, перед которыми играют актеры. Актеры и представляют мир положительной энергии, которую можно измерить. Но бывает, что один из электронов, которые живут в этом море, при приложении внешней энергии «выпрыгивает», оставляя за собой «дырку». Дирак считал, что эта «дырка» будет принимать вид протона. «Выпрыгнув-



ший» же электрон станет обычным наблюдаемым электроном. Однако коллеги напомнили Дираку, что электрон имеет массу в 2000 раз меньше, чем протон, и значит, невозможно, чтобы, выпрыгивая из моря отрицательной энергии, он оставил за собой пустоту в 2000 раз тяжелее, чем он сам. Дирак признал свою ошибку и в 1931 году согласился, что «дыра» должна иметь такую же массу, как и электрон, но с положительным электрическим зарядом: «[Мы столкнулись лицом к лицу] с новой частицей, неизвестной физике, которая имеет такую же массу, как и электрон, но с противоположным зарядом».

В 1932 году американский физик Карл Дейвид Андерсон обнаружил эту загадочную частицу: позитрон, античастица электрона. Данное открытие подтвердило правоту уравнения Дирака и одного из великих предсказаний релятивистской квантовой механики.

Тем не менее уравнение Дирака не давало полного объединения теории относительности и квантовой теории, так как оно

«Море Дирака», которое объясняет существование антиматерии.

не описывало ни того, что происходит во время столкновения между электроном и фотоном, ни того, что происходит в процессе аннигиляции, когда позитрон сталкивается с электроном, выделяя два или три фотона с очень большой энергией. Но чтобы понять суть этих проблем, нам необходимо переместиться во времени и вернуться в середину XIX века, чтобы познакомиться с одним из лучших физиков-экспериментаторов истории, британцем Майклом Фарадеем (1791–1867).

ПОЛЕ, ЗАПОЛНЯЮЩЕЕ ПРОСТРАНСТВО

Сын малообеспеченного человека, Фарадей получал образование самостоятельно, благодаря книгам, которые попадались ему в течение тех семи лет, что он был учеником переплетчика. Его открытия были впечатляющими: он установил различные связи между электричеством и магнетизмом, заложил основы электрохимии, изобрел электродвигатель и динамо... И все это Фарадей сделал, будучи «математически невежественным»: он не использовал уравнений и формул, чтобы описать свои открытия, он излагал их обычным «уличным» языком. Но главным теоретическим достижением Фарадея было создание понятия поля. В то время никто не мог объяснить, почему яблоко падает с дерева или почему Земля вращается вокруг Солнца. Ньютон открыл закон тяготения, но не объяснил, почему он работает. Все это выглядело, как если бы Солнце порождало загадочную силу на планетах, на большом расстоянии и практически мгновенно. Из-за своей абсурдности такое объяснение не нашло общей поддержки. Но закон тяготения работал, и так хорошо, что ученые отложили в долгий ящик теоретические проблемы, которые он поднимал... до того времени, когда Фарадей завел речь о полях.

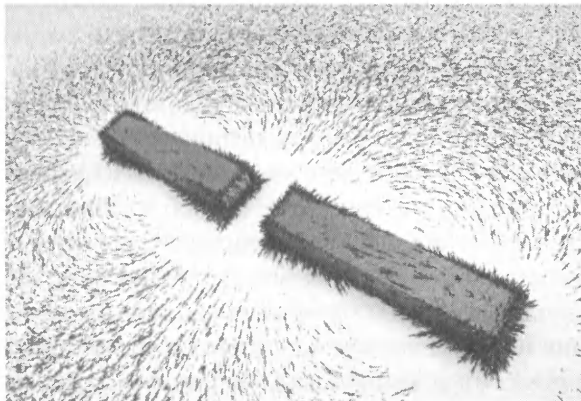
Мы не отдаем себе в этом отчет, но пространство, которое нас окружает, содержит не только материю. Например, если бы мы освободили комнату от всей находящейся в ней материи до последней пылинки и до последней молекулы воздуха, мы

все равно не могли бы утверждать, что в ней совсем ничего нет. Самое наглядное доказательство этому: если мы поместим туда грушу, она упадет на пол. Следовательно, «что-то» в комнате заставляет ее упасть. И не важно, с какой стороны мы ее кинем: груша упадет прямо на пол. Даже пустая, комната наполнена тем, что мы называем гравитацией. Другими словами, наша комната находится в гравитационном поле. Как объяснить его

ЖЕЛЕЗНЫЕ ОПИЛКИ И МАГНИТЫ

То, что мы обычно называем силой (какой бы она ни была, гравитационной, электрической или магнитной), является не чем иным, как действием, которое оказывает поле на помещенное в него тело. Что еще более важно: материя обладает свойствами (мы уже открыли два — массу и заряд), которые делают ее чувствительной к различным полям. Если материя лишена одного из них (например, если электрический заряд равен нулю), соответствующее поле не оказывает на нее никакого действия, как если бы его вообще не было. Фарадей выявил существование этих полей посредством опыта, который мы часто проводим в школах. Итак, положим железные опилки на листок бумаги и поместим снизу магнит. Опилки начнут перемещаться, образуя характерный узор, соответствующий силовым линиям магнитного поля. Если мы уберем магнит и немного потрясем бумагу, образовавшийся узор исчезнет. Это означает, что магнитное поле, появившееся благодаря

магниту, изменяет свойства пространства.



Если разместить железные опилки около магнита, они соберутся вокруг него особым образом, демонстрируя наличие магнитного поля в этой области пространства.

присутствие? По всей очевидности, источником этого поля является наша планета.

Но это не единственный довод: если мы запустим по прямой линии электрически заряженную частицу, например электрон, и внимательно проанализируем ее траекторию, тогда четко увидим, что, как и в случае с грушей, «что-то» изменяет ее путь, но это не гравитация. Исследовав данное явление, мы поймем, что это «что-то» имеет влияние только на частицы, обладающие зарядом, и не затрагивает нейтральные частицы. Таким образом, мы обнаружили существование другого поля, электромагнитного. Откуда берется это поле? Оно представляет собой совокупность разных полей: электромагнитного поля Земли, электромагнитных полей, создаваемых антеннами мобильной связи, телевизорами и радио, линиями электропередач, кухонными электроприборами и так далее.

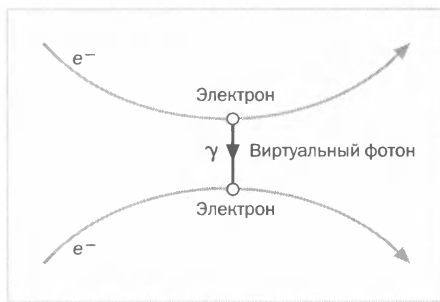
Очень слабый свет подразумевает лишь малое количество фотонов. Но увидеть электроны означает изменить их.

Ричард Фейнман

Вернемся к Дираку. Его уравнение описывает поведение электрона в движении в классическом электромагнитном поле. В классической физике поля постоянны. Для полного понимания того, что происходит в микромире, необходимо было осуществить квантование электромагнитного поля.

Так же как электромагнитное излучение состоит из фотонов, электромагнитное поле можно представить состоящим из «кусочков». Дирак создал метод «вторичного квантования» и таким образом заложил основу квантовой электродинамики. В 1927 году ученый применил этот способ к электромагнитному полю и обнаружил, что оно превратилось в море частиц. Таким образом, с одной стороны, мы имеем частицы материи, а с другой — частицы поля, которые позволяют осуществлять электромагнитное воздействие одной частицы материи на другую. Фактически они действуют как посланники, которые несут информацию об электромагнитном взаимодействии. Когда электроны отталкиваются, квантовая электродинамика предпо-

лагает, что частица-посредник служит для осуществления взаимодействия между ними. Электрическое отталкивание электронов есть не что иное, как обмен между частицами. Можно сравнить электроны с двумя конькобежцами, которые перебрасываются тяжелым мячом. Сообщая мячу импульс при броске и получая импульс с принятым мячом, они отталкиваются друг от друга. Механизм отталкивания электронов работает похожим образом.



Согласно квантовой электродинамике, электростатическое отталкивание между двумя электронами связано с их обменом виртуальными фотонами.

Если конькобежцы являются электронами, тогда кто играет роль мяча? Фотон (в любом случае мы знаем, что фотоны не имеют массы) — частица-посредник во время электромагнитного взаимодействия. Согласно квантовой электродинамике, электромагнитное поле — это бесконечная совокупность фотонов, каждый из которых ведет себя как гармонический осциллятор. Как в случае с морем Дирака, фотоны распределяются по всему пространству, но остаются невидимыми нашему глазу или какому-либо другому детектору. Они носят название *виртуальных фотонов* (см. рисунок). Мы можем познакомиться с их существованием только опосредованно, благодаря эффекту, во время которого они вызывают взаимодействие двух заряженных частиц между собой.

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОНА

Никогда такая маленькая частица не приносила столько хлопот. Электрон создавал проблемы даже в относительно спокойном мире классической физики. Мы знаем, что речь идет о заряженной частице, но есть ли у нее размер? Если мы будем рассматривать ее как маленький шарик, то как объяснить, что он не разрушается из-за отталкивания между его составными частями? Не сумев ответить на данный вопрос, мы могли бы

заявить, что электрон является не шариком, а безразмерной точкой. Увы, это тоже не решение, потому что вместе с безразмерностью в уравнениях об электромагнетизме появляется деление на ноль: в игру вступает бесконечность — верный знак присутствия ошибки в теории. Проблема энергии электрона после его воздействия на себя являлась головоломкой.

В 1929 году Гейзенберг и Паули, изучавшие проблему собственной энергии электрона с квантовой точки зрения, получили первые результаты, из которых следовало: энергия электрона бесконечна. Это объясняется тем фактом, что в квантовой электродинамике электрон не является просто частицей, а сопровождается облаком виртуальных фотонов. Речь идет о выпущенных фотонах, которые затем поглощаются этим же электроном, и так до тех пор, пока они не будут обнаружены наблюдателем. Принцип неопределенности Гейзенберга позволяет электрону испускать фотоны, обладающие сколь угодно большой энергией...

Стало быть, существует теория, позволяющая детально рассчитать собственную энергию электрона при его взаимодействии со своим полем, но когда мы ее применяем, внезапно со всех сторон возникают бесконечные величины. Израсходовав все свои возможности, физики больше не знали, что делать. Блистательный Гейзенберг должен был признать себя побежденным: он оставил эту тему и посвятил себя изучению сегнетоэлектричества.

Фейнман изучал этот вопрос с разных сторон еще в то время, когда был студентом МТИ. Осенью 1940 года он возобновил свои попытки и спросил себя: почему бы не исключить эти бесконечные величины, предположив, что электрон не взаимодействует со своим собственным полем? Он даже выдвинул еще более дерзкую идею: а что если явление, которое мы называем электромагнитным полем и которое возникло в результате обмена виртуальными фотонами, было фикцией? Не мог ли электромагнетизм быть простым взаимодействием между заряженными частицами, не требующим для своего существования никакого поля? Как он заявил впоследствии в своей нобелевской речи:

«Мне казалось очевидным, что идея частицы, которая воздействует сама на себя, не является необходимой; это было даже глупо. Именно тогда я подумал, что электроны не могут взаимодействовать сами с собой, а только с другими электронами. Это означало, что не существует никакого поля. Речь идет о прямом взаимодействии между зарядами, правда, с известными оговорками».

Такие идеи были очень рискованными, но именно по этой причине они не оставили равнодушным Уилера. Если речь шла об исследовании новых горизонтов, трудно представить лучшего тандема, чем Фейнман и Уилер. Они были из тех, кто не боится рисковать.

Плевать на мины. Полный вперед!

ЗАЯВЛЕНИЕ ФЕЙНМАНА, КОТОРОЕ ПЕРЕКЛИКАЕТСЯ С ФРАЗОЙ АМЕРИКАНСКОГО АДМИРАЛА ДЭВИДА ФАРРАГУТА, ПРОИЗНЕСЕННОЙ ВО ВРЕМЯ ГРАЖДАНСКОЙ ВОЙНЫ В США

Фейнман знал, что у его идеи был существенный изъян: сопротивление излучения. Когда заряженная частица ускоряется, она испускает излучение и теряет энергию. Поэтому модель атома Резерфорда была непонятной с точки зрения классической физики: электрон, вращаясь вокруг атома, обладает центростремительным ускорением. Именно сопротивление излучения заставило Бора ввести понятие квантовой орбиты.

Чтобы электрон начал двигаться, на него должна действовать сила. И сила, действующая на заряженный электрон, должна отличаться от той, которая действует на незаряженный. Эта сила была названа сопротивлением излучения, и согласно принятым взглядам, она создавалась электроном, взаимодействующим с самим собой. Гипотеза же Фейнмана утверждала, что электрон действует только на другие электроны. Но если бы существовал единственный электрон в мире, испускал бы он излучение? А если бы существование сопротивления излучения требовало присутствия какой-то другой частицы? Фейнман заинтересовался этим вопросом, представив, что в мире существует только два электрона. Предположим, что первый

начинает двигаться: в таком случае, согласно законам электромагнетизма, он оказывает воздействие на второй, что заставляет его тоже двигаться и в результате оказывать воздействие на первый. Могло бы это предположение объяснить сопротивление излучения?

Эта гипотеза очаровала Уилера, но он быстро обнаружил важное обстоятельство: эффект зависит от расстояния до другого электрона и от его заряда, чего быть не должно. К тому же Фейнман не учел обязательную задержку во времени — воздействие на первый электрон произойдет через какой-то временной интервал, так как, согласно теории относительности, ничто не движется быстрее, чем свет. И тогда Уилер предложил еще более сумасшедшую идею: а что если электромагнитная сила, оказываемая второй частицей, действует вспять во времени? Такое предложение походило больше на научную фантастику, чем на физику, но важным в этом подходе является то, что законы электромагнетизма позволяют существовать как волнам, выпущенным до того, как они будут поглощены (опоздание волны), так и волнам, поглощенным до того, как они будут выпущены (опережение волны). Иными словами, ничто в уравнениях не противоречило этому предположению. Единственное возражение носило философский характер: необходимо было считаться с принципом причинности, согласно которому причина должна предшествовать последствию. Например, поезд должен покинуть вокзал, с которого он отправляется, до того, как он прибудет на конечную станцию, или мяч должен попасть в цель после того, как игрок по нему ударит, а не наоборот. Но согласно предложению Уилера, если мы перемещаем заряд, другой заряд начнет двигаться немного раньше.

В этом-то и заключена одна из самых странных загадок физики. Законы механики и электромагнетизма симметричны на временной оси: если временной указатель неожиданно меняется, законы остаются неизменными. Эта временная инвариантность фундаментальных законов классической физики не имеет аналога в реальном мире, где мы способны различать прошлое и будущее. Но тогда возможно ли, чтобы электрон испустил свое излучение как в будущее (опоздание волн),

так и в прошлое (опережение волн), как маяк, который светит в двух противоположных направлениях? Заинтригованные таким предположением, двое ученых начали на доске в аудитории Уилера расчет. В конце первого часа работы они не нашли ничего, что могло бы этому помешать.

Фейнман много работал, принимая во внимание, что подход Уилера требовал огромного количества очень сложных расчетов. Понемногу новая модель принимала свою форму. Речь шла уже не о двух электронах, а о системе, включающей электрон и множество других частиц вокруг: «Все прошло без сложностей, все складывалось в совершенство». То, что они только что создали, было не квантовой, а классической теорией, которую они называли «теорией полуопережающих и полузапаздывающих потенциалов». Следующий этап напрашивался сам собой:

«Мы рассчитывали, что избавившись от трудностей сначала в классической физике и сделав затем из этого квантовую теорию, мы могли бы и ее привести в порядок».

К сожалению, эта квантовая теория полуопережающих и полузапаздывающих потенциалов так и не увидела свет: ни один, ни второй не смогли ее разработать. Десятью годами позже Фейнман напишет Уилеру: «Я думаю, что мы ошиблись в 1941 году. Ты согласен?» Но ответил ли ему на этот вопрос его наставник и друг, так и осталось неизвестным.

ДИССЕРТАЦИЯ И ЖЕНА

Если и был человек, который оказал колоссальное влияние на жизнь Ричарда Фейнмана, так это Арлин Гринбаум. Он влюбился в нее еще подростком. Арлин была одаренной девушкой: она играла на пианино, пела, рисовала и могла вести интересные беседы об искусстве и литературе. Фейнман, напротив, не интересовался искусством, и любой жанр музыки его раз-

дражал, несмотря на неоспоримое чувство ритма: в МТИ его неосознанное и непрерывное желание барабанить на всех возможных и воображаемых поверхностях действовало на нервы его соседям по комнате.

В Принстоне отношения двух влюбленных обрели зрелость и глубину. Арлин изучила Ричарда «от и до» и имела редкую способность вызывать в нем стыд: например, она знала о его тщеславии и была безжалостна, когда чувствовала, что он обеспокоен мнением других. «Какое тебе дело до того, что думают о тебе другие?» — не переставала она ему повторять. Как при такой поддержке Фейнману было не похвастаться своей честностью и независимостью? По мере того как Ричард продвигался в своей работе, они все чаще навещали друг друга. Письма, которые молодые люди отправляли друг другу, ясно говорили об их чувствах, об их наивной вере в будущее и об их желании быть вместе, какие бы обстоятельства ни случились в жизни. Но одно из этих писем, от 3 июня 1941 года, показывает, что в жизни Арлин наступали трудные времена. У нее на шее появилась опухоль, сопровождавшаяся необъяснимой лихорадкой:

«Завтра доктор Тревес сообщит мне новости... Я приму все, что он мне скажет, но Нэн мне написала, что есть возможность проконсультироваться у другого доктора для подтверждения диагноза, а также следует показать ему результаты биопсии».

В это время Фейнман и Уилер упорно работали над квантовой формулировкой своей теории. Главной проблемой было то, что математические уравнения этой «экзотической» теории плохо адаптировались для квантовой механики. Сложность заключалась во взаимодействии между частицами в различные моменты времени: «Характер траектории одной частицы в данный момент времени зависит от характера траектории другой частицы в совершенно другой момент времени». В квантовой механике время очень хорошо контролируется: если мы знаем состояние системы в определенный момент времени, то уравнения позволяют определить состояние системы в любой другой

момент. Но электродинамика Фейнмана и Уилера требовала данных о расположениях и перемещениях многочисленных частиц в несколько различных моментов, и все это для того, чтобы определить состояние одной частицы. Настоящая головоломка!

В течение осени и зимы 1941–1942 годов Фейнман работал не покладая рук над своей теорией, используя своих старых «знакомых»: формализм Лагранжа и принцип наименьшего действия. Основной идеей данного подхода было то, что не следует обращать внимание на происходящее в определенный момент, а скорее, нужно сконцентрироваться на интервале времени. Напомним, что цель этого подхода состоит в том, чтобы выяснить, какой из всех путей, позволяющих частице перемещаться из одного пункта в другой, имеет наименьшее среднее значение действия. Расчеты Фейнмана показали, что с помощью этого принципа теория Уилера могла быть переформулированной, так как он позволял рассматривать путь частицы как одно целое: «Здесь мы имеем инструмент, который описывает характер траектории через все пространство-время». Но как это выразить на языке квантовой механики? Чтобы разобраться, будет полезно познакомиться с некоторыми тонкостями теории.

Если существует болезнь, симптом которой — вера в то, что логика может контролировать превратности судьбы, тогда Фейнман страдал этой болезнью, именно так же, как он страдал хроническим нарушением пищеварения.

ДЖЕЙМС ГЛЕЙК В БИОГРАФИИ РИЧАРДА ФЕЙНМАНА

Волновая функция, описывающая поведение субатомной частицы (и которая находится при решении уравнения Шрёдингера), доказывает, что все частицы ведут себя в каком-то смысле как волны в бассейне. Это означает, что они могут быть подвержены волновым феноменам, таким, как дифракция и интерференция. Особенностью волновой функции является

то, что она описывает не частицу как таковую, а вероятность найти эту частицу в указанном месте. Если волновая функция отличается от нуля в некоторых точках (при этом она может принимать как положительные, так и отрицательные значения), частица ведет себя так, как будто она находится во многих местах одновременно. Уравнения квантовой механики служат для нахождения изменения этой волновой функции во времени. Другими словами, они определяют трансформацию совокупности данных вероятностей (найти частицу в определенном месте) во времени. Однако существует важная и очень тонкая деталь, которая объясняет, почему кажется, что такие частицы ведут себя как волны: вероятность определяется не самой волновой функцией, но ее квадратом.

Квантовая механика дает совершенно абсурдное с точки зрения здравого смысла описание природы.

Ричард Фейнман

Допустим, мы желаем узнать вероятность того, что две частицы, А и В, находятся в одной коробке. Квантовая теория убеждает нас, что волновая функция системы соответствует сумме волновых функций каждой из этих частиц. Теперь предположим, что значение волновой функции А внутри коробки равняется $\frac{1}{2}$, значение волновой функции В — $\frac{1}{2}$. Если бы была только А, вероятность найти ее в коробке являлась бы значением волновой функции в квадрате, а именно $(\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$. Если бы была только В, вероятность была бы $(-\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$. А сейчас самое удивительное: так как мы имеем две частицы, вероятность найти одну из них равняется сумме значений их волновых функций в квадрате: $\{(\frac{1}{2}) + (-\frac{1}{2})\}^2$. Результат — ноль! Можно ли представить настолько нелепую ситуацию? Если бы речь шла об одной частице, у нас был бы один шанс из четырех найти ее в коробке. Но с того момента, когда их две, нет никакого шанса найти одну или вторую. Фактически речь идет о явлении интерференции, с которой мы уже сталкивались в опыте с двумя

щелями. Частицы способны иметь волновые свойства, они могут взаимодействовать и подавлять друг друга.

А теперь давайте применим это к траекториям, которые может выбрать частица. Представим, что мы хотим поехать от А до С через В (рисунок 1). Вероятность добраться этим маршрутом рассчитывается как произведение вероятности поехать из пункта А в пункт В и вероятности поехать из пункта В в пункт С: $P(ABC) = P(AB) \times P(BC)$. С другой стороны, вероятность доехать из пункта А в пункт С все равно каким путем (рисунок 2) равна сумме всех вероятностей $P(ABC)$ путей, проходящих через *любой* пункт В. Предположим, что существует лишь три способа приехать в пункт С (B_1, B_2, B_3). Вероятность тогда равна $P(AC) = P(AB_1C) + P(AB_2C) + P(AB_3C)$. Однако в квантовой ме-

ханике все работает совсем по-другому, так как необходимо возвести волновую функцию в квадрат, чтобы рассчитать вероятности. В первом случае мы должны умножить волновые функции, соответствующие каждому этапу пути, а затем возвести в квадрат. Во втором случае, как для каждой частицы в коробке, нужно сложить волновые функции (которые иначе называют амплитудами вероятности) каждого пути, затем возвести результат в квадрат. В конце 1941 года Фейнман спросил себя, может ли он описать формализм квантовой механики как амплитуды вероятности, соответствующие определенным траекториям, вместо того чтобы описывать его исключительно этими амплитудами, как делалось до него.

Чтобы описать квантовую систему, физики искали «оператор Гамильтона» (математический объект, связанный с общей энергией системы). После его определения они могли перехо-

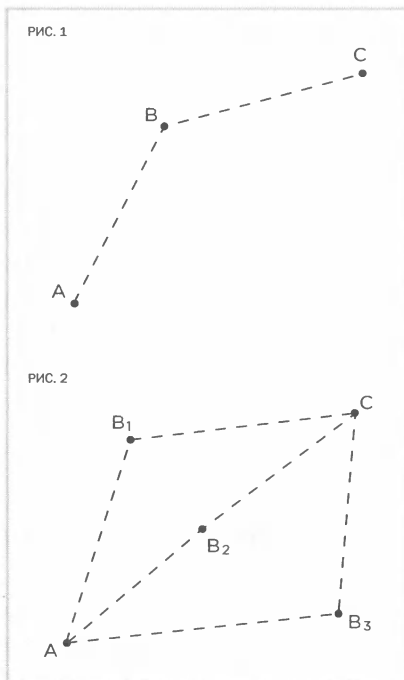


РИСУНОК 1:
Путь от А к С
проходит через В.

РИСУНОК 2:
Путь от А к С
проходит через
все возможные
пункты В: B_1, B_2, B_3 .

дить к расчетам. Данный метод не работал в мире временных задержек Уилера и Фейнмана. Успеха можно было добиться, только применив формализм Лагранжа и принцип наименьшего действия. Если бы у них это не получилось, то все их усилия были бы тщетны. Но как их применить? Ответ пришел во время пивного фестиваля в таверне «Нассау» в Принстоне. В этот день Фейнман, сидя рядом с Гербертом Йеле, бывшим студентом Шрёдингера, спросил его о том, знает ли он кого-то, кто уже применял принцип наименьшего действия в квантовой механике. Его лицо осветилось в тот момент, когда Йеле ответил, что Дирак, один из его кумиров, написал статью по этому поводу восемь лет назад.

ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО КВАНТОВОГО ДЕЙСТВИЯ

Упомянутая статья называлась «Лагранжиан в квантовой механике». Дирак высказывал мысль, что данный метод мог быть очень продуктивным и показывать неплохие результаты, так как он использовал принцип наименьшего действия, и лагранжиан мог быть простым способом ввести результаты теории относительности Эйнштейна.

Мы не нашли ничего ошибочного в теории квантовой электродинамики. Исходя из этого, я сказал бы, что речь идет о жемчужине научной мысли.

Ричард Фейнман «Свет и материя: странная история» (1954)

В своей статье Дирак подошел к проблеме так же, как и Фейнман, то есть рассчитывал вероятность, связанную с траекторией частицы. Но Дирак не углублялся в данную тему, а работал только над некоторыми деталями. Это Фейнмана не смущало, так как он знал уже достаточно, чтобы следовать

намеченному Дираком пути. Его больше беспокоило следующее высказывание английского физика: «Мы должны ожидать, что существует квантовый аналог величины...» «Что это слово [аналог] делает в статье о физике?» — взорвался Фейнман. — Если два выражения аналогичны, не являются ли они тогда равными?» «Нет, — ответил ему Йеле, — несомненно, Дирак не хотел сказать, что они равны». Тогда Фейнман подошел к доске и начал делать расчеты. Дирак был прав, они не были равны. Тогда он подумал: «Может быть, если добавить константу...»

Он начал писать так быстро, что Йеле не мог угнаться за ним, прыгая от одного уравнения к другому, пока на доске не появилось что-то очень знакомое: уравнение Шрёдингера. Действительно существовала связь с формализмом Лагранжа! Как одержимый, Йеле начал переносить в тетрадь уравнения, написанные на доске. Слово «аналог», употребленное Дираком, означало «пропорциональный». Фейнман только что обнаружил нечто очень важное. Только один вопрос еще его мучил: как великий Дирак мог этого не учесть? Таким образом, когда он встретил его в 1946 году во время празднования 200-летия Принстона, между ними состоялся следующий диалог.

