1967 г. Январь *Том 91, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1965 г. *)

Благодаря любезности Нобелевского комитета, приславшего препринты лекций Нобелевских лауреатов по физике 1965 г., редакция имеет возможность опубликовать полные тексты этих выступлений. Кроме того, редакция сочла полезным присоединить к этим лекциям небольшую заметку Ф. Дайсона, посвященную присуждению Нобелевских премий за работы в области квантовой электродинамики Р. Фейнману, Ю. Швингеру и Син-Итиро Томонаге.

530 145

РАЗВИТИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ТРАКТОВКИ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ **)

Р. Фейнман

У нас вошло в привычку писать научные статьи так, чтобы они имели по возможности завершенный вид; в них не остается никаких следов тех тупиков, в которые мы попадали, никаких намеков на те ошибочные идеи, с которых мы начинали и т. д. Поэтому просто негде рассказать о том, что было проделано прежде, чем была начата та или иная работа, хотя некоторый интерес к таким статьям в те времена наблюдался. Поскольку присуждение премии это факт сугубо персональный, я решил, что в данной ситуации меня можно извинить, если я расскажу о моих личных взаимоотношениях с квантовой электродинамикой, и не буду обсуждать этот предмет в том улучшенном и законченном виде, каким он предстает сейчас. Кроме того, премия по физике присуждается сразу трем лицам. Если все трое начнут рассказывать о квантовой электродинамике, то эта тема может стать утомительной. Поэтому я бы хотел рассказать вам сегодня о той последовательности идей, которые возникали у меня, и на основе которых я, наконец, добрался до другого конца этой загадочной проблемы. Именно за это мне в конечном счете и присуждена премия.

Я понимаю, что настоящая научная статья имела бы большее значение, однако такую статью можно опубликовать в обычных журналах. Поэтому я воспользуюсь этой Нобелевской лекцией, чтобы сделать нечто меньшее, но сделать это в другом месте я не могу. Я прошу извинить меня и за то, что я приведу некоторые эпизоды из жизни, которые не существенны ни с научной точки зрения, ни для понимания

---

*) Copyright C the Nobel Foundation, 1966.

**) R. P. Feynman, The Development of the Space-Time View of Quantum Electrodynamics, Nobel Lecture, December 11, 1965. Preprint les Prix Nobel en 1965. The Nobel Foundation. Stockholm, 1966. Перевод И. М. Дрёмина.

развития идей. Они включены только для того, чтобы сделать лекцию более занимательной.

Я работал над проблемой около восьми лет и наконец опубликовал свои работы в 1947 г. Работа была начата в Массачузетском технологическом институте (*M.I.T.*), где я был студентом и изучал хорошо известные вещи; постепенно я изучал все проблемы, которые занимали людей, и в конце концов понял, что основной проблемой физики того времени было то, что квантовая теория электричества и магнетизма оказалась не вполне удовлетворительной. Это я почерпнул из учебников вроде книг Гайтлера и Дирака. Меня вдохновили некоторые замечания в этих книгах; это были замечания не в тех частях книги, где все было доказано, аккуратно изложено и вычислено, потому что как раз эти части я не мог понять достаточно хорошо. В моем юном возрасте я мог понять лишь замечания о том, что все это не решает основной проблемы. Последнюю фразу в книге Дирака я помню до сих пор: «Кажется, что здесь необходимы некоторые существенно новые физические идеи». Это было для меня одновременно и вызовом, и вдохновением. У меня самого создалось ощущение, что поскольку физики не нашли удовлетворительного ответа на вопрос, который меня заинтересовал, мне не следует уделять слишком много внимания тому, что они фактически сделали.

Из книг я, однако, понял, что источником трудностей квантово-электродинамических теорий служили два обстоятельства. Первым была бесконечная энергия взаимодействия электрона с самим собой. Эта трудность появлялась уже в классической теории. Другая трудность вытекала из некоторых бесконечностей, которые были обусловлены бесконечным числом степеней свободы поля. Как я представлял себе в то время (насколько я могу судить об этом сейчас), эта трудность была связана просто с тем, что если проквантовать гармонические осцилляторы поля (скажем, в «ящике»), то энергия основного состояния каждого осциллятора равна $\hbar\omega/2$; однако число мод для каждой возрастающей частоты ω в «ящике» бесконечно, а потому полная энергия тоже будет бесконечной. Теперь-то я понимаю, что такая постановка основной проблемы не была абсолютно верной; она могла быть просто решена изменением начала отсчета энергии. Во всяком случае, я верил, что окончательная трудность вытекала каким-то образом из комбинации действия электрона на самого себя и бесконечного числа степеней свободы поля.

Мне казалось совершенно очевидным, что мысль о том, что частица воздействует сама на себя, что электрические силы действуют на ту же самую частицу, которая порождает их, не является необходимой,— на самом деле, это даже глупая идея. А потому я решил предположить, что электроны не могут действовать сами на себя, а лишь взаимодействуют с другими электронами. Но это означает, что поле вообще не существует. Действительно, если вклад всех зарядов приводит к образованию одного общего поля, и если это общее поле обратно воздействует на все заряды, то тогда заряд вновь должен воздействовать сам на себя. Итак, тут-то и крылась ошибка — не было никакого поля. Оставалось только считать, что если заставить один заряд колебаться, то другой заряд начнет колебаться позже. Существовало прямое воздействие зарядов, хотя и с некоторым запаздыванием. Выражение силы, связывающей движение одного заряда с движением другого, должно было содержать это запаздывание. Потрясите один заряд, другой начнет колебаться позже. Атом Солнца колеблется; электрон в моем глазу начинает колебаться восемь минут спустя вследствие прямой передачи взаимодействия.