— Знали ли вы, что величины не аналогичны, а пропорциональны? — спросил Фейнман.

— В самом деле? — спросил Дирак.

— Да.

— О! Как интересно!

Учитывая крайне молчаливый характер Дирака, это был очень долгий разговор...

Применяя лагранжиан, Фейнман воспроизвел результаты, полученные при решении уравнения Шрёдингера. Чтобы рассчитать амплитуду вероятности серии траекторий, нужно было просто назначить специальную величину (положительную или отрицательную) для каждого пути, пропорциональную общему действию этого пути (которое само является кратным постоянным Планка). Затем было достаточно суммировать все эти величины, связанные с амплитудами вероятности каждого пути,

и возвести результат в квадрат. Таким образом, получаем вероятность того, что мы переместимся из пункта А в пункт С в определенное время. Фейнман держал в своих руках замечательный математический инструмент, позволявший исследовать очень сложные проблемы, такие, например, как его собственная теория полуопережающих и полузапаздывающих потенциалов.

В то время, когда он писал свою докторскую диссертацию, болезнь Арлин прогрессировала. Была заражена лимфатическая система. В 1941 году она продолжала визиты к врачам, чтобы лечить это «воспаление гланд», — ее семья назвала ей этот ложный диагноз, чтобы скрыть окончательный вердикт врачей: болезнь Ходжкина, вид злокачественной и смертельной лимфомы. Фейнман не желал обманывать Арлин. Влюбленные решили, что между ними никогда не будет лжи — даже лжи во благо. Как можно было попросить его солгать по такому важному вопросу?

Родители Арлин, врачи, ее родная сестра — все настаивали на том, что это жестоко — рассказать девушке во цвете лет о ее скорой смерти. Противостояние закончилось тем, что сопротивление Фейнмана было сломлено, и молодой человек решил пойти на компромисс. Он написал «прощальное письмо» и всегда носил его с собой, чтобы отдать его Арлин, если она узнает правду. Фейнман был уверен, что она никогда его не простит за такой обман.

Долго ждать не пришлось. Возвращаясь из больницы, Арлин слышала рыдания своей матери, которая рассказывала соседке об ужасной судьбе, ожидавшей ее дочь. Когда Ричард пришел ее навестить, Арлин очень настойчиво потребовала объяснений, и у него не было другого выхода, как признаться. Фейнман отдал ей письмо и попросил выйти за него замуж.

Но беда никогда не приходит одна. Когда Фейнман пришел поговорить с ректором о том, что его невеста умирает и что вскоре он женится на ней, то выяснил: в таком случае ему придется лишиться тех 200 долларов, которые он зарабатывал в год в качестве ассистента профессора. Фейнман начал обдумывать возможность прекратить исследования и пойти на работу. Он

стоял перед этой дилеммой, когда из больницы ему сообщили, что обнаружили палочку Коха в лимфатических узлах Арлин. Она страдала не болезнью Ходжкина, а редкой формой туберкулеза. Врачи и не думали проверять данное предположение, так как статус больной не соответствовал категории риска: Арлин не была ни слишком молодой, ни достаточно бедной, чтобы находиться под угрозой «белой чумы». Хотя не суще-

ВОЙНА РАЗВОРАЧИВАЕТСЯ

После обращения Эйнштейна с письмом к президенту Рузвельту идея о создании атомной бомбы становится в Вашингтоне все более популярной, хотя для ее воплощения пока предпринято мало шагов. Тем не менее угрозу, которую представляет ось Берлин-Рим (военный союз Германии и Италии), воспринимают всерьез. 28 июня 1941 года Рузвельт подписывает исполнительный приказ 8807 о создании Бюро научных исследований и развития, предназначенного для координации любых научных исследований в военных целях. Шестью днями ранее немцы начинают операцию «Барбаросса» с целью завоевания Советского Союза. Япония осуществляет политическое давление на восточные страны, и с апреля

ее высшее командование планирует захват природных ресурсов Южной Азии, контролируемых Англией и Нидерландами. В декабре Япония атакует американские базы на Перл-Харборе и Гуаме, а также Гонконг и Филиппины (которые в тот момент были автономией в составе США), затем захватывает Таиланд и Малайзию. Когда Соединенные Штаты Америки вступают в войну, четверть из более чем 7000 физиков, которых насчитывает страна, привлекается для военных разработок при Бюро научных исследований и развития. А Фейнман погружен в написание своей докторской диссертации.



Президент Соединенных Штатов Америки Франклин Делано Рузвельт подписывает декларацию об объявлении войны Германии, 11 декабря 1941 года.

ствовало эффективного лечения от туберкулеза, фатальный исход не был неизбежным, и со свадьбой больше не спешили. Когда Арлин объявила об этом Ричарду, он заметил легкое разочарование в голосе своей невесты.

В ЛЮБВИ И НА ВОЙНЕ

Весной 1941 года грохот немецких пулеметов MG-34 раздавался во всем мире. Ученые, покинув нацистскую Европу, обосновались в американских университетах. Последние прибывшие, вроде Герберта Йеле, рассказывали жуткие истории о преследованиях и концентрационных лагерях. Активное участие исследовательских центров в военном машиностроении начало давать результаты. Например, нацистское фиаско в битве за Англию во многом было обязано новой системе обнаружения самолетов с помощью микроволнового излучения — радара. В это время почти никто не знал, что в особняке Блетчли-Парк, в 80 км от Лондона, математик Алан Тьюринг (1912–1954) заложил основу для создания первого компьютера, вошедшего в историю под названием «Колосс». Его задачей было расшифровать перехваченные сообщения немецкой армии и флота.

Однажды утром 1942 года Роберт Р. Уилсон вошел в рабочий кабинет Фейнмана. Этот физик-экспериментатор пришел в Принстон для работы над методом разделения изотопов нужного физикам урана-235 и неиспользуемого урана-238. Он собирался сообщить Фейнману секретную информацию о своей работе: нужно было, чтобы ученый произвел теоретические расчеты, и получить его согласие можно было только в случае детального изложения проблемы.

Фейнман хотел закончить свою диссертацию. Это являлось одним из условий, которые он поставил перед собой до свадьбы. Ему казалось, что предложение Уилсона было больше связано с проблемой инженерии, чем физики, и вначале Фейнман хотел отклонить его. Однако шла война: поскольку у ученого не было

уверенности, что в армии он будет заниматься своим делом, он предпочел не поступать на службу. Теперь ему предлагали возможность принять участие в чем-то большом и важном: поэтому он согласился отложить свою докторскую диссертацию и принялся за работу.

Я хочу жениться на Арлин, потому что я ее люблю, и для меня это означает, что я стремлюсь заботиться о ней. Это все, что я могу сказать: я хочу окружить ее заботой. [...] Однако у меня есть и другие жизненные цели и желания. Между прочим, я мечтаю внести свой ощутимый вклад в физику. На мой взгляд, это даже важнее, чем моя любовь к Арлин.

ФЕЙНМАН О СВОЕМ БРАКЕ С АРЛИН ГРИНБАУМ

В то самое время Уилер переехал в Чикаго, чтобы работать с Энрико Ферми над созданием ядерного реактора, способного поддерживать управляемую цепную реакцию деления: это был первый шаг к пониманию неуправляемой реакции, ведущей к взрыву бомбы. Вигнер тоже проводил все больше и больше времени в Чикаго, и весной 1942 года оба профессора пришли к согласию, что их блистательный студент должен сначала закончить свою диссертацию, прежде чем запутается в методах разделения изотопов урана. Давление наставников имело ожидаемый эффект.

Фейнман очень хорошо знал, что он совершил: он заново изобрел квантовую механику, исходя из принципа наименьшего действия. Но он также знал, чего он не сделал, и этому он посвятил последнюю главу своей диссертации. Во-первых, его работа не содержала никакой ссылки на экспериментальную проверку, так как его формула была полностью не релятивистской. Создание квантовой электродинамики, исходя из формулы Лагранжа, требовало работы, которую он не выполнил. Во-вторых, его больше интересовала физическая интерпретация этой новой формулы. Фейнман отлично знал: один из самых яростных споров, который вели физики в последние

десятилетия, был посвящен тому, что называли «проблемой измерения». Общепринятой точкой зрения была копенгагенская интерпретация, в правоте которой Бор убедил большое количество физиков (за исключением Эйнштейна) и которая гласила, что мы живем в мире, где свойства микрообъектов не существуют, пока они не измерены: поэтому невозможно отделить исследуемый объект от наблюдателя.

Фейнман вел дискуссию по этому поводу с математиком Джоном фон Нейманом. Суть дискуссии заключалась в следующем. Известно, что наблюдение требует наличия двух вещей: лабораторного инструмента и электрона, или, если быть более точным, большой макроскопической системы, существующей по законам классической физики, и микрообъекта, подлежащего квантовой механике. Где находилась граница между этими двумя объектами? Фон Нейман утверждал, что каждый должен был решить по своему усмотрению, где выбрать место для этой границы. Фейнман находил данное предложение спорным и неприемлемым. Если квантовая механика была описанием реальности, то разделение должно было возникнуть естественным образом и ни в коем случае не могло зависеть от чьих-то желаний.

Математический инструмент, предложенный Фейнманом в 1948 году, который он назвал «интеграл по траекториям», позволял разделить систему на различные части: изолировать область системы, которую нужно измерить, от других областей, не представляющих интереса. Этот метод, недоступный для обыкновенных уравнений квантовой механики, казался математическим каламбуром, но не будем обманываться: именно с его помощью появились многие великие достижения XX века в теоретической физике.

Фейнман знал, что проблемой его формулы было время, так как она должна была «рассказать о состояниях системы, иногда очень удаленных от настоящего момента». Найти физическую интерпретацию для данной формулы означало провести титаническую работу. Ученого выводило из себя то, что он не мог этого сделать. Как бы там ни было, в июне он представил свою диссертацию «Принцип наименьшего действия в кванто-

вой механике». А несколькими днями позднее Фейнман сообщил своей семье, что в следующем году он женится на Арлин.

Новость сильно обеспокоила Люсиль, его мать. Она думала, что болезнь Арлин будет только мешать карьере ее сына. Ее также тревожило и то, что лечение от туберкулеза было дорогостоящим и что уход за больным требовал полнейшей самоотдачи. Люсиль сомневалась, что Ричард располагает деньгами и необходимым временем, чтобы заботиться об Арлин. По ее словам, стремление Ричарда жениться проистекало из его желания доставить удовольствие любимому человеку, «немного похоже на то, как ты иногда ешь шпинат, чтобы сделать мне приятное». Одним словом, она посоветовала ему оставаться «женихом». На это Фейнман ответил, что его решение разделить жизнь со своей возлюбленной непоколебимо, но, тем не менее, у него есть и другие приоритеты. И Арлин, умная девушка, также это знала и поддерживала его.

Брак состоялся в мэрии Статен-Айленда, без друзей и членов семьи. Чтобы не заразиться, новоиспеченный супруг поцеловал свою жену в щеку. После церемонии он отвез Арлин в ее новое жилище, благотворительную больницу в Нью-Джерси. Сам ученый готовился отправиться в Нью-Мексико, в место под названием Лос-Аламос: он собирался принять участие в одном из самых важных научных проектов XX века — создании атомной бомбы.

НОВОЕ СОЛНЦЕ В НЕБЕ

В 5.30 утра 16 июля 1945 года на полигоне Аламогордо, расположенном на пустынной равнине Нью-Мексико под названием Джордана дель Муэрто, Джулиус Роберт Оппенгеймер отдал приказ привести в действие первую в истории атомную бомбу. Фейнман прибыл в Лос-Аламос с первой волной ученых в конце марта 1943 года и был распределен в теоретическую группу под руководством Ханса Бете, бесспорного «отца» ядерного деления.

ЧЕЛОВЕК, КОТОРЫЙ ВЫЯСНИЛ, ПОЧЕМУ ЗВЕЗДЫ СВЕТАТ

В апреле 1938 года два светила современной физики, Георгий Гамов (1904–1968) и Эдвард Теллер (1908–2003), организовали конгресс в Институте Карнеги в Вашингтоне, целью которого было ответить на вопрос: почему звезды светят?

Среди участников находился беженец из нацистской Германии, специалист по ядерной физике и преподаватель Корнелльского университета Ханс Бете (1906–2005). Всегда полный энергии, Бете имел врожденный талант к физике и математике: кажется, что он все свое время посвящал игре с цифрами и буквами. На конгрессе в Вашингтоне астрономы объяснили физикам все, что им было известно о внутреннем строении звезд. Несмотря на огромное количество информации, имевшейся по данной теме, никто из них не мог сказать, откуда в звездах берется энергия. Один из классических трудов по астрофизике «*Внутреннее строение звезд*», созданный Артуром Эддингтоном, хорошо описывает внутреннюю структуру звезд, не упоминая об их энергетическом источнике. И вот настала очередь физиков заняться этим вопросом.



В 1938 году немецкий физик Ханс Бете открыл механизм термоядерных реакций, объясняющий, как звезды производят свою энергию.

Определение Бете

Вернувшись в Корнелл, Бете принялся за проблему и решил ее так быстро, что Гамов подумал: уж не получил ли физик ответ еще до того, как поезд, в котором он возвращался, достиг нужной станции? Бете отправил свою статью по данному вопросу в журнал *Physical Review*, но один из его студентов сказал ему, что Академия наук Нью-Йорка назначила премию в 500 долларов за лучшую новую работу об энергетических процессах в звездах. Тогда Бете попросил журнал вернуть ему статью обратно, отправил ее на конкурс и, естественно, выиграл его. Кстати, у физика были веские причины участвовать в нем: его мать все еще находилась в Германии, и хотя нацисты разрешили ей выехать, они требовали 250 долларов за разрешение вывезти ее мебель. Поэтому Бете пустил половину своего вознаграждения от конкурса на эту цель. В 1967 году эта статья принесла ему Нобелевскую премию.

А тем временем Арлин решила лечь в клинику, расположенную в Альбукерке, в 160 километрах от Лос-Аламоса. Ричард приезжал навещать ее каждые две недели. Два года, прошедшие в этом регионе, много для него значили, так как именно здесь жизнь дала ему шанс, которым, пусть и неосознанно, он не преминул воспользоваться:

«Однажды случилось так, что Хансу Бете не с кем было поговорить. По этой причине он заговорил с самонадеянным и дерзким мальчишкой, которому была выделена небольшая комната для работы: он стоял в ней и размышлял вслух, излагая свою идею. «Вовсе нет! — говорю я ему. — Это не так. Произойдет это, это и это». А он мне отвечает: «Один момент», — и начинает объяснять, почему то, что говорит он, не является вздором, а то, что говорю я, таковым является. И это продолжалось достаточно долго».

Такая же сцена имела место и во время первого семинара Фейнмана. Когда он начинал размышлять о физике, то полностью забывал, с кем разговаривает:

«В действительности именно по этой причине я оказался руководителем группы из четырех человек, подчиняясь непосредственно Бете».

Встреча с Бете — это лучшее, что могло случиться с Фейнманом. Уилер дал его крыльям раскрыться, используя свой энтузиазм и творческий подход, но теперь молодой человек нуждался в сдержанности и скрупулезности Бете. Их манера изучения физики отражала сущность их очень разных характеров. Бете начинал свои расчеты с самого начала и доводил их до конца, шаг за шагом, чего бы это ему ни стоило. Фейнман мог начать с середины или даже с конца, чтобы идти с одной стороны, затем с другой, перепрыгивая через промежуточные результаты... В здании теоретического отдела в Лос-Аламосе иногда слышали, как Фейнман начинал кричать в коридоре: «Нет, нет, нет. Это нонсенс!» Поднимая голову, его коллеги улыбались, и один из них говорил: «И понеслось, линкор про-

тив москита!» Они дали прозвище «линкор» Бете за его манеру решать задачи, двигаясь на полной скорости прямо вперед, к искомому. Фейнман же стал «москитом» по аналогии с прозвищем торпедных катеров, используемых флотом Соединенных Штатов Америки для атак на корабли больших размеров.

Чтобы начать блистать, Фейнману нужен был наставник уровня Бете. Самый главный урок, который последний дал ему, заключался в требовании, чтобы любой теоретический расчет содержал какие-то числа и величины, которые можно было бы сравнить с экспериментальными результатами. Этим принципом Фейнман будет руководствоваться до конца своей деятельности.

В итоге два года неистовой работы принесли огромные результаты. В письме 2 марта 1945 года Ричард рассказывал Арлин, как он лег спать в пять часов утра, а в девять часов тридцать минут был уже на ногах и прекрасно выспавшимся. Достижения Фейнмана были многочисленны и разнообразны: прежде всего, он разработал метод решения дифференциальных уравнений третьего порядка. Затем, вместе с Бете, он вывел формулу для оценки эффективности ядерного оружия. Он также работал над проблемой распространения быстрых нейтронов, вызывающих деление урана-235. Наконец, в течение последних месяцев перед первым испытанием ему поручили заниматься расчетами для сборки бомбы из плутония: если испытание «Тринити» было успешным, то во многом благодаря Фейнману, который руководил командой, занимавшейся окончательными расчетами при помощи электромеханических вычислительных машин, предоставленных IBM.

Если кто-то показывал ему физический парадокс, карточный фокус или что-то иное, он не спал до тех пор, пока не находил этому решение.

Комментарий Теда Уэлтона, друга Фейнмана, который тоже работал в Лос-Аламосе

Все в Лос-Аламосе были впечатлены способностями этого молодого физика. А тем временем, в 160 километрах отсюда, состояние Арлин ухудшалось.



ВВЕРХУ:
Конференция
в Лос-Аламосе
в рамках
проекта
«Манхэттен».
Первый ряд:
Энрико Ферми
(второй справа).
Второй ряд:
Роберт
Оппенгеймер
(третий справа)
и, слева от него,
Ричард
Фейнман.

ВНИЗУ:
Роберт
Оппенгеймер
(его левая нога
опирается на
груды обломков)
и генерал Лесли
Гровс (справа
от него) на
нулевой отметке
после испытания
«Тринити».

Ричард пишет ей, чтобы извиниться, 6 июня 1945 года. Каждая строчка его письма свидетельствует о мучительном чувстве вины.

«Моя дорогая жена,
Я всегда слишком медлительный. Из-за меня ты часто чувствуешь себя несчастной, потому что я трачу слишком много времени на поиски ответов. Теперь я тебя понимаю. И я сделаю тебя счастливой... Наконец, я осознал, как ты страдала... Этот ужасный период в прошлом, ты поправишься. Пусть ты и не веришь, но я в этом точно убежден... Я сожалею, что бросил тебя, что не стал опорой, в которой ты так нуждалась. Отныне я тот мужчина, на которого ты можешь рассчитывать и которому ты можешь верить. Распоряжайся мной как хочешь. Я твой муж. Я люблю женщину с большой буквы, терпеливую женщину. Прости меня. Я твой муж. Я люблю тебя».

Это было последнее письмо, которое Арлин получила от своего мужа. Она умерла 16 июня в 21.20. На следующий день Фейнман был занят организацией похорон и вернулся в Лос-Аламос поздно ночью. В его комнате что-то праздновали, он сел на стул с изможденным видом. На следующий день коллеги спросили Фейнмана, что произошло, и он ответил: «Она умерла. Где программа расчетов?» Он не хотел ни соболезнований, ни слез. Среди своих бумаг Ричард нашел блокнот, в котором он записывал ход болезни своей жены. Взяв его в руки, он написал: «16 июня — смерть». Фейнман хотел снова взяться за работу, но Бете отправил его в долгий отпуск к семье, в Фар-Рокуэй.

Ричард несколько недель оставался у родителей, пока зашифрованная телеграмма не заставила его вновь присоединиться к программе. Он вылетел из Нью-Йорка в Альбукерке и прибыл в пункт назначения 15 июля в полдень. Военная машина привезла Фейнмана к Бете. Времени было только на то, чтобы сесть в автобус, доставивший его в долину Джордана дель Муэрто, более известную с тех пор, как на ней появилась так называемая нулевая отметка.

Квантовая электродинамика: КЭД

В период после Второй мировой войны теоретическая физика переживает один из самых больших кризисов в своей истории. Теория, описывающая взаимодействие между фотонами и электронами, квантовая электродинамика (КЭД), порождает бесконечные величины в расчетах, и никто не знает, что с ними делать. Решение проблемы найдет Фейнман, и это принесет ему Нобелевскую премию.

Ричард Фейнман покинул Лос-Аламос в октябре 1945 года. Работа, которую он провел, принесла ему известность среди американских физиков. Два года ранее Оппенгеймер написал директору департамента физики университета Беркли, рекомендуя ему предложить место Фейнману, так как это был «без всякого сомнения, самый блестящий физик, который у нас есть». Переговоры были сложными, и окончательное предложение поступило Фейнману летом 1945 года. «Никто никогда не отклонял приглашений с нашей стороны», — с гордостью заявил директор. Однако Ричард Фейнман его отклонил.

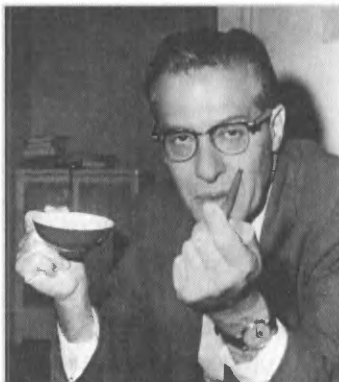
Фейнман был влюблен в стиль Бете и желал примкнуть к нему и к его исследовательской группе, которую тот создал в Корнелле. Оппенгеймер знал, что в скором времени он получит множество предложений о работе и, как всегда, оказался прав. Менее чем через год Фейнман получил большое количество приглашений, но он их все отклонил: он хотел стать участником группы Бете. Вместе с тем на душе у него становилось нехорошо: он начинал осознавать смерть Арлин. В первый раз Ричард признался себе в этом, когда прогуливался по городу Ноксвилл штата Теннесси. Фейнман был направлен туда, чтобы обеспечить технику безопасности в лаборатории Оук-Ридж, занимавшейся обогащением урана:

«Я шел вдоль витрин больших магазинов, которые предлагали красивые платья, и размышлял, какие из них понравились бы Арлин. Это было слишком тяжело для меня».

ДЖУЛИАН ШВИНГЕР

Родившийся в Нью-Йорке, Джулиан Швингер (1918–1994) рано увлекся наукой. Но, в отличие от Фейнмана, он знал, где раздобыть учебники по математике и физике: у букинистов, между 4-й и 5-й Аvenues. В возрасте 14 лет Джулиан поступает в Городской колледж Нью-Йорка, где его наставником становится первооткрыватель ядерного магнитного резонанса Исидор Айзек Раби. Последний никогда не упускал случая рассказать о том, как он познакомился со Швингером: однажды Раби зашел в свой кабинет

и увидел там молодого человека, который, вскочив, начал излагать идею, пришедшую ему в голову, о парадоксе Эйнштейна — Подольского — Розена в квантовой механике. Швингер редко посещает занятия и проводит все свое время, обычно по ночам, за изучением квантовой физики; поэтому нет ничего удивительного в том, что совет университета оказывается недоволен его поведением. Исидор Раби помогает своему ученику отправить его документы в Колумбийский университет. После того как перевод совер-



Фейнман начинает плакать в первый раз. Его отношения с матерью были испорчены после того, как она выступила против его брака. Перебравшись жить в Итаку, где находился Корнелльский университет, он даже не посетил ее. Тем временем Люсиль начинает понимать, какую боль она ему причинила, и отправляет ему полное нежности письмо, письмо матери, которая замечает, что теряет своего сына:

«Что происходит между тобой и твоей семьей? Что тебя отделило? Мое сердце тоскует по тебе. [...] Это, наверное, моя вина. [...] Ты нужен мне. Я люблю тебя. Я никогда не опущу руки. Даже сама смерть не может разбить то, что нас соединяет. [...] Мой дорогой, о мой дорогой, что еще я могу сказать тебе? Я тебя обожаю и буду обожать всегда».

шен, любимым развлечением Раби станут звонки профессорам Швингера с целью заставить их преодолеть свой страх и завалить его на экзаменах: «Кто ты? Человек или мышь? Поставь ему F (в англо-саксонских университетах F является самой низкой оценкой. — Ред.)», — скажет он однажды профессору химии. Он знает, что такая оценка будет терзать того больше, чем Швингера.

Всегда впереди

В 1936 году, в возрасте 18 лет, Швингер уже прекрасно знаком с новой физикой, которую Фейнману еще только предстоит открыть для себя. Этот молодой, крайне застенчивый человек проводит многие часы в библиотеке, скрупулезно разбирая статьи Поля Дирака в журнале *Proceedings of the Royal Society of London*. В этом году он пишет свою первую работу по физике: «О взаимодействии нескольких электронов». Его докторская диссертация готова еще до получения диплома, и он сотрудничает с элитой физики той эпохи: Ферми, Тейлором, Бете. В это время Фейнман учится на первом курсе в МТИ. В тот момент, когда Фейнман принимает решение отложить свою диссертацию, Швингер напрямую сотрудничает с Оппенгеймером в Беркли. Во время войны он предпочитает радиационную лабораторию в МТИ Лос-Аламосу и работает, в том числе, над улучшением радара — изобретением, которое англичане уступили американцам. На своих лекциях и семинарах он всегда говорит монотонным голосом, чтобы заставить публику размышлять.

Фейнман провел Рождество 1945 года у родителей. Душевная рана начинала заживать. Между прочим, он снова решил взяться за теоретическую работу, которую оставил неоконченной, когда покидал Принстон. Однако многочисленные попытки заняться ей не увенчались успехом. Фейнман был интеллектуально «вне игры» и изо всех сил пытался сосредоточиться. Его мужество терялось в какой-то непроходимой темноте, из которой он не мог или не хотел выбраться. Весной у него появилось ощущение, что его профессиональная жизнь закончилась. В Лос-Аламосе Фейнман сталкивался со значительными математическими трудностями, но его работа основывалась на своде хорошо известных физических законов, там он был далек от исследования неведомого. Он снова начал решать проблемы, которые возникли в процессе написания его

диссертации, но они касались фундаментальных вопросов, требующих напряженной работы мысли, и ему казалось, что он не сможет справиться с ними. Фейнман считал себя неспособным конкурировать с теми, кто не бросил свои исследования, как это сделал он, и кто был на три года впереди него. Среди его соперников был американский физик, его ровесник, молчаливый мужчина, который любил носить дорогую одежду и водить кадиллак: Джулиан Швингер.

Когда Фейнман приехал в Корнелл, им обоим было по 29 лет, но тогда как Фейнман был занят преподаванием одной из ординарных дисциплин (математические методы в физике), Швингер сразу стал профессором Гарварда, самым молодым из когда-либо преподававших в этом университете. Его лекции по ядерной физике пользовались популярностью в среде его коллег не только из Гарварда, но и из соседнего МТИ.

ПАДЕНИЕ И ПОДЪЕМ

Жизнь нанесла Фейнману новый удар 8 октября 1946 года. Прошло около полутора лет после смерти его жены, и у его отца, Мелвилла, случился сердечный приступ. Однажды ночью, девять дней спустя, находясь в глубокой депрессии, Фейнман схватил ручку и лист бумаги и написал единственному человеку, который был в состоянии ему помочь, своей умершей жене:

«Я люблю тебя, моя дорогая.

Знаю, как тебе нравится это слышать, но я пишу не только затем, чтобы порадовать тебя. Я пишу потому, что и сам таким образом получаю утешение. [...] Мне сложно понять, что означает любить тебя, после того как ты умерла, но я до сих пор хочу утешать тебя и заботиться о тебе; хочу, чтобы ты любила меня и заботилась обо мне. Я хочу иметь возможность обсудить с тобой свои проблемы, планировать с тобой всякие мелочи. [...] Когда ты заболела,

ты переживала, что не сможешь подарить мне то, о чем мечтала и что казалось тебе необходимым для меня. Не нужно было переживать. Как я тебе тогда объяснил, этого не требовалось, так как я очень тебя любил. И я до сих пор уверен: пусть ты больше ничего не сможешь мне дать, но я тебя обожаю и из-за своих чувств к тебе не смогу полюбить кого-то другого, и я не желаю перемен. Пусть ты ушла, но все равно ты гораздо важнее, чем любая другая живая женщина. Я знаю, ты подумаешь, что я сошел с ума. Ты хочешь, чтобы я был счастлив, и не желаешь быть препятствием на моем пути. Держу пари, тебя удивило бы, что у меня не было никого (кроме тебя, мое сокровище), даже мимолетного увлечения, в течение двух лет. [...] Я не понимаю, почему так. Я встречал много очень милых женщин, и у меня нет цели остаться одному, но после двух-трех встреч становилось ясно: они для меня — пустое место. Для меня остаешься только ты. Ты — реальна. Моя дорогая жена, я тебя обожаю. Я люблю свою жену. Моя жена умерла. Ричи. P.S.: прости меня, если я не отправлю это письмо, ведь я не знаю твой новый адрес».

Подавленный Фейнман выглядит чуть счастливей,
чем кто-либо другой, полный энтузиазма.

ХАНС БЕТЕ О ФЕЙНМАНЕ, ПЕРЕЖИВАВШЕМ СМЕРТЬ СВОЕЙ ЖЕНЫ

Письмо, найденное впоследствии значительно истрепанным (Фейнман часто его перечитывал), скользнуло в конверт, а конверт — в ящик стола. Никто ничего не знал о нем до смерти физика. Оно никогда не было темой анекдотов, которые сопровождали Фейнмана всю его жизнь.

Фейнман чувствовал себя одиноким. Он проводил часть времени в библиотеке, читая «Книгу тысячи и одной ночи», и вел себя так, словно снова вернулся в свою юность: ел в студенческом кафе, участвовал в праздниках и вечеринках. Ниче-

го удивительного в том, что девушки, которых Фейнман приглашал танцевать, смотрели на него с подозрением, когда он объяснял им, что был физиком и что недавно создал атомную бомбу... Тем не менее перед тем как покинуть Лос-Аламос, он стал походить на настоящего Казанову, всегда находясь в многочисленном обществе молодых красивых женщин.

Фейнману, который переживал худший период своей жизни, было особо нечего сказать в профессиональном плане, он потерял интерес к физике. Поэтому, когда он почти одновременно получил приглашения из университета Принстона и Института перспективных исследований, то сказал себе: «Они совсем с ума сошли». Ученый не понимал, почему он оказался востребованным, он даже не видел причины, по которой Корнелл принял его на работу. Уилсон посоветовал ему не волноваться, считая, что в данном случае рискует университет, а не Фейнман. «Если профессора должным образом проводят лекции, они выполняют свои обязательства», — добавил он. Никто не отдавал себе отчет в том, насколько Фейнману было плохо.

И тем не менее настало время перемен. Однажды, когда он ел в студенческом кафе, он увидел, как летит тарелка:

«Когда тарелка летела и вращалась, я заметил на ней эмблему Корнелла. Тарелка вращалась и раскачивалась, и было заметно, что эмблема поворачивается быстрее, чем качается. Мне было скучно, и тогда я начал делать расчет, каким было бы движение тарелки при вращении».

Его интуиция подсказывала ему, что два движения должны быть связаны, и он начал играть с уравнениями. Он использовал лагранжев формализм, с которым был так хорошо знаком, и получил отношение 2 к 1 между скоростью вращения и качания. Так как ученый хотел решить задачу в рамках ньютоновской механики, определив все действующие силы и составив уравнение движения, он принялся за работу. Окончив работу, он показал свои результаты Бете, который заявил: «Все

это очень хорошо, Дик. Но зачем это нужно?» На что Фейнман ответил: «Низачем. Я сделал это, исключительно чтобы развлечься».

Он снова загорелся страстью к физике:

«И я продолжал разрабатывать уравнения покачиваний. Затем я подумал о том, как орбиты электронов начинают двигаться в общей теории относительности. Затем уравнение Дирака в электродинамике. И уже потом — квантовая электродинамика. И, еще не осознав этого (понимание пришло очень быстро), я «играл» — в действительности работал — с той самой старой задачей, которую я так любил и которую забросил, когда уехал в Лос-Аламос».

Фейнман вернулся.

К БЕСКОНЕЧНОСТИ И ДАЛЬШЕ

Квантовая теория нуждалась в новых экспериментальных данных и новых теоретических идеях, способных вывести ее из того заторможенного состояния, в котором она пребывала вот уже 20 лет. Новые данные приходили из лабораторий, строивших циклотроны, первые ускорители частиц. Разогнанными частицами бомбардировали металлические пластины или газы. Результаты столкновений фотографировали благодаря детекторам под названием «пузырьковые камеры», способные регистрировать проход частиц. В 1936 году Принстон создал свой собственный ускоритель, стоимость которого была эквивалентна цене нескольких автомобилей. Что касается новых теоретических идей, то здесь ситуация была иная, так как идеи не падают с неба: они требуют долгих и напряженных размышлений. Чтобы выйти из тупика, в котором он находился с момента работы в Принстоне, Фейнман напряженно размышлял над своим квантовым уравнением. Он решил оставить Вселенной всего два измерения: пространственное и временное. Электрон мог перемещаться только вперед и назад по прямой

линии, как утки, в которых целятся в тире на ярмарке. С помощью такого упрощения Фейнман хотел понять, можно ли, пользуясь способом, который он придумал в Принстоне, вывести одномерное уравнение Дирака. И у него получилось, но он решил не публиковать этот результат, воспринимая его лишь как знак, указывающий ему, что он был на верном пути.

Между тем, физиков-теоретиков все больше охватывало чувство бессилия. Вот уже 20 лет они бились над важной задачей, но были так же далеки от ее решения, как и в самом начале. Откуда возникало это ощущение? С тех пор как Дирак, с одной стороны, вывел релятивистское уравнение электрона, а с другой — разработал метод вторичного квантования электромагнитного поля, физики занимались всевозможными расчетами. В результате они обнаружили странный парадокс: самые простые приближительные расчеты давали результаты, отлично подтверждающиеся экспериментальными данными. Но едва они углублялись в расчеты, стремясь к большей точности, как в уравнениях появлялись бесконечные величины. Такова была ситуация начиная с 1930-х годов, и никто не понимал, почему так происходит и как решить данную проблему.

Дирак сделал расчеты для электромагнитного поля, а немного позже Паскуаль Йордан углубил его исследование: он убедился, что все, начиная с электронов и протонов до электромагнитной силы, которая их держит вместе внутри атомов, в конечном итоге происходило из квантовых полей.

Свет не является субстанцией с мгновенным распространением, у него есть скорость, и она не бесконечна.

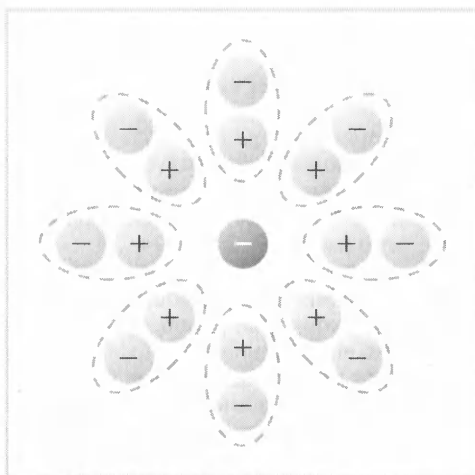
Ричард Фейнман. «Природа Физики» (1965)

В этом же году Гейзенберг, который изучал последствия матричной механики, представил свое соотношение неопределенностей в статье под названием «О наглядном содержании квантовой кинематики и механики» в журнале *Zeitschrift für Physik*. Что мы получаем, соединяя работу Дирака и Йордана

с работой Гейзенберга? Мы находим, что электромагнитное поле в действительности является источником виртуальных фотонов, которые возникают и исчезают, как мыльные пузыри, но которые невозможно наблюдать.

Виртуальные частицы предлагали физикам новые возможности для описания субатомных взаимодействий — но цена этого была достаточно высока. Ученые знали, что могли использовать эти инструменты, чтобы добавить корректировки в свои расчеты и получить более точные значения электродинамических величин анализируемой энергии электрона, рассчитанной в первый раз Гейзенбергом и Паули в 1929–1930 годах. Используя метод, известный под названием «теория возмущений», они всегда получали все более и более точный результат. Это же самое происходит, когда мы ищем какую-либо радиостанцию в приемнике: вначале амплитуда перемещения на шкале велика, но она постепенно уменьшается, когда мы находим передающую частоту. И самым большим сюрпризом было открытие, что в случае электродинамических расчетов чем более точное вычисление производилось, тем больше значение энергии электрона тяготело к бесконечности! В течение 1930-х годов аналогичные проблемы появились и с другими величинами, особенно в случае поляризации вакуума (см. рисунок).

Данный феномен показывает нам, что наблюдаемый заряд электрона не соответствует его «голому» незэкранированному заряду. Как объяснить это? Давайте вспомним, что электрон перемещается всегда в окружении облака виртуальных пар электрон-позитрон. Электрическое поле приводит к тому, что виртуальные позитроны притягиваются к электрону, тогда как виртуальные электроны отталкиваются от него. Исходя из этого будет невозможно измерить реальный заряд электрона, его



Поляризация вакуума: заряд электрона, который мы наблюдаем, соответствует «голому» заряду, экранированному облаком виртуальных пар электрон-позитрон.

РАСЧЕТ И ПЕРЕРАСЧЕТ

В принципе, два электрона, которые взаимодействуют, могут обмениваться либо одним единственным виртуальным фотоном, либо двумя, тремя, семью тысячами, 3459494... И чем больше фотонов, тем сложнее будет уравнение, описывающее взаимодействие этих электронов. Применяя теорию возмущений, физики классифицируют разные взаимодействия, чтобы сложить их в специальном порядке, группами, кратными заряду электрона в квадрате, e^2 . Таким образом, когда два электрона обмениваются фотоном, их вклад соответствует e^2 ; если обмениваются двумя фотонами, полученный результат пропорционален e^4 ; если в обмене участвуют три фотона, тогда результат соответствует e^6 . По теории, если просуммировать все возможные значения, то сумма будет стремиться к бесконечности. На практике физики прекращают подсчет после того, как просуммируют определенное количество значений.



Немецкий физик Ганс Эйлер в 1937 году.

Вклад Эйлера

Подход кажется простым, но он очень сложен для применения на практике. Вот один наглядный пример. Ганс Эйлер (1909–1941), немецкий ученый, работал с Гейзенбергом в университете Лейпцига. В течение лета 1934 года он занимался на первый взгляд не очень сложными расчетами дисперсии света под влиянием света (то есть взаимодействие света с самим собой), которые невозможно сделать, если игнорировать виртуальные частицы. Для выполнения своих расчетов он использовал теорию возмущений. Через 19 месяцев он смог рассчитать лишь значение e^4 . Иными словами, он смог включить в свои уравнения только одну единственную виртуальную пару электрон-позитрон. Эта огромная работа, проведенная Эйлером и за которую он получил докторскую степень, занимает 55 страниц в журнале *Annalen der Physik*.

«голый» заряд, так как он погружен в облако виртуальных позитронов. Эффективный заряд электрона будет соответствовать его неэкранируемому заряду, плюс корректировка КЭД:

$e_{\text{eff}} = e_0 + \delta e$. Как в случае с массой, мы ожидаем, что δe будет намного ниже, чем e_0 . Но в действительности все получается наоборот.

Как объяснить это явление? Вспомним принцип неопределенности Гейзенберга, который позволяет виртуальным частицам появляться с почти неограниченной энергией. В этом бурном море пар электронов-позитронов единственным правилом является их срок существования, зависящий от энергии, с которой они появляются: чем больше энергия, тем меньше они существуют. Как следствие, ничто не мешает этим парам виртуальных частиц возникать всегда с большими энергиями, чем они отдают, согласно принципу неопределенности. Кроме этих вопросов, вторая более конкретная проблема, характерная для расчетов КЭД, — ее долгий и скучный формализм. Простая операция могла занимать месяцы; изучение всех различных способов, которыми виртуальные частицы могли вести себя, вело к алгебраическому кошмару.

Бесконечные, практически нескончаемые расчеты... Великие физики середины 1930-х годов высказывали мнение, что все это признаки новой концептуальной революции, которая должна была начаться. После войны молодое поколение физиков, выросшее на технологических проблемах атомной бомбы и радара, было готово таким же способом решить вопросы квантовой электродинамики. Их подход был в высшей степени практичным: оставить в стороне философские вопросы о теории познания новой физики и в большей степени заняться реальной проблемой: найти способ избавиться от бесконечных вычислений.

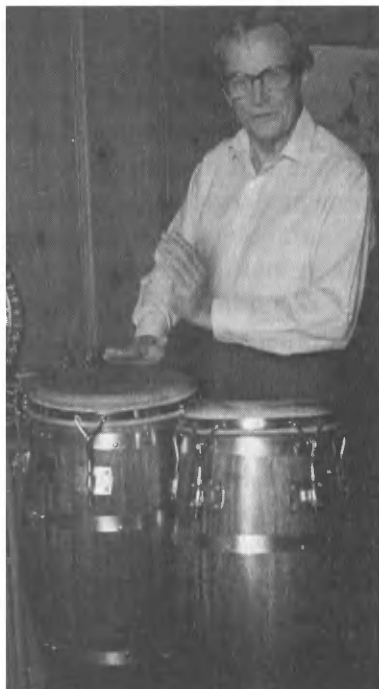
В одну апрельскую субботу 1947 года Уиллис Лэмб, ученый из Лаборатории радиации Колумбийского университета (редкая птица в физике, когда речь идет о теоретике, ставшем физиком-экспериментатором), и его студент Роберт Резерфорд сделали открытие, вскоре обозначившее будущее физики. Они подвергли атом водорода микроволновому облучению, чтобы измерить с большой точностью его уровни энергии. В ходе эксперимента они открыли различие между двумя из них, тогда

как теория Дирака предусматривала, что они должны были бы получить в точности такую же энергию. Дирак ошибся! После этого открытия у Лэмба крутились в голове только два слова: Нобелевская премия. Двамя месяцами позднее Оппенгеймер пригласил его принять участие в небольшой конференции в отеле Ram's Head, расположенном на острове Шелтер, недалеко от Лонг-Айленда. Никто и не подозревал, что эта встреча, подобно пятому Сольвеевскому конгрессу в 1927 году, вскоре изменит физику.

КОНФЕРЕНЦИЯ НА ОСТРОВЕ ШЕЛТЕР

Каково было удивление жителей Нью-Йорка, возвращавшихся с работы 1 июня 1947 года, когда они увидели эскорт мотоциклов полиции, под вой сирен сопровождавший автобус в направлении острова Шелтер! В этом автобусе ехало 24 физика, большая часть из которых участвовала в Манхэттенском проекте. Уже в отеле «они поспешили в кулуары, бормоча математические уравнения, и ужинали, возбужденно беседуя на научные темы», — писал на следующий день журналист *New York Herald Tribune*. Слухи распространились среди жителей острова со скоростью света: говорили, что эти ученые приехали сюда, чтобы разработать новый вид бомбы. Но на самом деле целью этой конференции, организованной Оппенгеймером и проходившей под патронажем Национальной академии наук, было обсудить будущее теоретической физики. Перед тем как явиться на конференцию, Исидор Айзек Раби сказал одному коллеге, что в области физики «последние 18 лет были самыми непродуктивными годами этого века». Другой отец КЭД, австриец Виктор Вайскопф, объявил, что «теоретическая физика находится в тупике». Общее впечатление было таковым, что в течение 20 лет все словно бились головой о стену.

Данная конференция должна была позволить обсудить неофициальным образом проблемы КЭД. Ранним утром



ВВЕРХУ СЛЕВА:
Фейнман
и ударные
инструменты.

ВВЕРХУ СПРАВА:
Австрийский
физик Виктор
Вайскопф,
участник
проекта
«Манхэттен».

ВНИЗУ:
Нобелевская
премия
1965 года.
Справа налево:
Роберт Вудворд
(химия),
Джулиан
Швингер
и Ричард
Фейнман
(физика),
Франсуа Жакоб,
Андре Львов
и Жак Моно
(физиология
и медицина)
и Михаил
Шолохов
(литература).



2 июня, когда Лэмб представил свои результаты, все поняли, что сообщенная им информация — ключ к решению проблемы. Остальное было обсуждено позднее под руководством Оппенгеймера и Вайскопфа. Именно тогда Раби поднялся и изложил результаты своих опытов. При помощи двух своих студентов, Джона Нафе и Эдварда Нельсона, он обнаружил, что, располагая атом в магнитном поле, можно было получить результаты, хоть и не значительно, но отличающиеся от теоретических предсказаний уравнения Дирака для величины, известной как *g-фактор*. Релятивистская теория Дирака предусматривала значение, равное 2; опыт Раби дал результат 2,00244. Различие было очень незначительным, порядка 0,1 %, и любой экспериментальный физик мог бы считать, что результат отлично совпадает с теоретически предсказанным. Однако в глазах участников конференции острова Шелтер эта малозначительная разница стала огромным стимулом.

Я присутствовал на многих конференциях, но никогда не чувствовал себя таким значимым, как в этот раз.

Впечатление Фейнмана от конференции на острове Шелтер

Дискуссии продолжились до глубокой ночи, в том числе и за ужином. Ученые разбились на небольшие группы и продолжали спорить в коридоре, в холле... Везде присутствовали эмоции, кипели страсти. На следующий день ученик Бора, Хендрик Крамерс, представил свое видение способа работы с электроном, помещенным в электромагнитное поле. Предположим, что анализируемая энергия электрона представлена как дополнительный взнос в массу электрона. Другими словами, его наблюдаемая масса соответствует «голой» массе, большей «электромагнитной массы», производимой взаимодействием со своим собственным полем. «Голая масса» — чисто теоретическая величина, которая существует в отсутствие электромагнитного поля. В любом случае то, что мы измеряем в реальности, соответствует другой массе, «одетой массе». Поэтому необходимо переписать уравнения исходя из наблюдаемой массы: теория

должна «прийти в порядок». Вайскопф и Швингер высказали мысль, что явление, обнаруженное Лэмбом, объяснялось взаимодействиями между электронами и вездесущими виртуальными частицами и что предложение Крамерса могло, таким образом, стать окончательным решением.

Ранним утром третьего и последнего дня собрания Оппенгеймер попросил Фейнмана рассказать о своей работе в неофициальной обстановке. Последний изложил свои идеи о применении принципа наименьшего действия в нерелятивистской квантовой механике и свой подход к сумме всех траекторий. Тем не менее, хотя и предлагая творческую интерпретацию квантовой механики, Фейнман не давал никаких проверяемых результатов и не мог использовать уравнение Дирака в своей формуле: казалось, что он лишь играет с несколькими идеями. Один из его ассистентов на конференции, Абрахам Пайс, вспоминал в дальнейшем, что «никто не понимал, о чем он говорил». Конференция завершилась с чувством того, что КЭД по-настоящему потерпела крах. Так Швингер вспоминал позднее: «Факты были невероятными; они говорили о том, что священная теория Дирака полностью рухнула».

После собрания Бете сел в поезд до Скенектади, где он работал в качестве консультанта на полставки для «Дженерал Электрик». Сидя в вагоне, он начал размышлять о предположении Крамерса. Если мы основываемся на его идее, то что мы получаем для электрона, находящегося в атоме водорода? Один, как и второй, включали в себя величину, отличную от анализируемой энергии, и это приводило к вычитанию бесконечного из бесконечного. Результат явно был абсурдным... или, может быть, нет. Вычислительная машина, которой являлся Бете, принялась за работу, основываясь на нерелятивистской КЭД. Каково же было его удивление, когда он увидел, что хотя полученный результат по-прежнему продолжает стремиться к бесконечности, он делает это уже медленнее! Интуиция Бете говорила ему, что если осуществить то же самое в релятивистской КЭД, тогда это расхождение полностью исчезнет. Бете позволил Фейнману, чтобы рассказать ему о своем открытии и чтобы

убедиться, что черновик его расчетов окажется у Оппенгеймера меньше чем через неделю. Вернувшись в Корнелл в июле, он провел семинар, объясняющий его расчеты, и предложил возможные способы применения релятивистского предела. После конференции Фейнман подошел к нему и сказал: «Я могу это сделать для тебя. Расчеты будут у тебя на столе завтра утром».

ПЕРЕНОРМИРОВКА

В то время Фейнман столкнулся с серьезной проблемой: следовало письменно изложить свои идеи в виде научной статьи, особенно те из них, которые он развернул в своей докторской диссертации. Это было нелегко для него. Он очень хорошо умел выражать свои мысли в виде личных заметок, составленных в его особом фамильярном тоне и используемых им впоследствии для будущих исследований. Но редактирование научной статьи требовало более формального подхода, логической и последовательной манеры объяснять результаты, шаг за шагом. Все это являлось полной противоположностью рабочему стилю Фейнмана. Он не придерживался никакой логической последовательности. Очень часто Фейнман предугадывал ответы, а затем применял их ко многим примерам, чтобы проверить их истинность. Физик Марри Гелл-Ман (он сотрудничал с Фейнманом в 1950-е годы, когда они оба работали в Калтехе) рассказывал анекдот, который давал представление о стиле работы его коллеги. Однажды один студент пришел к нему с серией заметок, которые он приписывал Ричарду Фейнману. Гелл-Ман посмотрел на них и сказал: «Нет, это не его. Его методы не такие, как наши». «И каковы же они?» — спросил студент. Гелл-Ман подошел к доске, находившейся в его кабинете, и объяснил ему: «Дик работает следующим образом. Ты записываешь задачу. Ты интенсивно раздумываешь над ней, — сказал он, закрывая глаза и комично подпирая рукой свой лоб. — Затем ты пишешь решение».

С такими методами работы Фейнман не мог просто сесть и написать статью. Поэтому его друзья Берт и Малика Корбен сочли своим долгом вмешаться. По их словам, летом 1947 года они «заперли Дика в комнате и приказали ему начинать писать». Он послушался, и статья, которая из этого получилась, «Пространственно-временной подход к нерелятивистской квантовой механике», была опубликована в следующем году в журнале *Reviews of Modern Physics*. Пересмотр своей диссертации позволил Фейнману в первый раз открыть для себя квантовую механику в полном объеме, используя новый метод «интегралов по траекториям». Теперь он мог снова попытаться справиться с тем, что до сегодняшнего дня ему не удавалось: с релятивистской квантовой теорией электромагнетизма.

После конференции Бете Фейнман чувствовал себя достаточно уверенно, но, так как он никогда не работал над этой темой, он направился к коллеге, чтобы уточнить, как следует проводить расчеты. В свою очередь, Дик рассказал Бете про свое новое уравнение. Они попытались сделать расчеты с учетом теории относительности, но допустили ошибку: бесконечные величины были хуже, чем те, что появились в нерелятивистском уравнении, полученном Бете. Фейнман вернулся в свой кабинет, убежденный, что они где-то ошиблись и что результат должен быть положительным, и принялся за работу.

Верный самому себе, он начал с рассмотрения теории дыр и моря отрицательной энергии Дирака, пока не убедился в том, что может применить свой интеграл по траекториям. В итоге Фейнман смог получить конечные значения, используя предположение Крамерса, и нашел значение для смещения Лэмба, очень близкое к значению эксперимента. К сожалению, Фейнман был не единственный, кто к этому пришел. Его конкуренты получили такой же результат: Вайскопф и его студент Энтони Френч, с одной стороны, и баловень Гарварда, Джулиан Швингер, с другой. Швингер сумел исключить бесконечные величины благодаря серии изящных математических преобразований, известных под названием «канонические преобразования». Он перенормировал массу электрона согласно

предположению Крамерса и сделал то же самое с его зарядом. Недостаток решения Швингера был в том, что сумма серии величин, полученных методом возмущений (идентичным тому, что использовался в КЭД), требовала крайне сложных расчетов. К счастью, Швингер обнаружил, что первых трех величин было достаточно для получения результатов, отлично совпадающих с экспериментальными данными, озвученными на острове Шелтер. Полученное им значение для g-фактора составило 2,00118 (вспомним, что Раби получил 2,00244), для смещения Лэмба оно было 1,051 мегагерц, тогда как экспериментальные данные были 1,062.

Будущее непредсказуемо, все основывается на вероятностях.

Ричард Фейнман

Национальная академия наук провела под своим патронажем вторую конференцию в горах Поконо (Пенсильвания) 30 марта 1948 года. Как и отель Ram's Head, отель Росопо Manor посетили великие умы физики: Оппенгеймер, Ферми, Бете, Раби, Теллер, Уиллер и фон Нейман, а также два светила довоенной физики, Бор и Дирак. Все ждали, что Швингер даст окончательное решение проблемы релятивистской КЭД. Это случилось утром следующего дня.

Швингер начал свое выступление без малейшей интонации в голосе: «Квантованное электромагнитное поле, в котором мы можем рассматривать каждый малейший объем пространства в качестве частицы». Он представил обозначения и окунулся в виртуозную лекцию, включающую математические исчисления, которых было много, чтобы успевать понимать их. Однако аудитория здесь была несколько другая, нежели та, к которой он привык, поэтому речь Швингера, похожая на поезд, неумолимодвигающийся по рельсам, постоянно прерывалась репликами его слушателей. Не побоялся остановить этот поезд и сам Бор, высказавший свои замечания. Швингер, который терпеть не мог, когда его перебивают, оборвал его сухим тоном. Одно уравнение сменялось другим, и Швингер продол-

жал лекцию, не обращая ни малейшего внимания на окружающих. Этот математический марафон длился довольно долго. Бете заметил, что единственные замечания были, когда Швингер объяснял физические основы. Когда же речь зашла про математику, все молчали. Ферми с оттенком гордости понял, что только он с Бете оказались способными следить за математическими рассуждениями выступавшего. Рассказывают, что в конце этого монолога Оппенгеймер, наставник Швингера, встал и произнес: «Тот, кто читает лекцию, стремится объяснить, как действовать дальше. Но цель Джулиана — доказать нам, что он единственный, кто может это сделать».

Потом настала очередь Фейнмана. Бете предупредил его: после презентации Швингера лучшее, что можно было сделать, — это четко придерживаться математического изложения темы и оставить физику в стороне, «так как каждый раз, когда Швингер пытался говорить о физике, возникала проблема». Фейнман выслушал его рекомендации, но последовать им не мог, так как не обосновал математический метод, который употребил. Свои уравнения он получил способом «а ля Фейнман», то есть после многих попыток и ошибок, с применением хорошей доли интуиции. Он знал, что эти уравнения были верны, так как проверил их множеством способов, в том числе всеми уравнениями Швингера. Однако Фейнман не мог точно доказать, что они работали, и, кроме того, он не мог их связать со старой квантовой теорией.

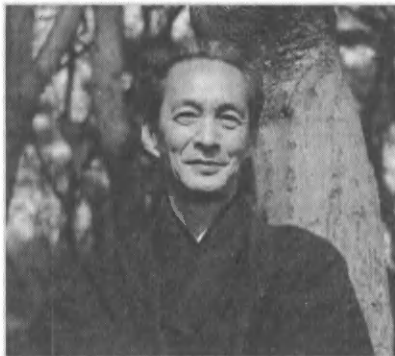
Вот математическая формула, с помощью которой
я сейчас продемонстрирую, как получены все результаты
квантовой механики.

ЗАЯВЛЕНИЕ ФЕЙНМАНА НА КОНФЕРЕНЦИИ ФИЗИКОВ В ОТЕЛЕ «ПОКОНО МАНОР», ПЕНСИЛЬВАНИЯ,
30 МАРТА 1948 ГОДА

Разница между Швингером и Фейнманом наглядно проявлялась в их подходах к изучению физики. Швингер был логичным и условным, верным долговому и скучному пути, тогда

ТЕОРИЯ ТОМОНАГИ

До войны японский физик Синъитиро Томонага (1906–1979) учится с Гейзенбергом (1937) и следит за развитием КЭД в работах Дирака и Паули. По своему возвращению в Токио, двумя годами позже, он разрабатывает теорию, которую называет «супер-мультитименной». В ее рамках он присваивает каждой точке поля свои собственные часы, что гарантирует высокую гибкость, хотя и может показаться абсурдным заниматься обработкой бесконечного числа временных данных. Благодаря этому он все-



Синъитиро Томонага.

таки сможет достаточно легко ввести теорию относительности в свои уравнения. В нерелятивистской квантовой теории существует серьезный недостаток из-за того, что все точки электромагнитного поля привязаны к одним часам, это порождает абсолютное время и вступает в противоречие с логикой и релятивистскими законами. Томонага проводит свои исследования в полном одиночестве, и его дневники отражают его печаль: «Недавно, я почувствовал себя грустным, не зная почему, и тогда я пошел в кино». В 1947 году он решит проблему бесконечных величин с помощью метода, который он назовет «перестройка», не подозревая о том, что он соответствует предложению Крамерса. Ему посоветуют отправить свою работу физику, способному ее оценить, — Оппенгеймеру.

как Фейнман следовал за своим вдохновением и не боялся нестандартных методов.

Швингер слушал теорию Фейнмана в первый раз и отвергал ее, хотя ничего и не говорил. В его глазах она выглядела как фантазия, лоскутное одеяло уравнений, лишенных смысла, плод интуиции, а не точной математической логики. Замечания аудитории сыпались одно за другим. Понемногу Фейнман начинал понимать, что у каждого из присутствующих есть свой взгляд на проблему и что его идеи задевали всех без исключения.

— Откуда взялась эта формула? — спросили у него.
Он не мог ее доказать и просто ответил:
— Это хорошая формула.
— И как вы это узнали? — последовал вопрос.
— Потому что был получен правильный результат.
— А как вы это узнали?
— Я пытаюсь показать это на следующих примерах, — сказал Фейнман.

Это было невозможно. Когда Дирак встал и спросил: «Эта формула едина?», Фейнман не понял, что тот имел в виду. А когда он продолжил, объясняя свой способ сложения амплитуд для каждого пути, и нарисовал схематические траектории частиц, великий Нильс Бор встал и заявил: «Вы проигнорировали двадцатилетний фундаментальный принцип квантовой теории? Эти траектории противоречат принципу неопределенности». Он подошел к доске, сделал знак Фейнману отойти и пустился в объяснение. В этот момент Фейнман осознал, что его презентация стала катастрофой и что никто, даже Бор, не понял, о чем он говорил. Наоборот, Швингера единодушно приветствовали как нового вундеркинда. Когда собрание было окончено, два молодых физика сравнили свои результаты. Никто из них не понимал уравнения другого, но результаты были идентичными. «Именно так я узнал, что не был сумасшедшим», — заявил Фейнман впоследствии.

По иронии судьбы после возвращения в свой кабинет в Институте перспективных исследований Принстона Оппенгеймер нашел на своем столе письмо, присланное профессором физики Университета Токио, Синъитиро Томонагой: «Я осмелился прислать вам копии нескольких статей и записей...» Оппенгеймер тут же отправил телеграмму Томонаге, предлагая ему прислать резюме своей работы, тогда как сам стал договариваться о ее публикации в журнале *Physical Review*. Статья появилась 15 июля. Тем временем Уилер создал группу молодых физиков для работы над записями, сделанными во время конференции. Они, с трудом пытавшиеся вникнуть в идеи Швингера, по достоинству оценили простоту и оригинальность мысли Томонаги. Теперь эти молодые физики не только понимали

работу гения Гарварда, но и ясно видели, что Швингер чрезмерно ее усложнил.

Оппенгеймер сразу же понял, что Томонага идет по пути, найденному Швингером, хотя и не полностью: у него отсутствовал математический аппарат, разработанный американским ученым. Он незамедлительно написал участникам Поконо: «Именно потому что мы прослушали детальный отчет Швингера, мы можем оценить этот независимый подход».

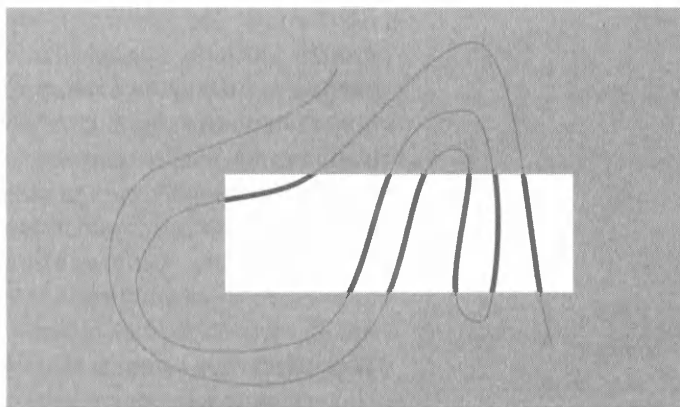
НАЗАД В БУДУЩЕЕ

Крах и непонимание коллег во время конференции в Поконо не заставили Фейнмана отступить. Благодаря своей работе над смещением Лэмба он понял, как приручить эти бесконечные величины, которые возникали в расчетах со всех сторон, и, оставаясь верным своей манере работать, он применил свой метод ко многим другим аспектам, и успешно. Однако ему оставалось сделать еще очень многое до завершения этого нового, весьма оригинального подхода.

Основываясь на своей теории, Ричард Фейнман предложил альтернативное объяснение электронам с отрицательной энергией. Давайте вспомним, что они невидимы для наших детекторов до тех пор, пока фотон гамма-излучения, обладающий очень высокой энергией, не попадет в один из них. В этот момент образуется пара электрон-дырка, и эта дырка ведет себя как положительно заряженный электрон (позитрон), античастица электрона. Этот процесс называется созданием пары. И наоборот, когда электрон, взаимодействуя с протоном, падает в эту дырку и заполняет ее, он испускает два (или три) фотона, что предстает перед нами как аннигиляция электрона с позитроном. Такая идея не очень нравилась физикам, но никакой другой не было, так что эта оставалась единственной игрой в казино КЭД в течение 20 лет.

На создание нового метода Фейнмана вдохновил, как он сам признался в своей нобелевской речи, звонок его научного

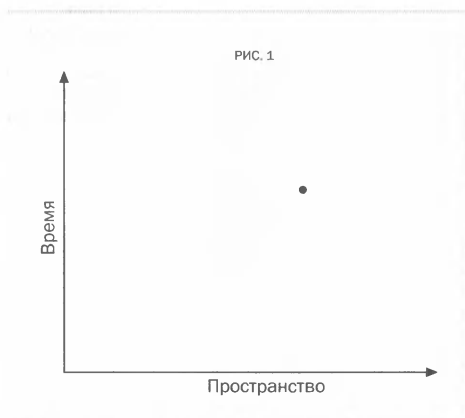
В поле
ограниченного
обзора стрелка
дорог несколько,
хотя на самом
деле она одна.



руководителя Джона Уилера, раздавшийся осенью 1940 года: «Фейнман, я знаю, почему все электроны одинаково заряжены и имеют одинаковую массу». «Почему?» — спросил Фейнман. «Потому все они — это один и тот же электрон!» — ответил Уилер.

Согласно почти абсурдной идее Уилера, единственный электрон, петляя в пространстве и времени, мог наблюдаться в конкретный момент как множество электронов в разных местах. Этот феномен можно объяснить с помощью военной аналогии: оптический прицел. Когда стрелок смотрит в прицел, он видит лишь небольшую часть всего пространства, которое находится перед ним. Представим, что в определенный момент он осматривает неровную зону, а по ней проходит извилистая дорога, которую мы фотографируем в прицеле стрелка (см. рисунок). При рассматривании фотографии у нас складывается впечатление, что мы видим разные дороги, тогда как на самом деле она одна.

Тогда возникает вопрос: как выглядит электрон, перемещающийся в прошлое? Все просто: как позитрон, передвигающийся в будущее. Таким образом, позитроны — это не что иное, как электроны, которые перемещаются в прошлое. Данная идея содержала серьезный недостаток, который Фейнман быстро



обнаружил: согласно этому предположению, Вселенная в определенный момент времени должна содержать столько же электронов, сколько и позитронов. Но это противоречило наблюдениям. Наш мир состоит из материи, и антиматерия появляется только при взаимодействии космического излучения с атмосферой Земли (так позитрон и был обнаружен в первый раз), а также в созданных относительно недавно ускорителях частиц. Где находятся все эти

дополнительные позитроны? Уилер ответил, что, возможно, они спрятаны в протонах. Идея о существовании единственного электрона во Вселенной не убедила Фейнмана, но, тем не менее, он сохранил в памяти: позитрон является электроном, который перемещается в прошлое. «Это именно то, к чему я стремился!» — заявил он позже. В 1949 году Фейнман официально представил свою интерпретацию антиматерии.

МИР ГЛАЗАМИ ФЕЙНМАНА

Томонага и Швингер создали первый реально действующий метод перенормировки. В первый раз теоретики смогли просчитать действие виртуальных частиц надежным способом и сравнить свои результаты с экспериментальными данными. Но расчеты, которые вызвали такую радость физиков, были сложными в реализации. До того как Швингер и Томонага сделали свой вклад, Бете сказал: «Расчеты в релятивистском случае нелегки... Нужно интегрировать около двадцати различных величин». На следующий день после конференции в Поконо ситуация почти не изменилась. Некоторые даже считали, что новые расчеты в КЭД сложнее, чем предыдущие.

Тем не менее Фейнман не отказался от своей идеи. Он принялся создавать простые схемы, которые должны были помочь ему в продвижении его уравнений. Эти схемы, которые скоро были названы «диаграммами Фейнмана», дали миру науки то, чего методы Швингера и Томонаги были не способны дать: простоту и скорость расчета. Диаграммы Фейнмана перевернули представления о методах изучения физики.

В первый раз Фейнман представил свои диаграммы в Поконо, но они остались непонятыми. Ничего удивительного в этом нет: он шел в направлении, весьма отличном от всего, что практиковалось в то время. Чтобы лучше понять, рассмотрим белый лист бумаги, на котором мы чертим две перпендикулярные оси. Время мы отмечаем на вертикальной оси, а положение частиц в пространстве — на горизонтальной. Таким образом, мы получаем «проекцию» трехмерного мира квантовых взаимодействий в одном измерении. Это было именно то, чего добивался Фейнман в своих исследованиях: визуализация. В данном случае — визуализация фотонов и электронов в пространстве и времени, которые появляются в виде стрелок на диаграммах. Поэтому Бор отверг эту презентацию, хотя

РИС. 2

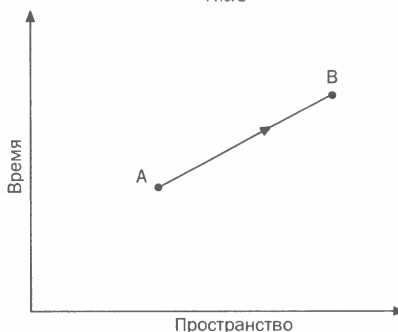


РИС. 3

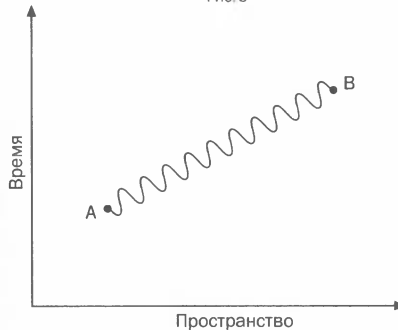
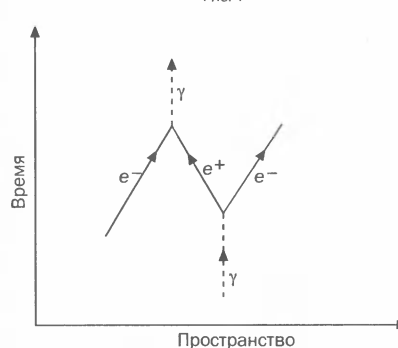
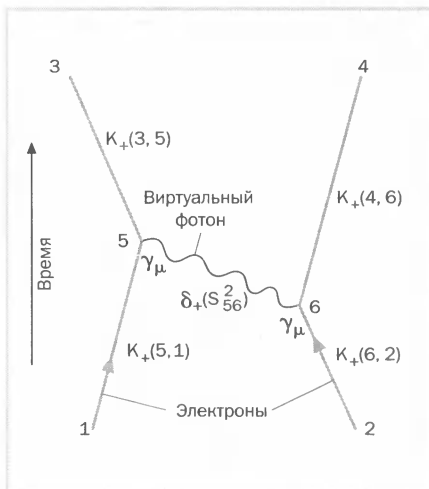


РИС. 4



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ЭЛЕКТРОНОВ

Что происходит, когда два электрона взаимодействуют и обмениваются виртуальным фотоном? На этот вопрос отвечает приведенная диаграмма, которую создал Фейнман. В данном случае фотон испущен в точке (6) и поглощен в точке (5) (точки, в которых встречаются электрон и фотон, называются *вершины*). Но эта же диаграмма позволяет изучить другую ситуацию: фотон поглощен в точке (6) и выпущен в точке (5). Если прошлое находится внизу диаграммы, а будущее — вверху, тогда диаграмма означает, что он поглощен до того, как был выпущен, а значит, виртуальный фотон перемещается назад во времени. Но вернемся к способу, которым два электрона отталкиваются. Электрон слева имеет некоторую вероятность переместиться из x_1 в x_5 , и Фейнман это записывает в виде $K_+(5,1)$. Другой электрон может переместиться из x_2 в x_6 , это записано как $K_+(6,2)$. Этот второй электрон может испустить виртуальный фотон в x_6 . Вероятно, фотон может переместиться из x_6 в x_5 , что Фейнман формулирует в виде $\delta_+(s_{56}^2)$. Прибывая в x_5 , фотон может быть поглощен электроном. Вероятность, что электрон сможет излучить или поглотить виртуальный фотон, также имеет математическое выражение, сформулированное еще в довоенных исследованиях, и может быть записана в виде e_μ , где e — это заряд электрона, a_μ — это величина, сформулированная в теории Дирака. Электрон справа, передавая часть своей энергии и своего импульса (произведение его массы на скорость), изменит свое движение из x_6 в x_4 (как в случае, когда охотник ощущает эффект отдачи при стрельбе из своего ружья). Электрон слева, поглотив фотон и получив его энергию и импульс, начинает двигаться из x_5 в x_3 . В руках Фейнмана эта диаграмма приобретает вид следующего уравнения:



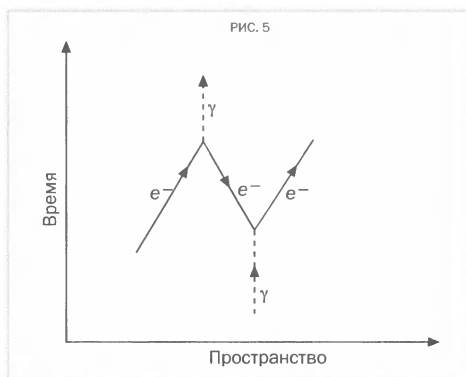
$$e^2 \int d^4 x_5 d^4 x_6 K_+(3,5) K_+(4,6) \gamma_\mu \delta_+(s_{56}^2) \gamma_\mu K_+(5,1) K_+(6,2).$$

позднее он вынужден был извиниться перед Фейнманом за то, что не понял ее в Поконо.

Таким образом, какое-либо событие, как, например, сидение на скамейке в муниципальном саду в 14.00, может быть представлено точно, так как оно происходит в определенном месте и в определенное время (рисунок 1). Теперь представим, что эта точка является электроном. Перемещению электрона из пункта А в пункт В в течение какого-то времени соответствует рисунок 2. Линия, соединяющая точку А, откуда приходит электрон, с точкой В, куда он направляется, называется *функцией распространения*. Такая же диаграмма применима и в случае с фотонами (рисунок 3).

Функция распространения не является простой линией. Она представляет собой правила, необходимые для расчета вероятности того, что одна частица выходит из точки А и в дальнейшем находится в точке В. Фейнман считал, что частица перемещается из одной точки в другую не по какой-то конкретной траектории, но многими путями, и все они определяют вероятность перемещения частицы из А в В, выраженную соответствующим уравнением.

Благодаря этим деталям мы приближаемся к пониманию того, как Фейнман объяснил антиматерию. Согласно его мнению, позитрон является электроном, который передвигается назад во времени. В таком случае, как объяснить рисунок 4? По традиционному представлению КЭД, фотон, обладающий большой энергией, вызывает появление пары электрон-позитрон. Позитрон движется в пространстве и времени до встречи с другим электроном. Тогда они одновременно исчезают, испуская гамма-фотон. Этот процесс известен под названием *рождение и аннигиляция пары*. Однако Фейнман дал ему другую интерпретацию (рисунок 5).



Электрон, движущийся вперед во времени, излучает фотон и, так же как и при взаимодействии электронов, получает отдачу, которая заставляет его двигаться назад во времени. Затем он подвергается новому взаимодействию с фотоном, меняет траекторию и снова начинает свое продвижение вперед во времени. Речь идет не о двух электронах и одном позитроне, а о единственном и одном и том же электроне, который движется во времени вперед-назад.

Как и микросхемы, диаграммы Фейнмана облегчили расчеты.

Швингер по поводу диаграмм, использованных Фейнманом в своих исследованиях

Фейнман изложил детали своей теории в двух статьях весной 1949 года: в первой, «Теория позитронов», он объяснил свою интерпретацию антиматерии, а во второй, «Пространственно-временной подход к квантовой электродинамике», применил свои диаграммы для исследования взаимодействия двух электронов. Таким образом, ученый представил основу той работы, которую он с большим успехом сделает в течение следующих двух лет.

ОТ НЕПОНИМАНИЯ ДО УСПЕХА

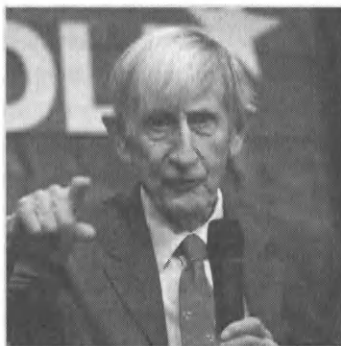
Проблема была в том, что даже физики из самого близкого окружения Фейнмана не очень понимали, каким образом использовать этот новый метод. Диаграммы Фейнмана не были интуитивно понятными для физиков конца 1940-х — начала 1950-х годов. Исправить эту ситуацию было суждено Фримену Дайсону, молодому физiku английского происхождения. Как-то, после встречи с Ричардом Фейнманом, Дайсон написал своим родителям: «Он наполовину гений, наполовину шут». Об этом заявлении он впоследствии будет жалеть.

ФРИМЕН ДАЙСОН

Английский физик и математик Фримен Дайсон (р. 1923) считается одним из математических гениев Англии. Лучше всего его можно охарактеризовать словом «ниспровергающий» — это одно из любимых понятий Фримена, по мнению друга ученого, Оливера Сакса:

«Ниспровержение» — любимый термин Фримена для разговоров о науке и творчестве. Он считает, что важнее ниспровергать, то есть делать то, чем он занимался всю свою жизнь, чем придерживаться традиционных взглядов».

Фримен поступает в Кэмбридж, собираясь заниматься математикой, однако быстро отказывается от своего намерения. Однажды ассистент Дирака скажет ему: «Я бросаю физику ради математики, так как считаю ее неточной, туманной и двусмысленной наукой». На что Дайсон ответит: «А я бросаю математику ради физики по этим же причинам». После Второй мировой войны наиболее благоприятной страной для занятий физикой становятся Соединенные Штаты Америки. Дайсон хочет там поселиться, но возникает вопрос: куда ехать? Ему советуют работать с Бете, и он, недолго колеблясь, принимает решение ехать в Корнелл. И вот уже Фримен Дайсон открывает для себя свою новую родину: он играет первую партию в покер, на практике постигает смысл американского слова «пикник» и предпринимает свое первое путешествие на машине в «дикий край» (в реальности спокойный путь из Итаки в Рочестер, штат Нью-Йорк) в компании Ричарда Фейнмана, «редкого вида американского ученого-аборигена», как он его характеризует в письме своим родителям.



Первой задачей Дайсона было рассчитать значение лэмбовского сдвига для электрона без спина (нерелятивистский случай), для которого Бете недавно провел предварительные расчеты в поезде, возвращаясь с острова Шелтер. Вначале Дайсон не относился к идеям Фейнмана всерьез. Однако в один прекрасный день Вайскопф, бывший в Корнелле с визитом,

заговорил о невероятном прогрессе, достигнутом Швингером в Гарварде, и Дайсона осенило: существовала связь между работами этих двух гениев физики. Он начал понимать, что под импульсивными действиями Фейнмана прослеживается определенный метод. Он писал своим родителям: «Бете научит меня многому, но я думаю, что если дольше буду оставаться здесь, то выяснится, что моя дальнейшая работа связана именно с Фейнманом». Тем не менее его предсказание не сбылось: осенью 1948 года, с благословения Бете, Дайсон уехал в Институт перспективных исследований Принстона, где ему суждено было проработать вплоть до 1994 года.

А тем временем приближалось лето 1948 года, и Фейнман намеревался совершить свою обычную выходку: исчезнуть из университета, оставив за собой кучу непроверенных экзаменационных работ, непрочитанных статей и ненаписанных рекомендательных писем. В этом году он должен был разобраться со своими отношениями, находившимися несколько месяцев в подвешенном состоянии: в Лос-Аламосе осталась одна секретарша, с которой он начал встречаться после смерти Арлин. Более того, эта связь вызвала ревность и агрессию со стороны другой женщины и более спокойную реакцию со стороны третьей, просто написавшей Фейнману, что бросает его.

Дайсон планировал посетить серию семинаров, проводимых Швингером в Энн-Арбор с 19 июля по 7 августа. Таким образом, он отправился пересекать Соединенные Штаты Америки с Фейнманом в его подержанном Олдсмобиле, упрасывая Ричарда немного притормозить и ехать со скоростью ниже, чем 105 км/час. Путешествие дало возможность Дайсону лучше понять идеи своего попутчика, так как он немного услышал от Фейнмана в Корнелле; ему показалось, что тот лишь намечает решения уравнений, вместо того чтобы решать их полноценно. Шоссе 66, «главная улица Америки», способствует признаниям, и мало-помалу Дайсон открыл настоящую страсть Фейнмана: это была не перенормировка, а полное переосмысление квантовой механики, окончательный итог всех поисков. Именно тогда Дайсон осознал всю глубину и важность работы своего компаньона. По прибытии в Альбукерке Фейнман

отправился по своим делам, на поиски Розы Макшерри, собираясь выяснить с ней отношения и положить конец их связи. Что касается Дайсона, то его путь лежал на автовокзал, где первый же автобус отвез его на встречу со Швингером, находящимся в Энн-Арбор.

Когда семинар закончился, Дайсону пришлось возвращаться в Корнелл на автобусе с несколькими пересадками. Он воспользовался этим долгим переездом, чтобы поразмышлять над работами Томонаги и Швингера, а также Фейнмана. Дайсон удивлялся, что группе японских физиков, работающей в основном изолированно, удалось достичь таких прекрасных результатов: «Томонага объяснил свои идеи простыми и четкими словами — так, что все смогли его понять, в отличие от Швингера». Кроме того, он понял, что мог переписать уравнения Швингера, включив в них математические объекты, которые Фейнман назвал «операторами порядка временных рядов». Во время остановки в Чикаго Дайсону удалось вывести всю теорию Фейнмана исходя из теории Швингера. Вернувшись домой, Дайсон принялся за дело и в течение последних дней лета 1948 года трудился с таким уровнем концентрации, что, по его собственным словам, у него не было никакой жизни, кроме работы. В итоге физику удалось найти математическую основу для подходов Фейнмана и Швингера. В октябре, до того как Фейнман закончил свою большую статью о КЭД, Дайсон отправил в журнал *Physical Review* статью под названием «Теории излучения Томонаги, Швингера и Фейнмана». Он начал делать наброски уравнения Томонаги — Швингера, которое, прежде всего, соответствовало бы уравнению Шрёдингера с учетом времени. Дайсон также отмечал, что основной принцип теории Фейнмана — «сохранить симметрию между прошлым и будущим». Благодаря этому ему удалось доказать возможность избежать самых неприятных элементов в расчетах Швингера, что делало эти серии возмущений более простыми в употреблении. Кроме этого, речь шла о том, чтобы сконцентрироваться на матрице S , математическом объекте, содержащем совокупность вероятностей, связанных со всеми различными траекториями между начальным и конечным

состоянием. Дайсон доказал, что каждое из этих значений могло быть представлено с помощью диаграмм Фейнмана. Более того, он утверждал, что эти диаграммы должны рассматриваться не только как помощь в расчетах, но и «как графическое изображение физических процессов при составлении матрицы».

Результатом стало решение более надежное, чем у Фейнмана, и более понятное и полезное, чем у Швингера. Дайсон представил сообществу физиков-теоретиков математическое обоснование того, почему следовало предпочесть теорию Фейнмана скучной математической виртуозности вундеркинда Гарварда. К тому же он доказал, что КЭД была перенормирована тогда, когда бесконечные величины оказались под контролем благодаря методам, созданным Фейнманом. Любопытно то, что статья Дайсона включала лишь одну диаграмму пространство-время. Поскольку статьи Фейнмана еще не вышли в свет, может показаться парадоксальным, что первая из этих знаменитых диаграмм была опубликована в научном журнале... Дайсоном.

Мир родился в условиях, более упорядоченных в прошлом, чем в настоящем.

Ричард Фейнман

В действительности у Фейнмана и Дайсона не было одинакового понимания того, что означали эти диаграммы. Первый, возможно под влиянием уравнения интеграла по траекториям и благодаря изучению взаимодействий между частицами без вмешательства квантовых полей, представлял себе диаграммы в качестве реальных изображений физических процессов, в которых электроны могли перемещаться с одной стороны в другую и вперед-назад во времени. Работа Дайсона все это изменила. Он показал, как диаграммы могут быть выведены из совокупности основных уравнений квантовой теории поля.

Согласно Дайсону, каждая часть каждой диаграммы представляла величину в серии уравнений. Они были порождены разумом, обладающим необыкновенной интуицией, но они могли быть подтверждены посредством серии сложных преобразований уравнений квантовой механики и теории относительности.

Самое удивительное во всем этом, что Фейнман не отдавал себе отчет о том, какую драгоценность он держал в своих руках, до января 1949 года, когда была проведена конференция Американского физического общества. Там физик по имени Мюррей Слотник сделал сообщение о своей работе и был просто уничтожен Оппенгеймером, который встал и сообщил мелодраматическим тоном ассамблее, что расчеты должны быть ошибочными, так как они «противоречат теореме Кейза». На это Слотник не мог ничего ответить... и никто другой в зале тоже, так как Оппенгеймер ссылаясь на работу Кеннета Кейза, даже не публиковавшего свою теорему. Оппенгеймер заявил, что Кейз выступит на следующий день.

Фейнман вернулся в отель и углубился в расчеты, чтобы проверить, точно ли Слотник ошибся. На следующее утро он отправился на его поиски, чтобы сказать ему, что он был прав, а Оппенгеймер заблуждался... Слотник не мог поверить: он посвятил данной проблеме два года, из которых шесть месяцев заняли сложные расчеты, а Фейнман сделал это лишь за полдня! Мощь его метода была очевидной! Позже Дайсон писал в своих мемуарах: «Расчеты, которые я провел для Ханса Бете (по поводу лэмбсовского сдвига), используя ортодоксальную теорию, потребовали несколько месяцев и сотни страниц. Дик пришел к тому же заключению на одной доске за полчаса».

Слотник и Фейнман заняли места среди присутствующих, чтобы прослушать выступление Кейза. Когда он закончил, Фейнман поднялся и заявил, что подтверждает результат Слотника. Теорема Кейза больше никогда и никем не была использована.

Тогда Фейнман осознал, что создал что-то очень мощное. Сильный в своей вере, свойственной тому, кто прав, он вместе с Дайсоном присутствовал на третьем и последнем за-

седании конференции, которая прошла в местечке Олдстоуна-Гудзоне, в 65 км на север от Нью-Йорка. С 11 по 14 апреля 1949 года Фейнман сам излагал свои идеи. Наконец-то их слушали. Так был открыт путь новому способу изучения физики.

Новый старт, новые препятствия: сверхтекучесть

После триумфа, который вызвали диаграммы ученого, Фейнман чувствует, что должен поменять обстановку — как в личном, так и в профессиональном плане. Перед тем как снова приступить к преподаванию, но уже в Калтехе (в этом университете он будет работать до самого конца), исследователь решает провести годичный отпуск в Бразилии. Наряду с этим он прекращает работу с частицами ради того, чтобы заниматься физикой конденсированных сред, в частности проблематикой сверхтекучести гелия.

Американские ученые, в том числе физики, свои первые выезды за границу обычно совершали в европейские города. Однако Фейнман не намеревался следовать примеру своих коллег.

Его взор был обращен к Южной Америке. Летом 1949 года Фейнман принял предложение провести несколько недель в бразильском Центре физических исследований, не так давно открытом в Рио-де-Жанейро. За несколько месяцев до этого путешествия он поверхностно изучил португальский, чтобы иметь возможность преподавать физику и флиртовать с женщинами Копакабаны. Улицы Рио очаровали его своей свободной атмосферой, чуждой академической строгости и очень благоприятной для занятий искусством, в частности музыкой. В дальнейшем Фейнман будет предпочитать поездки в Южную Америку и Азию любым другим направлениям.

Обаяние улиц и пляжей Рио побудило его следующей зимой попросить Центр принять его на работу на постоянной основе, несмотря на то что он вел переговоры с Робертом Бэчером, его давним коллегой из Лос-Аламоса, желая также быть принятым в Калифорнийский технологический институт (Калтех). Фейнман признался, что устал от Корнелла, «от суеты маленького городка и плохой погоды». Кроме этого, он поведал Бэчеру, что предпочитает не брать студентов из докторантуры.

Но Бэчер убедил Фейнмана переехать в Пасадену и при этом дал ему годовой отпуск в Рио, с августа 1951 по июнь 1952 года.

В Бразилии Фейнман жил в номере отеля *Miramar de Sorocabana*, где он занимался расчетами энергетических уровней легких атомов (водород, гелий, литий и так далее). Проживая в стране, в которой 15 лет назад не было никакой физики (впрочем, как и в какой-либо другой стране Южной Америки), Фейнман должен был оставаться на связи с Соединенными Штатами Америки, чтобы получать необходимые экспериментальные данные. В эпоху, когда еще не существовало интернета, он мог общаться с радиационной лабораторией Калтеха, субсидируемой из прибыли одной известной фирмы, только один раз в неделю, при помощи бразильского радиолюбителя. Тем не менее здесь, в Бразилии, Фейнман потерял своего гения, как он сам это называл:

«Я много работал и получил приемлемые результаты... Но я пришел к выводу, что параметры, которые нужно учитывать, настолько многочисленны, что я не могу гарантировать полезности моей работы. Я стремился к глубокому пониманию ядра, но никогда не был полностью убежден в важности этого».

В действительности это означало только то, что он недостаточно много работал.

ДЕВУШКА ИЗ КОПАКАБАНЫ

«Американец в Рио» — так мог называться фильм, где Фейнману бы выпала главная роль. Хотя он всегда утверждал, что был нечувствительным к музыке, здесь для него открылся стиль, который отлично подходил к его манере жить: динамичный, импровизационный, горячий и непризнанный. Пусть самба и отсутствовала в последнем издании Британской энциклопедии, но она звучала в ушах Фейнмана, проникая через окно его отеля. Закончилось все тем, что ученый записался в школу

Os Farçantes de Copacabana, где начал пробовать себя в игре на пандейру. Затем его увлек другой музыкальный инструмент (фригидейра), на котором Фейнман играл несколько иначе, чем местные музыканты, чем и снискал симпатии последних. Постепенно к нему пришло мастерство, и он начал выступать на праздниках и, конечно же, на карнавале 1952 года, где фотограф одной местной газеты увековечил его в образе Мефистофеля.

Самба, спиртные напитки и флирт — вот основные предпочтения Фейнмана во время его пребывания в Рио-де-Жанейро, хотя и не обязательно в такой последовательности. Этой зимой он слишком много пил (до такой степени, что испугался и поклялся никогда больше не прикасаться к алкоголю) и пользовался некоторым успехом на пляже, дискотеках, а также в холле отеля.

После смерти Арлин Фейнман предался чувственному марафону: он играл в соблазнителя. Женщины говорили, что их привлекали его ум, его внешность, его манера танцевать, а также умение их слушать и пытаться понять. Он обычно встречался с одной избранницей в течение нескольких дней, затем отправлял письмо:

«Любимая, то, что сделало нас обоих счастливыми, имеет такое большое значение... Прошу тебя, никогда не забывай, даже на закате своей жизни, что я буду любить тебя где-то на этой Земле. Я никогда тебя не забуду, так как ты — единственный человек, с которым я чувствовал себя так хорошо».

Они всегда его прощали. Женщины знали, что работа для него стоит на первом месте, и любопытно то, что это делало его еще более привлекательным в их глазах. Находясь в эпицентре той веселой жизни, что он вел в Рио и которая словно вихрь поглотила его, Фейнман написал Мари Луиз Белл, с которой он познакомился в кафе Корнелла, и предложил ей выйти за него замуж. Они поженились после его возвращения из Бразилии, в июне 1952 года, а затем поехали в Мексику и Гватемалу проводить свой медовый месяц. Никто из его друзей не понимал

этого брака. За спиной они называли ее «девушкой с волосами из целлофана» и были убеждены, что она совсем не ценила своего мужа: у Мари Луиз была привычка говорить, что она стала женой невежественного обладателя докторской степени. Она изменила его стиль одежды до такой степени, что друзья Фейнмана, видя его, идущего с бабочкой на шее, знали: где-то рядом находится его вторая половинка. Мари Луиз бросала на них недоброжелательные взгляды и избегала общения с ними: сам Фейнман упустил случай встретиться с Нильсом Бором во время его визита в Пасадену, так как жена ему заявила, что не намерена коротать вечер в компании скучного старикана. Ничего удивительного в том, что его многочисленные знакомые удивлялись, как он мог связать свою жизнь с такой женщиной.

Что-то отличает меня от этих людей: они не учатся понимать, они учатся как-то иначе, по привычке или иным способом. Как их знания уязвимы!

Ричард Фейнман по поводу методов обучения в бразильских университетах

Такие отношения не могли длиться долго. Четыре года спустя, в 1956 году, супруги подписали соглашение о расторжении брака, что порадовало прессу. Не потому что Фейнман был знаменит, а скорее потому, что это давало им повод позлорадствовать. «Профессор играет на бонго и делает расчеты в постели», «Он делает расчеты за рулем, сидя в гостиной своего дома и ложась в постель». Как бы то ни было, алименты в десять тысяч долларов в течение трех лет положили конец этому браку, которого никогда не должно было существовать.

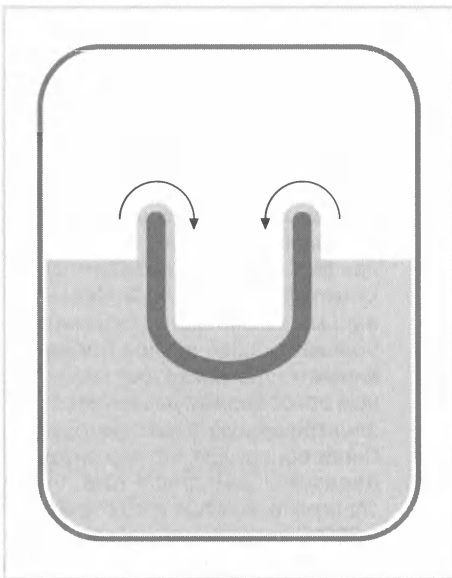
НУЛЕВАЯ ВЯЗКОСТЬ

Все жидкости оказывают сопротивление при вытекании. Это явление называют вязкостью, возникающей из силы трения,

которая действует между молекулами жидкости, а также между молекулами и поверхностью, по которой они растекаются. У некоторых жидкостей, таких как шампунь или мед, вязкость очень велика. У других (например, у воды) она гораздо меньше. А жидкий гелий при температуре меньше -271°C ведет себя вообще аномально: его вязкость исчезает, и гелий становится сверхтекучим (см. рисунок). При этом мы можем наблюдать следующее явление: гелий буквально перетекает через край сосуда, в котором он содержится, переливается наружу и легко проникает в отверстие, размер которого меньше 0,0002 миллиметра.

Без вязкости и трения жидкий гелий может течь вечно, порождая проблеск надежды для тех, кто в течение веков искал секрет вечного двигателя. Любопытно то, что природа создала другую форму вечного движения, хорошо известную физикам как движение электронов вокруг атомного ядра. Не существует никакого трения, когда электроны находятся на своих атомных орбитах. Не здесь ли кроется отгадка? Язык квантовой физики, вероятно единственно возможный в микромире, мало применим к нашей реальности. Может ли большое количество жидкости находиться в квантовом состоянии, подобно электрону в ядре?

Физики, изучающие конденсированное состояние, ведомые за собой советским ученым Львом Ландау, разработали несколько идей, способных помочь понять этот феномен. Одна из таких идей рассматривала наличие новых сущностей, названных квазичастицами или квантами возбуждения, массово перемещающихся и взаимодействующих друг с другом, как если бы речь шла о настоящих частицах. Одна из квазичастиц — это



Сверхтекучий гелий перетекает через край сосуда, пока его наружный и внутренний уровни не сравняются.

СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

В 1908 году нидерландский физик Хейке Камерлинг-Оннес (1853–1926) смог превратить гелий в жидкость. Без тени сомнения, речь идет о значимом прогрессе, учитывая, что гелий кипит при температуре -269°C и что в ту эпоху методы криогенной техники были весьма примитивны (элемент гелий обладает самой низкой температурой кипения и не замерзает при нормальном атмосферном давлении). Измеряя электрическую проводимость ртути, Оннес обнаружил, что чем ниже ее температура, тем лучше она проводит электрический ток. А при температуре -269°C электрическое сопротивление полностью исчезает. Таким образом Камерлинг-Оннес открыл сверхпроводимость. Но зато нидерландский физик прошел мимо самых удивительных свойств жидкого гелия. В 1938 году российский ученый Петр Капица (1894–1984) и канадцы Джон Аллен (1908–2001) и Аустин Майзнер (1911–1996) обнаружили, что при температуре ниже -271°C жидкий гелий становится превосходным проводником тепла, в 200 раз лучше, чем медь. К тому же его вязкость значительно меньше, чем вязкость газобразного водорода: это феномен сверхтекучести.



Хейке Камерлинг-Оннес.

Новые препятствия

Сверхтекучесть и сверхпроводимость гелия ставят два препятствия перед физиками-теоретиками. «Это как два осажденных города... окруженных знанием, но полностью изолированных и неприступных», — комментирует Фейнман. И это несмотря на тот факт, что два гения той эпохи, работавшие по обе стороны от железного занавеса, советский ученый Лев Ландау и норвежец, принявший американское гражданство, Ларс Онзагер, концентрируют на данной проблеме все свои силы. Онзагер, работавший в Йельском университете, сделался знаменитым среди студентов благодаря своим сложным лекциям по статистической механике. А Ландау подвергал всех студентов, желающих учиться у него, десяти сложным экзаменам. В случае успеха имя студента вписывалось в маленький блокнот — награда, которой немногие могли похвастаться.

фонон, квант энергии звуковой волны. Согласно Ландау, в жидком гелии присутствует определенное число квазичастиц элементарного возбуждения, которые называются ротонами. Фейнман был очарован этими феноменами, свойственными жидкому гелию, и он решил посвятить себя поиску ответов на свой лад, исходя из одних лишь аксиом. Ему удалось найти только один.

КВАНТОВАЯ ГИДРОДИНАМИКА

До прихода Фейнмана в мир конденсированных сред никому и в голову не приходило использовать квантовую механику, чтобы напрямую вычислить общие свойства перехода, при котором гелий становится сверхтекучим. Однако все знали, что квантовая механика должна была играть главную роль в этом феномене. И в самом деле, квантовая теория позволяет объяснить, почему гелий является единственным элементом, который не застывает даже при самых низких температурах. Согласно классической физике, атомы и молекулы не могут находиться в движении, если температура опускается до абсолютного нуля ($-273,15^{\circ}\text{C}$). Тогда прекращается любое движение. Но если мы рассматриваем бесконечно малые величины, это становится невозможным ввиду принципа неопределенности Гейзенберга. В квантовой механике система не может находиться в какой-то определенной точке и иметь нулевую энергию. Как следствие, даже при абсолютном нуле атомы гелия колеблются, пусть и совсем чуть-чуть. Сила притяжения, которая появляется между двумя атомами гелия, очень слаба. Настолько слаба, что существующей чрезвычайно малой энергии в состоянии, близком к абсолютному нулю, достаточно, чтобы помешать им объединиться и образовать прочную структуру.

В 1938 году Фриц Лондон предположил, что переход в сверхтекучесть могло проиллюстрировать явление, описанное Эйнштейном и индийцем Шатъендранатом Бозе. При нормальных температурах атомы газа занимают весь объем сосуда,

который их содержит. Но при особо низких температурах, около миллионной доли градуса выше абсолютного нуля, атомы теряют свою индивидуальную специфику (больше нельзя их различить) и ведут себя, как если бы речь шла об одном единственном «суператоме»: это конденсат Бозе – Эйнштейна (КБЭ), то есть состояние вещества после твердой фазы. В 1995 году группа ученых из Объединенного института лабораторной астрофизики в городе Боулдер, штат Колорадо, смогла остудить две тысячи атомов рубидия до температуры 20 нанокельвинов на десять секунд, впервые получив, таким образом, конденсат Бозе – Эйнштейна. В этом конденсате все атомы находятся в своих минимально возможных квантовых состояниях, и квантовые эффекты начинают проявляться на макроскопическом уровне. И как следствие, поведение атомов соответствует правилам квантовой механики, а не классической физики. Проблема в том, что КБЭ может быть получен лишь в случае с идеальным газом, то есть газом, молекулы которого не взаимодействуют (исключая неизбежные столкновения между ними). Что же касается гелия, то на его атомы действуют пусть и слабые, но силы притяжения. Тогда возможно ли, чтобы переход к КБЭ происходил в гелии несмотря ни на что? Фейнман был полон решимости разобраться в необычном поведении гелия.

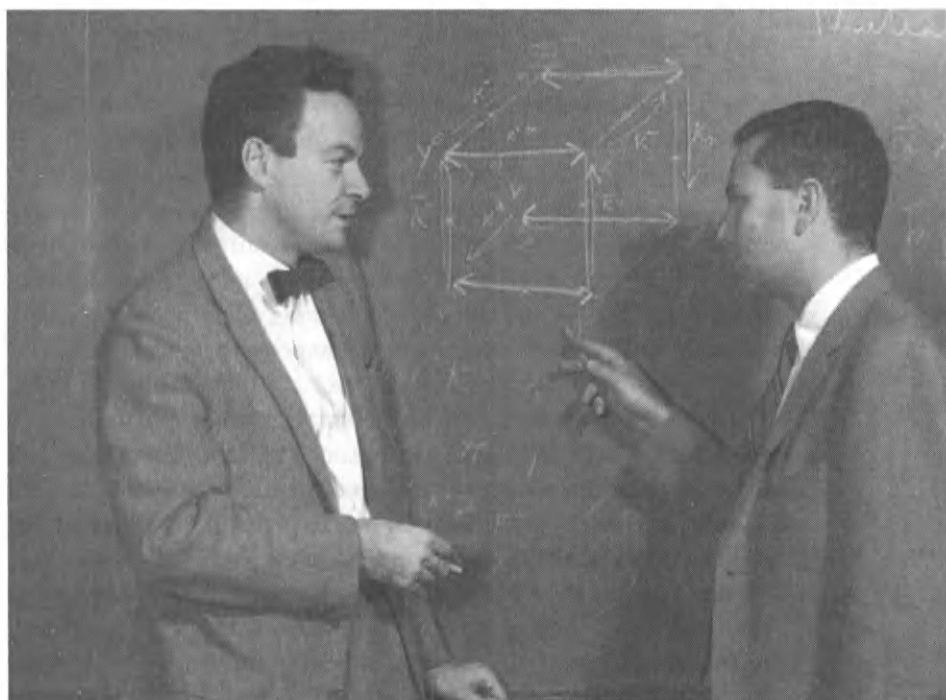
Путешествие в этот мир крайнего холода ученый начал с применения интегралов по траекториям для каждой частицы, держа при этом в уме два принципа. Первый из них гласит, что атомы гелия являются бозонами, то есть частицами с целым значением спина. Это означает, что свойства системы не изменятся, если в ней изменить порядок пар атомов гелия. Именно свойство играет фундаментальную роль в применении Фейнманом его метода. Траектории, преобладающие над интегралом пути (то есть минимизирующие действие), в которых индивидуальные частицы находят свое начальное положение, должны рассматриваться как равные тем, в которых конечное расположение кажется эквивалентным начальному (близкое тому, в котором несколько частиц изменили порядок своих положений). Второй принцип относится к движению атома гелия



ВВЕРХУ СЛЕВА:
Ричард Фейнман
в октябре
1965 года.

ВВЕРХУ СПРАВА:
Индийский
физик
Шатъендранат
Бозе, который
открыл вместе
с Эйнштейном
конденсат
Бозе —
Эйнштейна.

ВНИЗУ:
Фейнман (слева)
ведет дискуссию
относительно
задачи на доске,
примерно
1950 год.



по отношению к атомам из своего окружения. Давайте вспомним, что действие, относящееся к любой траектории, связано с суммой разностей между кинетической и потенциальной энергиями во всех точках пути. Если атом перемещается медленно, его соседи будут стараться убраться с его пути и приобретут кинетическую энергию, которая войдет в действие. В любом случае их кинетическая энергия зависит от их скорости перемещения, связанной со скоростью первого атома гелия. В результате это перемещение приведет к изменению массы рассматриваемого атома гелия. Фейнман доказал, что траекториями, вносящими наибольший вклад в сумму путей, являются те, в которых каждая частица перемещается как свободная, но с немного большей массой.

Бесполезно переживать во время решения задачи. Зато когда она решена, наступает момент беспокойства.

Ричард Фейнман

Взаимодействие атомов гелия является тогда составной частью происходящего и может быть проигнорировано в расчетах. Этот подход делал из гелия, по сути, идеальный газ Бозе – Эйнштейна, и переход в КБЭ был возможен. Вместе с тем Фейнман доказал, что этот подход к описанию поведения гелия также годится и для любой другой системы частиц, сильно взаимодействующих между собой. Его работа была больше чем простым описанием физического феномена:

«Этот принцип представляет ценность для других областей физики, например для ядерной физики. Мы стоим перед фактом, приводящим в замешательство: одиночные ядра иногда ведут себя как независимые частицы, несмотря на сильные взаимодействия. Доводы, приведенные для гелия, также годятся и для других случаев».

Так он сформулировал свои мысли в первой статье, которую опубликовал по данной теме. Его целью было понять мир

мезонов, где его диаграммы казались совершенно непригодными. Фейнман предчувствовал, что для того чтобы понять свойства мезонов в запутанном экспериментальном контексте, он должен исследовать свойства электронов и атомов в плотных материях. Они поднимали схожую проблему, но в отличие от предыдущего случая экспериментальный контекст был гораздо яснее.

РОТОНЫ И ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ

Фейнман показал, что переход гелия в сверхтекучее состояние можно интерпретировать как переход в КБЭ, но он не решил этой задачи. Наш обычный мир защищен от квантовых парадоксов. Но как тогда объяснить, почему гелий, став сверхтекучим, продолжает оставаться таким в макромире?

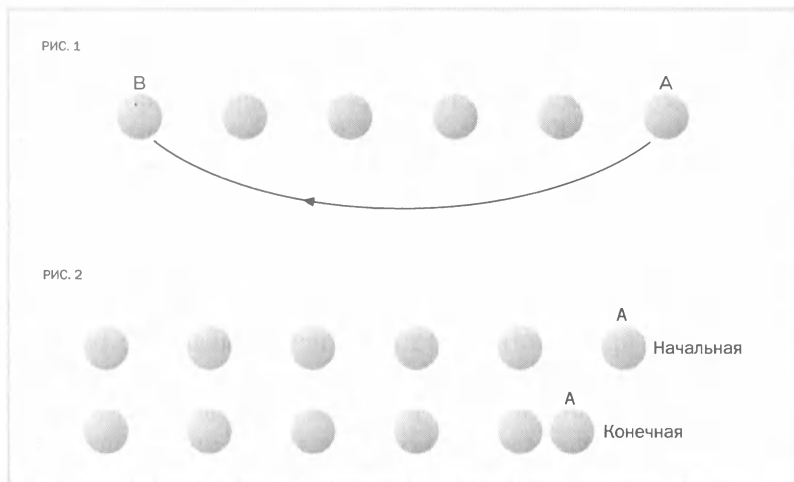
В эту эпоху ответ был исключительно феноменологическим. Иными словами, физики внимательно изучили сверхтекучий гелий, затем, исходя из полученных данных, смогли определить микроскопические свойства системы, которые воспроизводили экспериментальные результаты. На первый взгляд может показаться, что мы располагаем полным физическим объяснением, но это не так: разумеется, возможно понять микроскопические свойства из опытов, но объяснить, почему природа имеет такие свойства — это уже совсем иное дело. И именно это было целью Фейнмана.

Лев Ландау предложил хорошую феноменологическую модель. Согласно ему, устойчивость сверхтекучести объясняется отсутствием любого другого доступного КБЭ состояния со слабой энергией, волнения которой могли бы разрушить ее квантовое состояние. Без этой новой ситуации индивидуальные частицы не могут изменить свое движение благодаря какому-либо столкновению. Тогда сверхтекучесть продолжает равномерно перемещаться, как электрон по орбите вокруг атома. В обычной жидкости молекулы сталкиваются друг с другом, задевают примеси, края сосуда... Эти взаимодействия изме-

няют состояние движения атомов, растрчивая таким образом энергию, что замедляет жидкость.

Фейнман представил следующий аргумент: ввиду отталкивания на короткое расстояние, которое существует между атомами гелия, фундаментальное состояние слабой энергии приводит к тому, что жидкость имеет, в основном, постоянную плотность. Как объяснить в этом случае, что нет другого состояния слабой энергии? Вспомним, что в квантовой механике любая частица может рассматриваться в качестве волны вероятности, энергия которой зависит от длины волны (расстояние между двумя последовательными вершинами). Таким образом, волновые функции, которые сильно видоизменяются в ограниченном пространстве, обладают большей энергией, чем другие. Этот феномен объясняется принципом неопределенности: если одна волна переходит от одного своего самого высокого значения к самому низкому на короткой дистанции, мы получаем с большей точностью расположение частицы, что увеличивает ее момент и ее энергию. Стало быть, решение кроется в квантовом состоянии слабой энергии с волновой функцией без слишком многочисленных вибраций и в немного ограниченном пространстве.

Фейнман рассуждал таким образом. Представим, что мы перемещаем атом из точки А в точку В на длинном расстоянии. Если новая конфигурация должна иметь единую плотность, тогда необходимо преобразование других атомов, и один атом должен перемещаться, чтобы занять оставшееся пустое место. Перемещая очень отдаленный атом, мы будем пытаться поверить, что выходящее состояние должно сильно отличаться от начального. Но об этом можно забыть, когда речь идет о бозонах: даже при взаимозаменяемости очень удаленных атомов гелия мы сохраняем такую же конфигурацию, так как в действительности мы обмениваем идентичные бозоны (рисунок 1). Только волновая функция будет изменена, если перемещение из А соответствует хотя бы половине средней дистанции между соседними частицами. В этом случае новая конфигурация будет отличаться от начальной (рисунок 2).



Таким образом, вибрации не могут быть больше, чем среднее расстояние между атомами. Но на этом уровне мы наблюдаем состояния, снабженные большой энергией, отличающейся от той энергии, которой располагают атомы гелия при температурах сверхтекучести. Таким образом, они никогда не будут доступны в системе.

Так Фейнман доказал, что не существует состояний возбуждения слабой энергии, легкодоступной для движения атомов. Сверхтекучесть поддерживается при условии, что тепловая энергия системы будет ниже разницы между фундаментальным состоянием и состоянием возбуждения малейшей последующей энергии.

ДВЕ ЖИДКОСТИ В ОДНОЙ

До того как Фейнман посвятил себя этой теме, венгр Ласло Тисса, выдающийся профессор МТИ, предложил модель для двух жидких тел, чтобы описать переход между обычной и сверхтекучей жидкостями. При абсолютном нуле гелий полностью сверхтекучий. По мере того как он разогревается, воз-

буждения при движении появляются в сверхтекучей жидкости, способные войти в столкновение с краями сосуда и рассеять энергию, действуя в качестве составляющей обычной жидкости. Если температура повышается, появляются новые возбуждения, до тех пор, пока составляющая обычной жидкости не займет весь объем.

Благодаря этим примерным расчетам, основанным на первичных принципах, Фейнман смог воспроизвести это явление, однако пришлось ждать 32 года до того момента, когда стало возможным произвести достаточно исчерпывающие расчеты с экспериментальными данными. Это случилось в 1985 году благодаря сверхкомпьютеру, точно рассчитывавшему интегралы по траекториям, которые Фейнман ввел лишь приблизительно.

Тем не менее один из своих самых впечатляющих «фокусов» в области физики Фейнман показал, ответив на следующий вопрос: что происходит, если сосуд, содержащий сверхтекучий гелий, начинает вращаться? Данный вопрос может показаться обычным... до того момента, когда берешься на него ответить. Учитывая природу фундаментального состояния и энергии, необходимой для достижения состояния возбуждения, состояние сверхтекучести должно быть «безвихревым». Это означает, что вибрации, мешающие течению, не могут появиться. Но что происходит, если жидкость начинает вращаться, потому что сосуд сам находится во вращении?

Фейнман сделал вывод, что жидкость в своем полном объеме не может начать вращаться, но маленькие отдельные части, порядка нескольких атомов в диаметре, могут начать ротацию вокруг своей собственной центральной зоны. Речь идет о ротонах Ландау.

Такая математическая виртуозность впечатляет, но особо ценно в работе Фейнмана то, что он сделал очевидной пользу вариационного метода, который, начиная с этого времени, употребляется для решения основных проблем, связанных с изучением материи.

От атомов к кваркам

В 1950-е годы физика сталкивается с новой проблемой: необходимо навести порядок среди огромного количества новых частиц, которые продолжают открывать ускорители. Другая задача: изучить взаимодействия между ними, в частности слабое взаимодействие, отвечающее за распад нейтрона. После отступления в сторону, в физику конденсированного состояния, Фейнман снова готов заняться исследованиями в своей любимой области. Чтобы это сделать, ему необходим важный союзник — Марри Гелл-Ман.

Журнал *Nature* опубликовал 20 декабря 1947 года две фотографии, представляющие два явления, названные «V», ввиду их характерной формы. Такие явления происходят, например, когда нейтральная частица, без заряда (которая не оставляет никакого следа в пузырьковой камере), распадается на две частицы с противоположными зарядами (оставляющие следы). Это то, что мы видим на первом фото. Второе показывает траекторию заряженной частицы, которая в определенный момент резко меняет направление. Опытному физика это говорило о наличии заряженной частицы, распавшейся на две: с одной стороны, нейтральная частица (которая не оставила фиксируемого следа своего движения) и, с другой стороны, частица с таким же зарядом, но с массой, отличной от массы главной частицы (откуда происходит изменение ее траектории). Что же именно вело себя таким образом?

Частица была названа «Λ» («лямбда»), а что привлекало внимание, так это ее более долгая жизнь, чем можно было ожидать. В среднем срок жизни частиц, которые участвуют в сильном взаимодействии, составляет 10^{-24} секунды, а срок жизни частицы Λ составил 10^{-10} секунд. И, что еще интересней, это была единственная частица, которая вела себя подобным образом. Это становится настолько важной темой, что Международный конгресс о космическом излучении 1953 года (проходивший

МАРРИ ГЕЛЛ-МАН

Родившийся 15 сентября 1929 года в Нью-Йорке, Марри Гелл-Ман в возрасте 14 лет был назван «самым прилежным учеником» своими же товарищами по школе Columbia Grammar, расположенной в Верхнем Вест-Сайде Манхэттена. С самого юного возраста будущий ученый проявлял большой интерес к лингвистике, настолько сильный, что со временем стал экспертом по фонетике. Однажды Фейнман репетировал несколько строчек на самоанском языке для роли вождя племени в музыкальной комедии «Южный Тихий океан», которую они готовили в Калтехе. При этом он как-то сказал своему другу: «Марри будет единственным, кто знает, что произношение у меня неважное».

Именно в университете Гелл-Ман начинает видеть свое призвание в изучении физики. Поступить в университет ему оказалось непросто, несмотря на то что в школе Гелл-Ман считался вундеркиндом: Йельский университет принял его только на математическое отделение, Гарвард — лишь при условии полной оплаты, а Принстон решительно ему отказал. При таких обстоятельствах он решает учиться в МТИ, куда и поступает в 1948 году, в эпоху, когда квантовая электродинамика становится популярной. Его наставник, Виктор Вайскопф, сказал ему, что будущее принадлежит Фейнману, поэтому Гелл-Ман начинает кропотливо изучать все его статьи. В результате изучения предмета у него складывается сугубо личное видение ученого мира КЭД: Фейнмана он считает прямолинейным, Швингер кажется ему пустым и чопорным, а Дайсон — ординарным и небрежным. В 21 год, после получения своей докторской степени, он уезжает работать с Ферми в Чикагский университет. В это время исследователи физики частиц должны были навести порядок в результатах, предоставленных ускорителями частиц: по мере того как они продвигались в своей работе, появлялись все новые частицы. Положение в данной области довольно запутанное: в журнале *Review of Modern Physics* финн Мэтт Росс описал 41 различную частицу. Говорить об «элементарных частицах» после этого просто смешно.



Король Швеции Густав VI Адольф приветствует Марри Гелл-Мана (справа) после вручения ему Нобелевской премии по физике в 1969 году.

с 5 по 11 июля во французском городе Баньер-де-Бигор) был почти полностью посвящен новым частицам, которые уже окрестили «странными». Общий ход мысли на данном форуме был отражен на первой странице его протокола: «Частицы, обсуждаемые на этом конгрессе, нельзя назвать вымыслом, и любая аналогия с частицами, существующими в природе, не случайна». Для четырех сотен присутствующих физиков все происходящее было очень важно. Существование «странных» частиц было просто возмутительным. «Все равно как если бы природа позволила себе фантазировать, как если бы новые явления смогли существовать, не участвуя на самом деле в мировом порядке», — прокомментировал ситуацию француз Мишель Крозон. В конце конгресса молодой физик Марри Гелл-Ман, из университета Чикаго, представил концепцию странности, нового свойства субатомных частиц. Что она из себя представляет? И, что еще более важно, как ее встроить в существующие схемы?

СТРАННОСТЬ

Вот уже десяток лет физики думали о том, как лучше объяснить четыре фундаментальные взаимодействия природы: гравитационное, управляющее миром планет и звезд; электромагнитное взаимодействие, отвечающее за химические реакции и электрические процессы; сильное взаимодействие, которое поддерживает вместе протоны и нейтроны в атомном ядре, а также слабое взаимодействие, объясняющее бета-распад. Каждое из них играло свою четко обозначенную роль. Тем не менее ускорители начинали открывать частицы Λ в значительных количествах. Как объяснить то, что в хорошо организованном мире частиц имелась одна, за создание которой отвечает сильное взаимодействие, тогда как ее распадом, возможно, управляет слабое? Чтобы разъяснить этот момент, Гелл-Ман в 1952 году постулировал существование новой фундаментальной характеристики субатомного мира, которую он вначале назвал *y*. Речь

шла о новом виде заряда. И именно в этом заключался революционный характер его теории: этот заряд u не вел себя как электрический заряд. В случае последнего, независимо от того, что может внезапно произойти в мире, электрический заряд сохраняется. То есть, если в начале любого процесса общий заряд системы равен нулю, то окончательный заряд тоже будет равен нулю. Как следствие, нейтрон, который является нейтральной частицей, распадается на протон (с положительным зарядом), электрон (с отрицательным зарядом) и антинейтрон (без заряда). В то же время, в случае заряда u , Гелл-Ман настаивал на том, что он сохранялся... иногда. Его предположение, которое ученый развернул в нескольких статьях, опубликованных с августа 1953 года, заключалось в том, что u сохранялся при сильном взаимодействии, но не при слабом.

Во всех наших знаниях о фундаментальной физике не существует важной идеи, которая не носила бы имени Гелл-Мана.

Заявление Фейнмана в знак уважения к работе Гелл-Мана

Гелл-Ман представил следующий аргумент: так как u сохраняется, частицы, созданные распадом, должны появиться в виде пар частица-античастицы с зарядами, равными по значению, но с противоположными знаками. Частицы были бы постоянные, так как создание не-странных частиц противоречило бы законам сохранения, при условии, что в процессе участвует сильное взаимодействие. Но если мы имеем дело со слабым взаимодействием, ответственным за распад нейтрона, то законы сохранения не действуют и частицы смогут распадаться. Кроме того, по той же причине их средний срок жизни будет более продолжительным — именно то, что мы и наблюдаем.

Гелл-Ман отдавал себе отчет, что квантовое число u могло в равной степени служить для классификации частиц. Чем оно больше, тем невероятней прогноз: частица K^0 , или каон (нейтральный), должна иметь античастицу, отличную от нее. Это

предположение было достаточно непривычным: до сих пор считалось, что античастицы нейтральных частиц, например фотона, тождественно совпадают со своей частицей. Когда выяснилось, что Гелл-Ман был прав, этот молодой физик, будущий лауреат Нобелевской премии, стал знаменитым. Следующий его шаг заключался в нарушении неписанной традиции именования новых частиц: он отождествил имя с квантовым номером, названным «странностью», и связанные частицы были названы «странными». Такое определение не пришлось по вкусу издателям журнала *Physical Review Letters*, которые исключили выражение «странные частицы» из названия статьи.

А в начале учебного года университет Калтех пригласил Гелл-Мана к себе, и тот согласился. Он устроился в кабинете, расположенном как раз над кабинетом Фейнмана. В возрасте 26 лет Гелл-Ман стал самым молодым профессором в истории университета. Общественное мнение сходилось на том, что в Калтехе тогда работали два лучших физика эпохи. При этом Гелл-Ман и Фейнман взаимно восхищались друг другом.

«Что мне всегда нравилось в Ричарде, так это отсутствие пафоса в его выступлениях. Я пресытился физиками-теоретиками, которые топили свою работу в математической лексике или выдумывали притязательные обозначения для того, что можно назвать довольно скромным вкладом в науку. Ричард излагал свои остроумные и оригинальные идеи, очень часто мощные, настолько просто, что его объяснения представлялись мне как сильный порыв свежего воздуха».

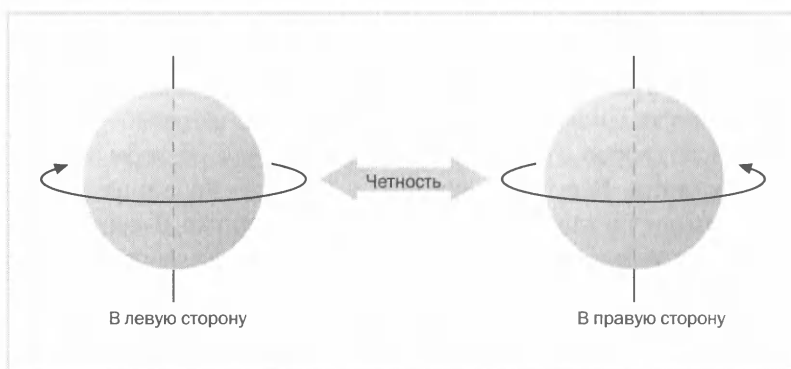
Иначе и быть не могло: они начали сотрудничать и могли часами вести дискуссии в своих кабинетах, занятые «обсуждением вопросов о космосе», как вспоминал об этом Марри впоследствии. Все-таки речь шла о союзе, основанном на несовместимости характеров: Гелл-Ман воплощал в себе образованного ученого, который неукоснительно и со строгостью судил других и их идеи и который всегда следил за последними научными открытиями. В противовес ему, Фейнман никогда не интересовался награжденными лауреатами. Все, что его

занимало, — это информация о том, было ли предположение правильным.

ВЛЕВО ИЛИ ВПРАВО?

Давайте представим, что с помощью наших огромных радиотелескопов мы контактируем с внеземной цивилизацией и что это возможно только посредством радио. В данных условиях как мы можем указать инопланетянам на правую сторону? Мы не можем сказать им взять компас и посмотреть в сторону севера, так как то, что мы называем «север», является результатом произвольного решения. Сверяясь с компасом, мы должны помнить, что красная стрелка означает север; если это не так, мы можем выбрать его по своему желанию.

Размышляя над этим, мы можем прийти к выводу, что в данных условиях мы преследуем призрачную цель, так как физические законы не различают левую и правую стороны. Другими словами, если нам продемонстрировать видео столкновения двух машин или одной партии в бильярд, мы будем не способны определить, показаны нам картинки прямо или, наоборот, после того как они были отражены в зеркале. В физике такая зеркальная симметрия называется «сохранением четности».



Не все объекты Вселенной симметричны, когда мы наблюдаем их в зеркале. Неподвижная сфера является симметричной: тогда говорят о четности. В противном случае речь будет идти о нечетности. Эта симметрия (геометрическая) исчезает, если сфера начинает вращаться вокруг своей оси. Она больше не соответствует своему зеркальному отражению (см. рисунок).

Изменение четности меняет сферу, вращающуюся в одну сторону, на другую сферу, вращающуюся в обратном направлении. Мы можем проверить это, раскрутив глобус перед зеркалом. С другой стороны, интерес вызывает тот факт, что зеркало меняет местами левую и правую стороны, но не верх с низом. Ответ на этот извечный вопрос заключается в том, что зеркало прячет изменение четности: оно меняет координату по оси, которая перпендикулярна ему, и не меняет координаты на двух других осях, лежащих в плоскости, параллельной ему.

Закон сохранения четности предусматривает, что нечетные объекты не могут превращаться спонтанно в четные. И это важно: в противном случае мы смогли бы использовать спонтанное изменение четности, чтобы определить абсолютную правую и левую стороны. В случае субатомных частиц теория указывает, что если четность сохраняется, тогда четная частица не может распадаться на одну четную частицу и одну нечетную; зато она может распасться на две нечетные или две четные частицы.

В то же время физики открыли, что странные каоны не следуют этому правилу. Они распадаются на другие более легкие частицы, названные пионами, иногда в количестве двух, иногда — трех. Фейнман предложил объяснение такому аномальному поведению. Согласно ему, эта частица:

«...распадалась иногда на два, иногда на три пиона. Но никто не был готов смириться с этим, так как существует закон сохранения четности. Он предполагает, что все физические законы симметричны по отношению к их зеркальному отражению; с другой стороны, он утверждает, что элемент, который образует два пиона, не может также давать три пиона».

СИММЕТРИИ

Физика обычно ищет закономерности в устройстве нашего мира, то, что обычно называют «законы природы». Большинство из них можно описать при помощи математических формул. Симметрия создает одну из исследовательских моделей законов природы. Мы все когда-то ее использовали. Если покрутить футбольный мяч на пальце, наше восприятие мяча не меняется: этот феномен называется осевой симметрией; одноцветные машины, выстроенные в один ряд, представляют трансляционную симметрию, то есть невозможно отличить одну машину от другой, так как последняя машина может быть похожей на первую. К тому же, за исключением нескольких очень особых деталей, мы не делаем различия между собой и нашим отражением в зеркале: это зеркальная симметрия. Все эти примеры позволяют нам понять смысл слова «симметрия»: это нечто, остающееся неизменным после преобразования. Какое значение она имеет в физике? Природные законы представляют собой симметрии, которые существуют во Вселенной, и знаменитый закон о сохранении энергии — это не что иное, как симметрия: существует количество энергии, которое остается неизменным.



Эмми Нётер около 1910 года.

Теорема Нётер

Эмми Нётер (1882–1935), молодой немецкий математик, — наш проводник на этом пути. В 1918 году она доказывает теорему, известную сегодня как теорема Нётер, названную в ее честь. В тишине своего дома (женщины в то время не могли становиться профессорами в университетах) она открывает, что для каждой симметрии, которая существует в природе, должен существовать некоторый закон сохранения. Согласно теореме Нётер, сохранение энергии существует, так как законы физики не меняются со временем: они остаются такими же, как и сто лет назад, как вчера или завтра. Импульс — это другая величина, которая соответствует однородности пространства: неважно, проводим мы опыт в Сан-Франциско или в Мадриде, — мы всегда получим одинаковые результаты. Теорема Нётер также предполагает, что если мы не видим никакого изменения в природе, изменяя правую и левую стороны, тогда существует одно значение (четность), которое остается постоянным.

Единственная приемлемая альтернатива сводилась к тому, что должно существовать два типа каонов, которые различаются четностью. В любом случае, это поднимало новую проблему, так как эти два каона, окрещенные физиками *тау* и *тета*, были полностью идентичными: в обоих случаях речь шла об абсолютно одинаковых бозонах с равными массами. И только распад на две или три частицы позволял их различать.

ЭЛЕКТРОН, ДВИЖУЩИЙСЯ ВЛЕВО

Такова была ситуация весной 1956 года, когда Гелл-Ман и Фейнман начали сотрудничать. В то время Фейнман уже был ученым, известным среди своих коллег: его диаграммы стали атрибутом повседневной работы физиков, которые, когда приезжали в Калтех, почитали за честь зайти и поздороваться с ним. Все хотели побеседовать с Фейнманом и рассказать о своих проблемах в исследованиях, и он их слушал: эта черта, которая делала его неотразимым в глазах женщин, также располагала к нему его коллег.

В этом году Фейнман и Гелл-Ман приняли участие в самом важном для физики частиц событии — Рочестерской конференции, проходившей в одноименном городе. Умы присутствующих были заняты головоломкой тау- и тета-каонов. В ночь на пятницу молодой человек по имени Мартин Блок предложил Фейнману возможное объяснение явления: речь могла идти о двух процессах одной частицы, идущих с изменением четности при слабых взаимодействиях. У Фейнмана было плохое настроение, и он готов был признать собеседника идиотом из-за таких идей, но он быстро понял, что не может придумать никакого возражения по существу.

На следующий день, к концу последнего субботнего заседания, Фейнман поднялся и спросил, упомянув про авторство Блока: может ли слабое взаимодействие изменить четность? Протокол конгресса сообщает, что ответил один молодой физик-теоретик по имени Ян Чжэньнин. Он объяснил, что

проводил исследования на эту тему, но еще не пришел к определенному выводу. Тем не менее Ян сказал, что у него нет никакого доказательства существования такого нарушения. После собрания Фейнман и Гелл-Ман изучили данный вопрос и сделали вывод: не существует веских аргументов, позволяющих утверждать, что слабое взаимодействие не может нарушать закон сохранения четности. Но если так, тогда все казалось возможным. Никакой уверенности у них не было. По возвращении в свой университет Ян и его коллега Ли Чжэндао снова вернулись ко всем имеющимся экспериментальным данным, но не достигли успеха в решении этой проблемы. Тогда они предложили опыт, целью которого было окончательно определить, сохраняет ли слабое взаимодействие четность. Эксперимент в общих чертах состоял в том, чтобы проверить, было ли больше электронов с левой стороны, чем с правой, во время β -распада. В июне 1956 года ученые опубликовали статью, в которой изложили такую возможность. Это было настоящим безумием, но они смогли убедить коллегу из Колумбийского университета Ву Цзяньсюн проверить их теоретические выкладки на практике. Они были настолько убедительны, что вынудили Ву сократить ее отпуск с мужем, который она проводила в Европе, ради этого эксперимента. Ву доказала, что при охлаждении радиоактивного кобальта до сверхнизких температур и при его нахождении в магнитном поле электроны, испускаемые при β -распаде, перемещаются, главным образом, влево. Немного позже Леон Ледерман, будущий Нобелевский лауреат по физике 1988 года, а также коллега Ву по Колумбийскому университету, решил проверить эти результаты и изменил ее инструментарий, чтобы провести опыт. Он получил подтверждение: электрон стремился влево.

Для существования науки нужны умы, которые не принимают того, что природа следует некоторым предвзятым условиям.

Ричард Фейнман. «Природа физики» (1965)

Открытие нарушения четности вызвало настоящий шок в сообществе физиков. Фейнман же, когда узнал новость, начал танцевать. В следующем, 1957 году, Ли и Ян получили Нобелевскую премию. Вопреки всем ожиданиям, члены Нобелевского комитета исключили Ву из списков кандидатов на эту премию.

СЛАБАЯ ТЕОРИЯ

Во время Конференции в Рочестере в 1957 году Ли сообщил результаты одного очень интересного наблюдения: нейтрино по своей сути — левша. Все известные частицы могут иметь два направления спина (если представить спин как вращение, это означает, что они могут вращаться как по часовой стрелке, так и в обратную сторону), за исключением нейтрино. Этот феномен привлек внимание Фейнмана. Он вспомнил, что уравнение, аналогичное уравнению Дирака, которое он вывел с помощью интегралов по траекториям, можно было применить и к нейтрино. Единственной проблемой было то, что таким образом полученные результаты отличались от экспериментальных. Если рассмотреть все виды взаимодействия нейтронов, протонов, электронов и нейтрино, то мы увидим необходимость ввести пять типов операторов, названных по свойствам их преобразований: скалярный (S), векторный (V), аксиально-векторный (A), тензорный (T) и псевдоскалярный (P). Иначе их называют токами: тензорный ток (T), векторный ток (V) и так далее. Ферми считал, что β -распад мог объясняться как векторный ток (V). И это было основное предположение до 1956 года, когда доказали, что слабое взаимодействие нарушает четность. Это изменяло ситуацию: две из данных величин должны были бы тогда сочетаться, и опыты, казалось, указывали на то, что речь должна идти о S и T или V и T. Однако уравнения Фейнмана без тени сомнения делали очевидным сочетание V и A. Опыренный своим открытием, он хотел поделиться им с коллегами, но времени на его выступление вы-

делено не было. Фейнман использовал весь свой талант и все свое обаяние, чтобы убедить одного из ученых отдать ему пять минут времени от своей презентации для изложения теории. По иронии судьбы этим коллегой оказался Кеннет Кейз: именно ему Фейнман публично объяснял ошибочность его работы. Фейнман сделал свое сообщение и по окончании конференции уехал в Бразилию, намереваясь провести там лето.

Фейнманом овладела мысль вывести универсальное уравнение для последнего из четырех взаимодействий природы, которое оставалось описать. Это был, по его словам, последний шанс изложить фундаментальный закон. Когда Гелл-Ман вернулся, то рассказал ему, что долго общался с Робертом Маршаком, физиком из Рочестерского университета, и его сотрудником, Джорджем Сударшаном, молодым индийцем. Они обсуждали вероятность того, что V-A была единственной возможностью для слабого взаимодействия. Этот разговор стал стимулом для Фейнмана; в конечном итоге его теория оказалась верна:

«Я одним прыжком вскочил с места и заявил: «Сейчас я понимаю все. Все ясно, и я вам объясню это завтра». Они считали, что я шутил, но вовсе нет. Я должен был освободить себя от тирании S и T, так как у меня была теория для V и A».

Фейнман был убежден, что он был единственным в мире, кто понимал, как V-A производили универсальную формулу слабого взаимодействия. Он принялся писать статью с невероятной скоростью, желая представить миру новую теорию. Между тем Гелл-Ман понял, что Фейнман раскрывает его предположение. И, хотя Гелл-Ман уверял Маршака в том, что не будет писать статью на тему V-A, слово свое он нарушил. В результате директор департамента физики столкнулся с ситуацией, когда два самых блестящих его ученых писали две статьи на одну и ту же тему. Это было неприемлемо, и он попросил их объединить усилия. Вопреки всем ожиданиям, они согласились.

По мнению физика Лоуренса Краусса, статья, которая из этого вышла, «была хаосом стилей, но, без тени сомнения,

важной работой». Она взяла лучшее от каждого: формализм Фейнмана при описании нейтрино и наблюдения Гелл-Мана относительно симметрий и величин, сохраненных в слабых токах. Бедный Сударшан: никто не знал, что отчасти и он приложил руку к созданию теории V-A. Два гения Калтеха охотно признавали свой разговор с Маршаком и Сударшаном; они также не отрицали, что взяли их идею. Но все-таки единственная статья, цитируемая впоследствии как классический эталон в данной области, принадлежала Гелл-Ману и Фейнману.

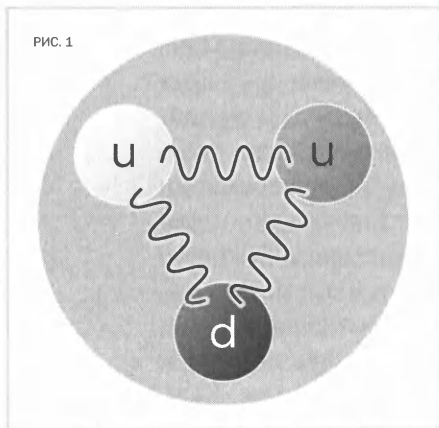
Однако речь шла не о полной теории. Полноценного сотрудничества в данном случае не получилось, можно было говорить лишь о браке по расчету, не продлившемся долго. Каждый из этих ученых следовал своим путем: Фейнман посвятил себя другим вопросам, очень удаленным от физики частиц, тогда как Гелл-Ман занимался работой, впоследствии ставшей его большим вкладом в науку и вознагражденной Нобелевской премией. В будущем Фейнман снова обратится к этой области физики, стремясь убедить своих коллег, что великое открытие Гелл-Мана — кварки — действительно существует.

ВНУТРЬ ПРОТОНА

Достаточно часто случается, что математика приходит на помощь другим наукам. В течение XIX века был создан и разработан раздел общей алгебры, посвященный классификации симметрий, собранных в группы: его называют теорией групп. Она определяет группу симметрий как совокупность всех изменений некоторой категории, результатом которых является неизменная величина. То, что с самого начала было лишь невероятно абстрактной теорией без какого-либо практического применения, в XX веке стало фундаментальным инструментом, необходимым для физики микромира.

В 1962 году Марри Гелл-Ман обнаружил (параллельно с Джорджем Цвейгом из Европейской организации по ядерным исследованиям в Женеве), что хаос частиц мог образоваться

РИС. 1



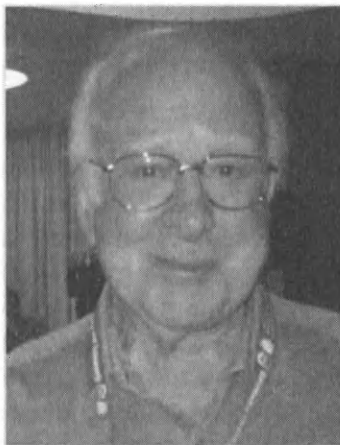
Внутренняя
структура
протона согласно
модели кварков
Гелл-Мана
(u: верхний
кварк; d: нижний
кварк).

согласно совокупности критериев, которую он окрестил «восьмеричный путь» — термин, заимствованный им из буддийской философии. Его теория предсказывала существование новой частицы Ω^- (омега минус). Она была открыта в следующем году, сначала в Брукхейвенской национальной лаборатории, а затем в ЦЕРН. Гелл-Ман и одновременно с ним Юваль Неэман изучали сильное взаимодействие, благодаря которому протоны и нейтроны остаются вместе внутри атомного ядра. Они оба открыли симметрию, очень пригодившуюся при описании сильного взаимодействия: группу Ли, названную в честь норвежского математика Софуса Ли. А более конкретно — группу унитарной симметрии $SU(3)$. Из этого открытия следовало существование более мелких частиц, входящих в состав протонов и нейтронов. Гелл-Ман дал им название *кварки* (рисунок 1). Согласно его теории, тяжелые частицы, такие как протоны, нейтроны или мезоны, состоят из этих мелких частиц, которые, что удивительно, имеют дробные электрические заряды, равные $1/3$ или $2/3$ от заряда электрона (он фундаментален сам по себе и не содержит никаких частиц). Другая неожиданность заключалась в том, что совокупность всех тяжелых частиц могла объясняться существованием трех семей, содержащих по два кварка каждая: up (верхний) и down (нижний), strange (странный) и charm (очарованный), top (истинный) и bottom (преlestный). Вместе с тем эта классификация позволяла предсказать существование других частиц, подобных Ω^- , которые еще не были открыты и открытие которых могло доказать верность данной гипотезы.

Тем не менее Гелл-Ман не был полностью убежден (или, по крайней мере, он не показывал этого на публике) в том факте, что его восьмеричный путь может быть чем-то большим, чем математическая хитрость для классификации частиц:

ХИГГС, ОТЕЦ ВСЕЙ МАТЕРИИ

Одна из величайших загадок физики частиц состоит в том, почему субатомные частицы имеют ту массу, которая у них есть. В 1960-х годах британский физик Питер Хиггс (родился в 1929 году) предлагает изящное решение данной проблемы. Во Вселенной существует поле, которое занимает все пространство, и когда частицы взаимодействуют с ним, они приобретают то, что кажется их массой. Для лучшего понимания физики обычно прибегают к следующей аналогии. Представим, что мы на голливудском приеме, и вдруг там появляется звезда первой величины. Те, кто находится около самой двери, подходят к ней, чтобы начать разговор, и собираются вокруг нее. По мере того как знаменитость перемещается по залу, стоящие вблизи приглашенные привлечены ею и подходят к ней; но когда звезда удаляется, они возвращаются к своим прерванным разговорам. Как следствие, на этом приеме молодой диве Голливуда труднее передвигаться по залу, чем если бы она была одна. К тому же ей тяжело снова начать передвижение после того, как она остановилась, чтобы ответить на вопросы. Все приглашенные ищут ее внимания. Этот эффект скопления людей вокруг кинозвезды соответствует механизму Хиггса.



Британский физик Питер Хиггс
в 2009 году.

Углубление

Важно отметить, что описанное выше соответствует, ни больше, ни меньше, функционированию того, что мы называем «масса». Речь идет не о весе тела, а о мере его инерции, массе. Именно таким образом мы воспринимаем это поле Хиггса, которое заполняет Вселенную и в котором находятся все частицы: частица, которая в нем перемещается, создает легкое искажение (приглашенные окружают диву при ее появлении), что сообщает ей массу. Элементарной частицей этого поля является так называемый «бозон Хиггса». В Женевском ЦЕРНе, как и в Чикагской Фермилаб, физики искали эту частицу в течение нескольких десятилетий, вплоть до 4 июля 2012 года, когда ЦЕРН объявил об открытии новой частицы, «соответствующей бозону Хиггса».

«Забавно размышлять о манере поведения кварков, если речь идет о физических частицах с определенной массой». Одним из главных возражений было то, что ни одна частица с массой меньше массы электрона не была открыта до сих пор. Таким образом, дискуссия вокруг этой темы оставалась актуальной.

В 1968 году Фейнман возвращается к физике частиц. Опыты, проведенные в адронных коллайдерах (адроны — термин, употребляемый для обозначения всех частиц, состоящих из кварков), приводят его к формулированию новой теории, согласно которой каждый адрон состоит из других более мелких частиц, названных им партонами. Фейнман осознанно отказался от дискуссии о том, существуют кварки на самом деле или они являются математической абстракцией. Он заявлял, что врач запретил ему дискуссировать о метафизике.

В этом же году в линейном ускорителе Стэнфорда высокоэнергичными электронами облучали протоны. Этот опыт напоминал тот, при помощи которого Резерфорд в 1911 году определил структуру атома. Целью эксперимента, проводимого в Стэнфорде, было установить, что протон не является единым и неделимым, но из чего-то состоит. Фейнман ездил в Стэнфорд в августе и октябре, и ему удалось убедить своих коллег, что его теория о партонах делает изучение структуры протона более легким.

В действительности кварки Гелл-Мана и партоны Фейнмана были дорогами, которые вели в одно место, и эти составляющие материи позволяли разработать теорию сильного взаимодействия. Однако никто не отдавал себе в этом отчета, несмотря на то что опыты, подобные стэнфордским, давали основание так думать. Поэтому Фейнман вместе с двумя студентами в 1970 году пустился в авантюру, намереваясь проверить всю систему элементарных частиц, чтобы выяснить, могут ли предположительно существующие кварки лежать в ее основе. Убедившись в этом, он превратился, по своим же словам, в «кваркователя».

Гелл-Ман не упускал случая посмеяться над партонами, называя их put-ons (можно перевести как «фальшивки», «глупые шутки»). Он ненавидел само название данных частиц, свя-

занное с английским словом part, то есть «часть». И если во время какого-либо семинара кто-то упоминал модель партонов Фейнмана, то Гелл-Ман тут же вскакивал и спрашивал, что это за модель. Он считал, что Фейнман крайне упростил его модель кварков. Гелл-Ман не видел, как Фейнман смог бы прийти к своим партонам способом, отличным от того, который использовал он сам: чтобы создать свои кварки, Гелл-Ман основывался на математическом понятии симметрии и на своей концепции мира. Фейнман же следовал своей собственной методологии, той, которую он использовал каждый раз, когда формулировал какую-либо теорию: в данном случае он смотрел, соответствовала ли предполагаемая структура адронов результатам производимых наблюдений.

Звездный час для модели кварков наступил в 1974 году. Был понедельник, 11 ноября: взволнованный Ричард Фейнман вел эмоциональную беседу со своим коллегой Харальдом Фричем в кулуарах департамента теоретической физики Калтеха. А в 800 километрах севернее, в линейном ускорителе Стэнфорда (SLAC), только что открыли частицу, вероятно являющуюся одним из кварков Гелл-Манна, — очарованный кварк.

Нанотехнология и общественная наука

Фейнман был не только блестящим физиком-теоретиком: он был провидцем. Именно он заложил основы нанотехнологии и посодействовал развитию этой увлекательной области. Находясь в составе комиссии, занимающейся расследованием катастрофы космического корабля «Челленджер», он вошел в число ученых-небожителей — самых востребованных и знаменитых. До его смерти оставалось всего два года...

В 1958 году Фейнман отправился в Женеву, чтобы присутствовать на конгрессе, посвященном слабому взаимодействию, а также для того чтобы встретиться с одной замужней дамой, супругой его коллеги из Калтеха. До этого, совсем недавно, он пережил разрыв отношений: другая женщина написала ему письмо, в котором говорилось, что все кончено и что он должен прислать ей 500 долларов. Видимо она пообщалась с некоторыми из его экс-возлюбленных (она указала несколько имен) и сообщила, что одна из них прислала ей анонимное письмо:

«Этот подлец Дик, этот бесчестный и гнусный Фейнман бывает с тобой на людях, но он никогда на тебе не женится. Скажи ему, что ты беременна. Ты выжмешь из него 300 или 500 долларов».

И в завершение бывшая подруга напоминала Фейнману, что принадлежавшая ему медаль Эйнштейна находится у нее.

Новой же возлюбленной Ричарда в Женеве не оказалось — она уехала и хотела увидеться с ним в Англии (мы не знаем, состоялась ли в итоге эта встреча). Стало быть, Фейнман проводил свое время в столице Швейцарии в одиночестве. Однажды, прогуливаясь по пляжу озера Леман, он разговаривал с 24-летней британкой Гвинет Ховарт, дочерью ювелира

из города Рипонден. Оставив скучную жизнь работника библиотеки в отдаленном районе графства Йоркшир, она решила посмотреть мир. Чтобы оплатить свои путешествия, девушка работала няней в тех городах, где она проживала. В это время в ее личной жизни присутствовало двое мужчин: профессиональный бегун на средние дистанции, который жил в Цюрихе, и оптик из Саарбрюккена, города на границе между Германией и Францией. Фейнман пригласил ее пойти этим вечером в ночной клуб. Должно быть, Гвинет ему очень понравилась, так как он предложил ей работать у него экономкой в Калифорнии. Девушка ответила ему, что подумает.

После конгресса Фейнман вернулся в Соединенные Штаты Америки, а Гвинет продолжила свое путешествие: она еще колебалась насчет поездки в Пасадену. В это время Фейнман предпринял необходимые шаги для того, чтобы ей позволили въехать на территорию Штатов. Один друг сказал ему, что он совершает безумие: как бы то ни было, но мужчина 40 лет, который пригласил женщину 24 лет жить с ним под одной крышей, мало за что может поручиться. Между тем вымогательница прислала Фейнману новое письмо, в котором сообщала, что она все рассказала своему мужу. Женщина чувствовала себя использованной и требовала у него еще большую сумму денег: «Ты, несомненно, очень умен в своей работе, но в своих личных отношениях ты идиот». Кроме того, она утверждала, что его медаль Эйнштейна «находится в надежном месте» так же, как и его томик «Рубай» иранского поэта Омара Хаяма, с цветными иллюстрациями, старательно выполненными рукой Арлин.

Фейнман написал шантажистке, предлагая встретиться и утверждая, что, несмотря ни на что, он был бы не против жениться на ней. Это воскресило в ней прекрасные воспоминания, которые она хранила об их встречах, в частности об их ночах под звездами в национальном парке Джошуа-Три. Но и прекрасные картины прошлого не погасили ее гнев, и она отказалась от встречи.

Далее Фейнман получил официальное письмо от ее мужа, в котором тот требовал компенсации: «Вы воспользовались

своим положением и своими деньгами, чтобы соблазнить молодую впечатлительную женщину и отдалить ее от мужа... Вы заранее строили постыдные планы относительно вашего отпуска... Мне кажется, что вы должны заплатить за удовлетворение ваших эгоистичных желаний». В конечном итоге он выставил ему счет в 1250 долларов, который Фейнман отказался оплатить. Он попытался успокоить взволнованного мужа. «Простите ее и сделайте ее счастливой», — писал он ему. Супруг грозил физику судебным процессом, но адвокат Фейнмана посоветовал ему забыть эту историю, так как подобная жалоба никогда не дойдет до суда. Последние строчки, написанные разочарованной возлюбленной, содержали следующее:

«Я надеюсь, что ты будешь счастлив со своей служанкой. Теперь ты все время будешь рядом с ней... Но что я не могу объяснить для себя, так это то, почему ты так сильно боишься брака».

В конечном итоге она вернула ему медаль и книгу. Гвинет приехала в Пасадену летом 1959 года. Она увидела там мужчину, обладающего пятью парами одинаковых туфель, серией синих костюмов от французских дизайнеров и белыми рубашками, которые он всегда носил с расстегнутым воротничком. У него не было ни радио, ни телевизора. Первое время Фейнман скрывал от всех, за исключением узкого круга друзей, присутствие молодой британки у себя в доме. Понемногу они начали вместе появляться на публике, даже если приезжали и уходили по отдельности с приемов и других мероприятий. Меньше чем через год Фейнман понял, что любит Гвинет и хочет на ней жениться. Он отметил галочкой один день в календаре, чтобы сделать ей предложение, но по мере того как эта дата приближалась, Фейнман становился все более и более нервным. Накануне вечером он не дал Гвинет уснуть до полуночи и тогда попросил ее выйти за него замуж. Они отпраздновали свою свадьбу 24 сентября 1960 года в отеле Huntingdon de Pasadena. Через два года у них родился первенец, сын Карл. Затем они удочерили Мишель. Кутила уступил место отцу семейства.

УЧИТЕЛЬ ДЛЯ УЧИТЕЛЕЙ

В 1961 году Фейнман употребил всю свою творческую энергию на различные исследовательские цели. Роберт Бэчер, директор департамента, который убедил Гелл-Мана и Фейнмана сотрудничать в исследовании слабого взаимодействия, решил усовершенствовать лекции по общей физике, которые были скучны и приводили в уныние студентов, отдаляя их от волнующих открытий. Сэндс предположил, что лучше всего с этой миссией справится Фейнман. В результате между 1961 и 1963 годами

ФИЗИКА X

В течение более чем 20 лет Фейнман читал удивительный курс лекций, предназначенный для студентов-первокурсников Калтеха, но даже докторанты и профессора приходили послушать его. Этот курс был окрещен «Физика X». Множество физиков вспоминали о нем как о самом интенсивном интеллектуальном опыте в своем образовании. Этот курс был бесплатным, и не было необходимости записываться, чтобы присутствовать на нем. Достаточно было прийти в маленькую аудиторию на цокольном этаже факультета в пятницу в 17.00. Некоторые объясняли такой выбор времени тем, что Фейнман хотел видеть лишь студентов, реально заинтересованных в изучении физики. «Самое чарующее в этом курсе то, что не было никакой программы», — вспоминает Марк Тюрнер, физик, который часто посещал Калтех в 1980-х годах. Фейнман просто приходил в аудиторию, брал мел и говорил: «Вопросы?» Любой вопрос был разрешен, и можно было в равной степени обсуждать как самые темные аспекты квантовой механики, так и физику флейты». По словам другого физика, Дэвида Адлера, который присутствовал на этом курсе в 1979 году: «Это была возможность для новых учащихся Калтеха задать вопросы Фейнману или просто слушать его байки». В частности, историю, согласно которой Фейнман, работая над проектом «Манхэттен», однажды ночью вскрыл сейф, чтобы доказать, что система безопасности, охраняющая его работу, оставляет желать лучшего. Однажды кто-то спросил у Фейнмана, как он умудряется помнить обо всех уравнениях, никогда не имея записей. Он с улыбкой ответил, что не знает их наизусть, но ему достаточно знать фундаментальные принципы, чтобы вывести из них необходимые уравнения. Таков был метод работы Фейнмана: он был основан на базовых принципах.

Ричард Фейнман составил два сборника лекций по элементарной физике для студентов-первокурсников Калтеха. Понимая, что стали свидетелями исторического события, эти студенты решили записать его выступление на кинокамеру и сфотографировать все, что он написал на доске.

Курс Фейнмана стал настоящим событием. Даже профессора и дипломированные студенты посещали его в поисках нового и мотивирующего подхода к «вечной» физике, начиная с основных принципов, что было характерно для метода работы Фейнмана. Оглядываясь назад, можно сказать, что эти занятия не очень подходили для студентов первого курса, скорее они предназначались для тех, кто уже владел некоторыми знаниями. Мэтью Сэндс, участвовавший в сборе и публикации данных лекций в виде книги, написал в прологе: «Это был подарок со стороны того, кто стал замечательным учителем для учителей».

Фейнман не являлся типичным преподавателем. Каждый день он встречал студентов с улыбкой, готовый предложить им абсолютно разную манеру изучения физики: не важно, шла ли речь о классической или квантовой механике, об электромагнетизме, о термодинамике или гидромеханике... Его лекции всегда были настоящим спектаклем, «руководством для озадаченных», как ему нравилось их называть, и он не хотел, чтобы пробелы в знаниях у студентов влияли на их понимание предмета.

Он никогда не заканчивал свое выступление словами «мы вернемся к этому завтра». Он устраивал нечто похожее на театральную пьесу, с прологом, развитием и эпилогом. В любом случае, это было слишком для студентов, только недавно поступивших в институт. Понемногу они покидали аудиторию, которая тут же заполнялась профессорами и дипломированными студентами, желающими изучать физику с помощью свежего, стимулирующего работу мысли способа. Лекции Фейнмана были записаны, расшифрованы и изданы в трех томах. В отличие от большинства учебников, «Фейнмановские лекции по физике» переиздаются до сих пор, и огромное количество студентов покупают их и начинают читать: это уже становит-

ся частью определенного ритуала, открывающего карьеру физика.

НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ

Факс от Вестерн Юнион, полученный 21 октября 1965 года в девять часов утра, уведомлял о внесении в список научного пантеона Фейнмана, Швингера и Томонаги: они получили Нобелевскую премию по физике за «их фундаментальную работу в квантовой электродинамике со значительными результатами для физики элементарных частиц». Опыт предыдущих нобелевских лауреатов говорил о том, что ученым следовало готовиться к глобальным переменам в их жизни. Такая перспектива совсем не нравилась Фейнману, который испытывал отвращение ко всему гламурному и пафосному. Он считал, что Нобелевский комитет должен был сначала наедине проинформировать будущих лауреатов, чтобы дать им возможность втихомолку отказаться от премии, не делая из этого события. Фейнман утверждал, что был не единственным, кто придерживался такого мнения: его кумир, Поль Дирак, разделял его точку зрения.

Нобелевская премия никак не изменила его личность: он продолжал интересоваться всеми аспектами физики и вел привычный образ жизни. Фейнман настолько не ценил полагающиеся ему почести и значительные посты, что поспорил на десять долларов с Виктором Вайскопфом, бывшим в то время директором ЦЕРНа, что в отличие от всех знаменитых ученых, он не будет занимать никакой руководящей должности ни в каком институте в течение следующих десяти лет. Не стоит и говорить о том, что Фейнман выиграл это пари.

Именно Фейнману мы обязаны великими открытиями, а я был словно пресс-секретарь при нем. И я был хорошо вознагражден за свою работу, потому что занял потрясающую должность в Институте [перспективных исследований в Принстоне], самую важную в моей жизни.
Мне не на что жаловаться.

**ЗАЯВЛЕНИЕ ФРИМЕНА ДАЙСОНА ПОСЛЕ ТОГО, КАК СТАЛО ИЗВЕСТНО, ЧТО ОН НЕ БЫЛ ВКЛЮЧЕН
В СПИСОК НОБЕЛЕВСКИХ ЛАУРЕАТОВ 1965 ГОДА**

Вручение Нобелевской пермии создателям КЭД не обошлось без небольшого скандала. Завещание Альфреда Нобеля уточняет, что премия может быть поделена максимум между тремя лауреатами. Таким образом, Фримен Дайсон оказался жертвой данного ограничительного условия. Некоторые усмотрели в этом глубокую несправедливость: Дайсон стал первым, кто опубликовал статьи, привлечшие внимание к формализму Фейнмана. Выступая в роли первопроходца, он помог всему миру понять КЭД. Тем не менее, если Дайсон и был раздосадован своим исключением из списка лауреатов Нобелевской премии, он никогда этого не показывал. Также можно добавить, что, по некоторым предположениям, имя Дайсона не вошло в список из-за того, что его вклад был принципиально математическим, а члены Нобелевского комитета математику не жалуют.

Любопытно, что в 1950-х годах Фейнман стал членом престижной Национальной академии наук (НАН). Он был избран тайным голосованием действующих академиков. Подобный статус рассматривался как один из самых почетных, который только мог получить американский ученый. Когда Фейнман получил Нобелевскую премию, он в течение пяти лет пытался покинуть НАН, так как, по его мнению, главной задачей академии было определить, кто достоин в нее войти, а кто — нет. «Мне психологически очень неприятно, что я должен судить «заслуги» других ученых». Мучаясь этой мыслью, он перестал упоминать членство в НАН среди своих отличий. Но такой долгожданный выход из Академии все не наступал: Фейнман

должен был терпеть еще пять лет, пока его исключение не подтвердили официально. Он также отказался от почетных званий (таких как почетный доктор наук), присвоенных университетами Чикаго и Колумбия, и отклонил множество других предложений с резкостью, которая удивила даже его секретаря, Хелен Трак, ответственную за прием посетителей. Фейнман находил утомительным то, что простое решение покинуть Академию заставляет его «кормить» всю прессу. Когда он захотел аннулировать свою подписку на журнал *Physics Today*, то получил длинное письмо от редактора, просившего его детально обосновать мотивы своего поступка. Ответ Фейнмана был следующим:

«Уважаемый Господин,
Я — не другие «физики»; я это я. Я не читаю ваш журнал и даже не знаю, что в нем публикуют. Возможно, он и хорош, я не знаю. Просто перестаньте мне его отправлять. Прошу вас вычеркнуть мое имя из перечня подписчиков. Мне нечего сказать о том, нужен он физиками или нет, желают они его читать или не желают... Я не собираюсь заставлять вас сомневаться в своем журнале и не предлагаю его больше не публиковать. Я только прошу вас больше мне его не присылать. Надеюсь, это возможно?»

Его самоизоляция от академической политики была практически абсолютной. Только в редких случаях Фейнман принимал участие в решениях департамента о приеме на работу профессоров или о политике оплаты труда. Многие его коллеги усматривали в этом эгоизм. Он сам называл себя «активно безответственным».

ТОЧНОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ

В декабре 1959 года Фейнман прочитал лекцию по случаю ежегодной встречи Американского физического общества, которая в том году проходила в Калтехе. Как всегда, он всех удивил, предлагая анализ множества новых возможностей, связанных

с физикой элементарных частиц. Фейнман начал свое выступление такими словами:

«Я хотел бы вам рассказать об одной области, в которой до сегодняшнего дня сделано было очень мало, но в которой можно, в принципе, достичь больших результатов. Еще важнее то, что эта область могла бы иметь широкий диапазон практического применения. Вопрос, который я хотел бы рассмотреть, касается обработки и контроля объектов очень маленьких размеров».

Его лекция, названная «Там, внизу, еще много места», оказалась отправной точкой для целого ряда областей науки и техники, известных сегодня под общим названием «нанотехнологии». До Фейнмана эксперты не слишком хотели рисковать, когда речь шла о сокращении размеров. Существо-

КОМПЬЮТЕР БУДУЩЕГО

Будущее информационных технологий связано с созданием квантового компьютера; некоторые из идей, относящихся к его разработке и эксплуатации, уже находят практические применения в настоящее время. Передача информации по квантовым каналам позволяет установить абсолютно надежную систему сообщения. Между 1982 и 1984 годами Чарльз Беннет и Жиль Брассард разработали первую систему квантовой криптографии в мире, BB84, сегодня вышедшую из употребления. Квантовая криптография гарантирует безопасность сообщения до такой степени, что перехват информации иностранным агентом в системе не только фиксируется между передатчиками, но «шпион», наряду с этим, не может расшифровать сообщение. На практике уже была осуществлена передача информации с помощью квантового канала через оптическое волокно на дистанцию нескольких десятков километров. И сегодня стоит вопрос о повторении подобного опыта на более длинные расстояния, в частности из земной лаборатории на борт самолета. Эта область быстро прогрессирует: за последние годы уже были созданы процессоры и мышки, основанные на квантовой информатике и оптике. 10 млрд атомов могут быть сейчас объединены в систему, что является необходимым в исчислении. Появилась сверхпроводниковая интегральная схема. А в апреле 2012 года был создан первый базовый квантовый компьютер на два кубита (или квантовых бита).

вал целый мир, заключенный в пространстве между обычными машинами и атомами. Используя это пространство, полагал ученый, мы не только изменим технологию, но и откроем новые области для научных исследований: «В 2000 году, во время подведения итогов, все спрашивали себя, почему до 1960 года никто серьезно не рассматривал движение в этом направлении».

Фейнман смотрел на вещи более широко, как это делали три корифея научной фантастики той эпохи: Артур Кларк, Айзек Азимов и Роберт Хайнлайн. Он не понимал, почему люди восхищались механизмом, способным записать «Отче Наш» на носитель размером с булавочную головку: это ничто. Для него стремиться нужно было к тому, чтобы записать всю Британскую энциклопедию на подобное устройство. И даже это было ничто. Почему не записать на него всю информацию, содержащуюся во всех книгах мира? Сделав любопытный предварительный расчет, Фейнман предположил, что это соответствовало бы 10¹⁵ бит информации (либо, по его мнению, 24 млн томов) и что каждый бит легко мог быть закодирован в кубе с ребром из пяти атомов либо, в общей сложности, немногим более чем из ста. Вся информация, собранная человечеством, будет содержаться тогда на «головке булавки». Фейнман делал ставку на тщательное изучение возможностей мира, который содержал материю, состоящую из атомов; для него не было ничего более увлекательного в исследовании, чем проектирование квантовых механизмов. «Ничего в законах физики, — говорил он, — не мешает изучать вещи атом за атомом». И его собственными словами:

«Я не боюсь задавать вопрос о том, смогли бы мы в будущем привести в порядок атомы для нашего удобства: настоящие атомы, те, что находятся внутри. И каковы бы были свойства материалов, если бы мы реально могли располагать атомы так, как нам заблагорассудится? Я не могу предугадать будущее, но не сомневаюсь в том, что если мы будем контролировать расположение микрообъектов, то у нас появится доступ к широкому спектру новых свойств, которые позволят нам многого достигнуть».

Можно было бы, в частности, использовать законы, управляющие квантовым миром, чтобы способствовать радикальному изменению компьютерных технологий. Квантовая информатика обрела популярность, что делало эту утопию все более реальной. В 1981 году Фейнман сам организовал в Калтехе курс по теории расчетов и будущему информатики. Затем он опубликовал несколько статей о квантовых компьютерах. Это становится вызовом для будущих лет, стоящим затраченного труда. Вот пример: факторизация целых чисел (на основе которой устроено шифрование наших кредитных карточек) может занять несколько миллионов лет для обычного компьютера; квантовый компьютер справится с этим за долю секунды.

Но Фейнман на этом не остановился. Он также предчувствовал, что этот путь приведет к новым возможностям в биологии. Только за три года до этого была открыта структура молекулы ДНК:

«В принципе, физик может синтезировать любую молекулу, которую ему нарисует химик. Физик получает инструкции, затем синтезирует молекулу. Но как он это делает? Он располагает атомы в предварительно указанном химиком месте. Именно таким образом мы создаем вещество».

Правда, в этом случае Фейнман заглянул в будущее недостаточно далеко. Начиная с последней четверти XX века на основе данной теории появилась новая область науки: многообещающая синтетическая биология. Этот термин был придуман в 1974 году польским генетиком Вацлавом Шибальским, когда он написал: «До сегодняшнего дня мы работали над описательной фазой молекулярной биологии... Но настоящее преодоление трудностей начнется, когда мы вступим в фазу синтетической биологии. Тогда мы откроем новые элементы управления и присоединим их к существующим геномам или разработаем совсем новые геномы». Эта комбинация биохимии и генетики поднимает два вопроса, которые вот-вот должны быть выяснены: каково минимальное число генов, необходимых для жизни? Возможно ли создать живое существо с нуля?

ЧТО ЕСТЬ НАУКА?

Одна из недостоверных цитат, приписываемых Фейнману, гласит: «Исключение, которое подтверждает правило, — это ложь. Таков принцип науки: если существует исключение в каком-либо правиле и если оно может быть проверено путем наблюдений, тогда это правило ложное». Фейнман был влюблен в науку и придавал большое значение методам ее изложения. Когда ему предложили оценить школьные учебники, используемые в американских школах, он очень экспрессивно выразил свой гнев:

«Все это написано людьми, которые не имеют ни малейшего представления, о чем говорят... Как вы хотите правильно преподавать, используя эти книги, авторы которых не понимают ни единого слова в том, что рассказывают?»

Во время 15-й ежегодной встречи Национальной ассоциации преподавателей естественных наук, созданной в 1966 году, Фейнман прочитал свою знаменитую лекцию, посвященную своим воззрениям на науку. В этот день он противопоставил взгляды Уильяма Гарвея, врача, который детально описал систему кровообращения (обаятельный человек, вспыльчивый и чрезмерно дотошный), взглядам Фрэнсиса Бэкона, лорда-канцлера, отца эмпиризма и центральной фигуры в развитии научного метода:

«Один из великих ученых-экспериментаторов своего времени, который действительно что-то делал, Уильям Гарвей, говорил, что высказывания Бэкона о науке соответствуют той науке, которую практиковал лорд-канцлер. В своих комментариях Бэкон опускает главный фактор, а именно необходимость понять, что нужно наблюдать и на что нужно обратить внимание. Вот это и есть наука, а не то определение, которое ей дают философы».

Фейнман защищал прагматические научные знания, а не описательные. Свою автобиографию он начал с рассказа

о своей детской страсти к экспериментам в «лаборатории» — старой упаковочной коробке, которую он оснастил полочками. Он также рассказало о своем таланте к починке сломанных радиоприемников. Его достижения в физике заставляют признать, что на протяжении всей своей жизни Фейнман оставался верным этому способу изучения науки. Его не интересовали знания как таковые. Скорее, по словам писателя Джеймса Глейка, ему был интересен способ их получения: «Как посчитать свет, излученный возбужденным атомом? на что обратить внимание в экспериментальных данных? как сделать предположение? как создать новые инструменты, адаптированные для новых элементарных частиц, которые стали известны физикам?»

Однако не стоит забывать фундаментальный аспект, выделенный Фейнманом: «Нужно напоминать о значении науки детям по всему миру, и не только потому, что это сделает из них

ЛОЖНОЕ ПОНЯТИЕ О НАУКЕ

В нашем обществе существует неправильное восприятие науки. Для большинства из нас это просто черный ящик, из которого мы черпаем решения технических или медицинских проблем. Многие не понимают, что наука — не только источник знаний, но в первую очередь — способ мыслить. Это представление мы потеряли, возможно, по причине технического прогресса. Вот почему нередко можно услышать: «Наука не может все объяснить». Фейнман предупреждал нас: произнося «Наука учит нас этому и этому», мы говорим неправильно. Наука ничему нас не учит, в отличие от опыта. На фразу «Наука научила меня тому-то и тому-то» можно было бы возразить: «Как она этому научила? Как ученые сделали это? Каким способом?» Наука учится на своих собственных ошибках. И она страдает от странной репутации в нашем обществе. Мы ждем от нее, что она ответит четко на любой вопрос; мы ждем от нее правды. Однако мы нигде не находим большего, чем «возможно», «может быть». «То, что мы сегодня называем научными знаниями, — говорил Фейнман, — это набор формулировок, правильных с разной степенью вероятности. Некоторые из них очень надежные; другие — почти надежные; но нет ничего абсолютно точного. Ученые к этому уже привыкли. Мы знаем, что возможно жить, не зная».

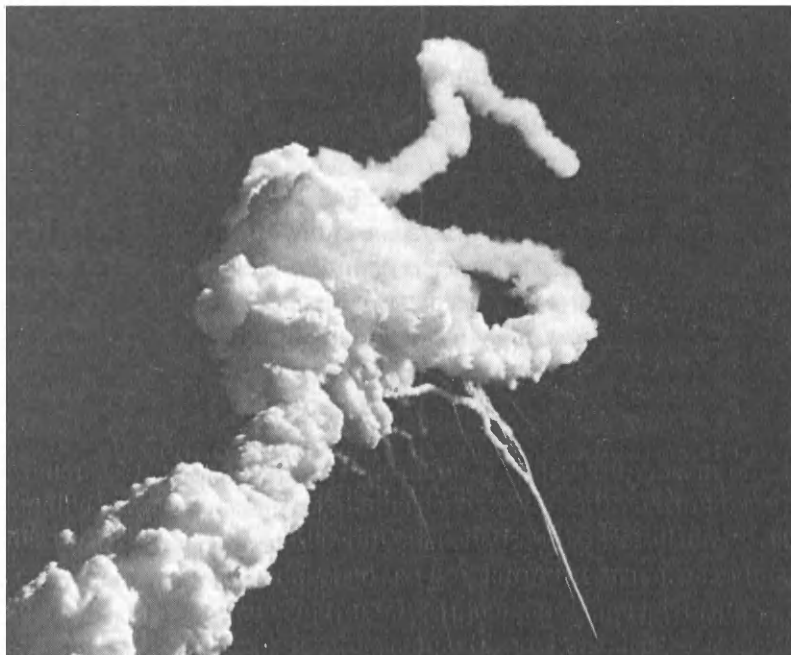
порядочных граждан или поможет им контролировать природу». О каком значении идет речь? Физик говорил:

«Видение мира, которое нам дает природа, имеет свое значение. Есть красота в чудесах природы, которую мы открываем как результат новых опытов [...]. Мир выглядит иначе, когда занимаешься наукой. Деревья, например, в первую очередь — порождения воздуха. Сгорая, они снова становятся воздухом... В пепле содержится то, что участвовало в жизни дерева, но было взято из земли, а не из воздуха. Это прекрасно, и наука наполнена подобной красотой. Она нас вдохновляет, и мы можем использовать это вдохновение, чтобы заразить им других людей».

Тот, кто пьет из колодца познания, никогда не перестанет этого делать. «Корни познания горьки, — говорил Аристотель, — но плоды его сладки». Не нужно быть слишком умным, чтобы это понимать. Достаточно использовать «маленькие серые клеточки», как выражался бельгийский детектив Эркюль Пуаро. И Ричард Фейнман знал, как их использовать с максимальной отдачей.

ПРОЩАЙ, ДИК

Последние десять лет своей жизни Фейнман посвятил изучению нравов и обычаев азиатских кочующих племен Тувы, маленькой автономной республики бывшего Советского Союза на границе с Монголией. Также он принял участие в расследовании, которое позволило выяснить причину гибели космического корабля «Челленджер» в 1986 году, после чего ученый стал знаменитостью. Фейнман предал огласке причину катастрофы и то, как работники НАСА проигнорировали рекомендации экспертов: когда они оценили риск катастрофы в полете как 1 из 100 000, специалисты получили результат 1 из 200. И Фейнман был полностью согласен со специалистами.



ВВЕРХУ:
Фотография взрыва космического корабля «Челленджер» 28 января 1986 года.

ВНИЗУ:
Ричард Фейнман (второй ряд, первый справа) появляется на публике в последний раз в феврале 1986 года, во время работы в комиссии по расследованию причин гибели космического корабля «Челленджер».



Часы космического корабля, который идет со скоростью света, замедлятся, как и мозговая активность пилота.

Ричард Фейнман. «Природа физики» (1965)

В окончательный отчет комиссии, расследовавшей гибель шаттла, пришлось включить замечания Фейнмана, в противном случае он отказывался его подписать. Ученый был возмущен: эта ужасная катастрофа, случившаяся из-за нарушения герметичности уплотнителя твердотопливного ускорителя, была полностью на совести НАСА. Резиновый уплотнитель потерял эластичность из-за низкой температуры воздуха ночью накануне старта. Затвердев, он больше не мог обеспечивать герметичность ускорителя, и пламя вырвалось наружу. В течение двух лет инженеры привлекали внимание своего руководства к ненадежности резиновых уплотнений в ускорителях. Накануне старта они снова предупредили об опасности, на этот раз в связи с низкой температурой воздуха. Но чиновники НАСА опасались урона для имиджа своей организации и не обращали внимания на все технические моменты. Поэтому Фейнман завершил свой отчет такими словами:

«Для того чтобы технология имела успех, нужно, чтобы реальность преобладала над общественными отношениями; нельзя обмануть природу».

После официальной церемонии в Белом доме Фейнман вернулся к себе домой, чтобы умереть, и он это понимал. Весной 1984 года он почувствовал неладное. Был случай, когда ученый надел пиджак и галстук, чтобы лечь спать, а как-то он потратил 45 минут для того, чтобы найти свою машину, припаркованную напротив дома... Однажды, выходя после лекции, он заметил, что невнятно разговаривает. Обследование выявило кровоизлияние в мозг. Он был в срочном порядке прооперирован.

В конце 1970-х Фейнман лечился от рака. В октябре 1987 года болезнь вернулась. Врачи решили попытаться

в последний раз облучить рак. Истощенный, Фейнман потерял аппетит. Врачи интенсивной терапии нашли еще и прободную язву; также они обнаружили, что единственная почка, которая у него оставалась, начинала отказывать. Диализ почти не помогал, и Фейнман отказался дальше использовать его для продолжения своей жизни. Он сказал своей дочери Мишель «Я скоро умру», как если бы он сказал «Это уже решено». Назначение морфина и кислорода было его единственной уступкой паллиативной медицине. Врачи сказали, что ученому оставалось прожить пять дней. Понемногу он терял сознание. Чтобы говорить, ему приходилось прикладывать сверхчеловеческие усилия. Его последние слова, которые он, видимо, приготовил заранее, были обращены к Гвинет: «Я не хотел бы умереть дважды. Это так раздражает». Незадолго до полуночи, 15 февраля 1988 года, Ричард Филипп Фейнман покинул этот мир в возрасте 69 лет.

Сталкиваясь со смертью, мы, люди, не ищем правильных ответов, а ищем те, которые нас утешают. Мы нуждаемся в уверенности, чтобы жить, — уверенности реальной или вымышленной, которая скрасит агонию смерти. Фейнман был иного мнения:

«Я могу жить в сомнении и неуверенности, не зная чего-то. Я думаю, что более интересно жить так, чем иметь ответ, способный стать ошибочным. У меня есть приблизительные ответы и разной степени уверенность относительно многих вещей, но полностью я ни в чем не уверен... Я не боюсь игнорировать возможность, потеряться в таинственной Вселенной без какой-либо цели. Это меня не пугает».

Таков был Фейнман.

На следующий день после его смерти двое студентов забрались на крышу библиотеки Калтеха и вывесили транспарант с надписью: «Мы тебя любим, Дик».

Список рекомендуемой литературы

- FEYNMAN, R.P., *Qu'en pensez-vous monsieur Feynman ? Lettres 1939-1987*, Paris, Dunod, 2006.
- *Vous voulez rire, monsieur Feynman !*, Paris, Odile Jacob, 2000.
 - *What Do You Care What Other People Think ?*, New York, W. W. Norton & Company, 1988.
 - *Quantum Electrodynamics*, Boulder, Westview Press (Coll. Advanced Book Classics), 1998.
 - *Le Cours de physique de Feynman* (5 volumes), Paris, Dunod, 1999.
 - *La Nature de la physique*, Paris, Seuil (Coll. Points), 1980.
- GAMOW, G., *Biography of Physics*, New York, Dover Publications, 1988.
- GELL-MANN, M., *Le Quark et le Jaguar : Voyage au cœur du simple et du complexe*, Paris, Flammarion (Coll. Champs), 1988.
- GREENE, B., *The Elegant Universe : Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, New York, W. W. Norton & Company, 1999.
- GRIBBIN, J., *In search of SUSY : Supersymmetry and the Theory of Everything*, London, Penguin, 1998.
- *Science : A History, 1543-2001*, London, Penguin, 2002.
 - *Le Chat de Schrödinger : Physique quantique et réalité*, Paris, Flammarion (Coll. Champs), 2009.
- HOOFT, G., *Partículas elementales*, Barcelone, Drakontos, 2008.
- KRAGH, H., *Quantum Generations : A History of Physics in*

- the Twentieth Century*, Princeton, Princeton University Press, 1999.
- NAVARRO FAUS, J., *Los caminos cuánticos. Feynman*, Madrid, Nivola, 2007.
- ROSENBLUM, B. et KUTTNER, F., *Quantum Enigma : Physics Encounters Consciousness*, New York, Oxford University Press, 2011.
- TERESI, D. et LEDERMAN, L., *The God Particle : If the Universe Is the Answer, What Is the Question ?*, New York, Dell Publishing 1993.
- YNDURAIN, F.J., *Electrones, neutrinos y quarks*, Barcelone, Crítica, 2001.

Указатель

- Азимов, Айзек 33, 159
амплитуда вероятности 63, 65
антисемитизм 35
- Белл, Мари Луиз 117–118
бесконечные величины 12, 56,
77, 86–89, 95, 98, 100, 110
Бете, Ханс 35, 41, 71–74, 76,
79, 81, 84, 93–97, 102, 107,
108, 111
биология синтетическая 161
бомба атомная 16, 41, 43, 45,
46, 67, 69, 71, 74, 84, 90
Бор, Нильс 8, 24–26, 48–50, 70,
92, 96, 99, 103, 118
- взаимодействие
сильное 131, 133, 134, 143,
144, 146
слабое 13, 16, 129, 133, 134,
139–142, 151, 153
виртуальные частицы 55, 56,
87–89, 102, 104
волновая функция 30, 61–63,
126
- Вторая мировая война 16, 45,
67, 68, 77, 107
вторичное квантование 54, 86
*«Вы, конечно, шутите, мистер
Фейнман!»* 7, 16
- Гарвард 42, 82, 95, 100, 108,
110, 132
Гейзенберг, Вернер 8, 26, 27,
33, 47, 48, 56, 86–89, 98, 121
Гелл-Ман, Марри 8, 10, 13, 16,
94, 129, 132–134, 139–144,
146, 147, 153
Гринбаум, Арлин 7, 11, 16, 59,
60, 66–71, 73, 74, 76, 79,
152
болезнь 7, 16, 65, 66, 67,
73–74
смерть 7, 16, 76, 79, 108, 117
- Дайсон, Фримен 16, 106–111,
132, 156–157
двойная щель 27–32, 63
де Бройль, Луи 21, 25, 26, 30,
31, 47

- диаграммы Фейнмана 9, 13, 16,
 103–105, 110, 113, 125,
 139
 Дирак, Поль Адриен Морис
 27, 36, 47–51, 54, 55, 64, 65,
 81, 85–86, 90, 92, 93, 95, 96,
 98, 99, 104, 107, 141, 156
 дуализм волна-частица 28

 заряд 50, 51, 53–58, 87, 88, 96,
 104, 131, 134, 144
 заряд y 134

 Институт перспективных
 исследований,
 см. Принстон
 интегралы по траекториям 70,
 95, 110, 122, 128, 141

 Калифорнийский
 технологический институт
 7, 8, 9, 94, 113, 115, 116, 132,
 135, 139, 143, 147, 151, 154,
 156, 158, 160, 167
 квант 22, 54
 квантовая гидродинамика
 121–125
 квантовая электродинамика
 (КЭД) 1016, 47, 54–56, 64,
 69, 77, 88–90, 93, 95–100,
 102, 108–111, 132, 156
 квантовый компьютер 159, 160
 кварки 8, 13, 143, 144, 146, 147
 конденсат Бозе — Эйнштейна
 122–124
 копенгагенская интерпретация
 70
 Корнелл 7, 16, 72, 79, 82, 84, 94,
 107–109, 115, 117

 Ландау, Лев 119, 120, 121, 125,
 128

 Лос-Аламос 7, 71, 73–76, 79,
 81, 84, 85, 108, 115, 154
 Массачусетский
 технологический институт
 (МТИ) 7, 16, 32–36, 42, 56,
 60, 81, 82, 127, 132

 нанотехнология 16, 149, 158
 Нётер, Эмми 138
 нарушение четности 139–141

 партоны 146–147
 Паули, Вольфганг Эрнст 49,
 56, 87, 98
 перенормировка 89, 94–95,
 102, 108, 109
 позитроны 51, 52, 87, 88, 100,
 101, 103, 105
 Поконо, горы 16, 96, 97, 99,
 102, 103, 105
 поле 36, 50, 52–57, 86, 87, 90,
 92, 96, 101, 110, 140, 145,
 146
 поляризация вакуума 87
 премия Нобелевская 8, 10, 15,
 16, 36, 45, 48, 56, 72, 77, 90,
 132, 135, 140, 143, 155, 156,
 157
 Принстон 7, 32, 42, 43, 45, 46,
 60, 64, 65, 66, 68, 81, 84–86,
 99, 108, 132, 156
 принцип наименьшего
 действия 39, 40, 61, 64, 69,
 70, 93
 принцип наименьшего
 времени 38
 принцип неопределенности 33,
 47, 56, 89, 99, 121, 126
 пятый Сольвеевский конгресс
 48, 90

Раби, Исидор Айзек 80, 81, 90,
92, 96
Резерфорд, Эрнест 23–25, 46,
57, 146
рождение и аннигиляция пары
105

сверхпроводимость 120
сверхтекучесть 13, 16, 113,
119–121, 125, 127–128
свет 12, 22–25, 28, 29, 31, 36–
39, 47, 54, 58, 64, 86, 88, 90,
162, 164

Силард, Лео 45, 46
симметрия 136–138, 142, 143,
147
собственная энергия
электрона 56, 87, 92, 93, 95
сопротивление излучения 57
странность 133–135

«Там, внизу, еще много места»
158
теория возмущений 87, 88, 127
«Теория позитронов» 106
Томонага, Синъитиро 13, 16,
98–100, 102, 103, 109, 155

Уилер, Джон Арчибальд 43,
46, 47, 57–61, 64, 69, 73, 101,
102
уравнение Клейна — Гордона
36, 49

Фейнман
в Бразилии 7, 11, 113, 115–
118, 141

депрессия 82–85
интуиция 8, 13, 14, 15, 84,
97, 111
«Молекулярные силы» 41
отношения 11, 83, 151
родители 14, 20, 76, 80, 81,
82
смерть 8–10, 14, 16, 20, 83,
149, 166–167

«Фейнмановские лекции по
физике» 9, 16, 154–155
фон Нейман, Джон 70, 96

Хиггс, Питер 145
Ховард, Гвинет 7, 11, 16, 151–
153, 166

«Челленджер» 14, 16, 149,
164–166
четность 136–141
«Что есть наука?» 13

Швингер, Джулиан 13, 15, 16,
80–82, 91, 93, 95–100, 102,
106, 108–110, 132, 155
Шелтер, остров 90–92, 96, 107,
112

Эйнштейн, Альберт 8, 12, 21–
26, 32, 35, 36, 42, 45, 47, 48,
67, 70, 80, 121–124, 151, 152
электрон 12, 16, 21, 23–27,
29–32, 36, 48–52, 54–59,
70, 77, 81, 85–89, 92, 93, 95,
100–107, 110, 119, 120,
125, 134, 139, 140, 141, 144, 146

Наука. Величайшие теории
Выпуск № 6, 2015
Еженедельное издание

РОССИЯ

Издатель, учредитель, редакция:
ООО «Де Агостини», Россия
Юридический адрес: Россия, 105066,
г. Москва, ул. Александра Лукьянова,
д. 3, стр. 1

*Письма читателей по данному адресу
не принимаются.*

Генеральный директор: Николаос Скилакис
Главный редактор: Анастасия Жаркова
Выпускающий редактор:
Людмила Виноградова
Финансовый директор: Полина Быстрова
Коммерческий директор: Александр Якутов
Менеджер по маркетингу: Михаил Ткачук
Младший менеджер по продукту:
Ольга МакГро

**Для заказа пропущенных выпусков
и по всем вопросам, касающимся информа-
ции о коллекции, обращайтесь по телефону
бесплатной горячей линии в России:**

☎ 8-800-200-02-01

**Телефон «горячей линии» для читателей
Москвы:**

☎ 8-495-660-02-02

Адрес для писем читателей:
Россия, 600001, г. Владимир, а/я 30,
«Де Агостини», «Наука. Величайшие
теории»

*Пожалуйста, указывайте в письмах свои кон-
тактные данные для обратной связи (теле-
фон или e-mail).*

Распространение: ООО «Бурда Дистрибью-
шен Сервисиз»

Свидетельство о регистрации СМИ в Феде-
ральной службе по надзору в сфере связи, ин-
формационных технологий и массовых ком-
муникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-
56146 от 15.11.2013

УКРАИНА

Издатель и учредитель:
ООО «Де Агостини Пабблишинг», Украина
Юридический адрес:
01032, Украина, г. Киев, ул. Саксаганского,
119

Генеральный директор: Екатерина Клименко

**Для заказа пропущенных выпусков
и по всем вопросам, касающимся информа-
ции о коллекции, обращайтесь по телефону
бесплатной горячей линии в Украине:**

☎ 0-800-500-8-40

Адрес для писем читателей:
Украина, 01033, г. Киев, а/я «Де Агостини»,
«Наука. Величайшие теории»
Україна, 01033, м. Київ, а/с «Де Агостіні»

Свидетельство о регистрации печатного
СМИ Государственной регистрационной
службой Украины
КВ № 20525-10325Р от 13.02.2014

БЕЛАРУСЬ

Импортер и дистрибьютор в РБ:
ООО «Росчерк», 220037, г. Минск,
ул. Авангардная, 48а, литер 8/к,
тел./факс: + 375 (17) 331 94 41
Телефон «горячей линии» в РБ:
☎ + 375 17 279-87-87
(пн-пт, 9.00–21.00)

Адрес для писем читателей:
Республика Беларусь, 220040, г. Минск,
а/я 224, ООО «Росчерк», «Де Агостини»,
«Наука. Величайшие теории»

КАЗАХСТАН

Распространение:
ТОО «КГП «Бурда-Алатау Пресс»

Издатель оставляет за собой право изменять
розничную цену выпусков. Издатель остав-
ляет за собой право изменять последователь-
ность выпусков и их содержание.

**Отпечатано в соответствии
с предоставленными материалами
в типографии: Grafica Veneta S.p.A
Via Malcanton 2
35010 Trebaseleghe (PD) Italy**

Формат 70 x 100 / 16.

Гарнитура Petersburg

Печать офсетная. Бумага офсетная.

Печ. л. 5,5. Усл. печ. л. 7,128.

Тираж: 99 000 экз.

© David Blanco Laserna, 2012 (текст)

© RBA Coleccionables S.A., 2013

© ООО «Де Агостини», 2014–2015

ISSN 2409-0069



Данный знак информационной про-
дукции размещен в соответствии с требова-
ниями Федерального закона от 29 декабря
2010 г. № 436-ФЗ «О защите детей от ин-
формации, причиняющей вред их здоровью
и развитию».

Коллекция для взрослых, не подлежит обя-
зательному подтверждению соответствия
единым требованиям установленным Тех-
ническим регламентом Таможенного союза
«О безопасности продукции, предназна-
ченной для детей и подростков» ТР ТС 007/2011
от 23 сентября 2011 г. № 797

Дата выхода в России 10.02.2015

Ричард Фейнман считается не только одним из самых значительных физиков XX века, но и одной из самых завораживающих и уникальных фигур современной науки. Этот ученый внес огромный вклад в изучение квантовой электродинамики — основной области физики, исследующей взаимодействие излучения с веществом, а также электромагнитные взаимодействия заряженных частиц. Кроме того, он широко известен как преподаватель и популяризатор науки. Яркая личность Фейнмана и его сокрушительные суждения вызывали как восхищение, так и враждебность, но несомненно одно: современная физика не была бы такой, какой она является сегодня, без участия этого удивительного человека.

ISSN 2409-0069



00006



Scan: Gencik

9 772409 006990