Эта идея привлекательна тем, что она одновременно решает обе проблемы. Во-первых, можно немедленно сказать: я не позволяю элек-

трону действовать самому на себя, я только разрешаю электронам воздействовать друг на друга; следовательно, никакой собственной энергии нет! Во-вторых, нет бесконечного числа степеней свободы у поля. Да и вообще никакого поля нет. Если вы настаиваете на идеях, подобных идее о поле, то это поле полностью определено действием тех частиц, которые порождают это поле. Вы трясете одну частицу, она заставляет колебаться другую. Но если вы хотите мыслить в полевых представлениях, то поле (если оно существует) будет полностью определено веществом, которое порождает его; поэтому поле не имеет каких-либо независимых степеней свободы, и все бесконечности, обусловленные степенями свободы поля, можно будет устранить. Действительно, когда мы видим свет, мы всегда можем «увидеть» какой-то вещественный источник света. Мы никогда не видим «сам» свет (если не принимать во внимание тот факт, что недавно были приняты радиосигналы, материальный источник которых неясен).

Итак, вы видите, что мой основной план состоял в том, чтобы сначала решить классическую проблему. Этим я бы избавился от бесконечных собственных энергий в классической теории. Затем оставалось надеяться на то, что все будет столь же чудесно и тогда, когда я построю на этой основе и квантовую теорию.

Это было начало. Идея казалась мне столь очевидной и красивой, что я страстно влюбился в нее. Но, подобно любви к женщине, страсть возможна лишь до тех пор, пока вы знаете о любимой не слишком много, пока вы еще не поняли ее недостатки. Эти недостатки выясняются позже, однако тогда любовь будет уже достаточно сильна, чтобы удержать вас. Так я оказался привязанным моим юношеским энтузиазмом к этой теории, несмотря на все трудности, связанные с ней.

Затем я попал в аспирантуру и в это время понял, в чем была ошибочность идеи о том, что электрон не действует сам на себя. Когда электрон ускоряют, он излучает энергию, и надо проделать дополнительную работу, чтобы восполнить эту энергию. Добавочная сила, против которой совершается эта работа, называется силой реакции излучения. Возникновение этой добавочной силы в те дни описывалось, следуя Лоренцу, как действие самого электрона. Один член в этом действии, самодействие электрона, приводил к члену инерциального вида (который был не вполне удовлетворителен с релятивистской точки зрения). Однако этот «инерционный» член обращался в бесконечность в случае точечного заряда. Следующий член описывал энергетические потери, которые в случае точечного заряда в точности согласуются с величиной излучаемой энергии. Тогда сила реакции излучения, которая совершенно необходима для сохранения энергии, исчезла бы, если считать, что заряд не может действовать сам на себя.

Таким образом, за время учебы в аспирантуре я понял с исключительной ясностью очевидный провал собственной теории. Однако я все еще был влюблен в первоначальную идею и все еще думал, что в ней заключено решение трудностей квантовой электродинамики. Поэтому я продолжал свои попытки каким-либо образом спасти ее. Чтобы объяснить удовлетворительным образом реакцию излучения, необходимо, чтобы при ускорении электрона на него действовала некоторая сила. Но если электрону разрешается действовать только на другие электроны, то единственным возможным источником такой силы может быть лишь какой-то другой электрон. И вот однажды, когда я думал над проблемой, которая была поставлена передо мной профессором Уилером, и никак не мог решить ее, я вновь обдумал все эти вещи и провел некоторые вычисления. Предположим, имеются два заряда — я заставляю колебаться один из них (о нем я думаю как об источнике), и это заставляет второй заряд тоже

колебаться. Однако колебания второго заряда приводят к обратному действию на источник колебаний. Я вычислил этот эффект обратного воздействия на первый заряд, надеясь, что он мог бы объяснить силу реакции излучения. Конечно, этого не случилось, но я пошел к профессору Уилеру и рассказал ему о своих идеях. Он сказал: «Ну, хорошо, но ответ, который Вы получили для проблемы двух зарядов, будет, к сожалению, зависеть от величины заряда и от массы второго из них и будет меняться обратно пропорционально квадрату расстояния R между зарядами; сила же реакции излучения не зависит ни от одной из этих переменных». Я, конечно, подумал, что он и сам проделал такие же вычисления. Однако теперь я сам стал профессором, и знаю, что нужно не так уж много ума, чтобы немедленно увидеть то, что некоторый аспирант поймет лишь через несколько недель. Уилер указал мне также и на то, что беспокоило и меня. Речь идет вот о чем. Пусть множество зарядов расположено вокруг первоначального источника примерно с постоянной плотностью. Тогда, если сложить действие всех этих зарядов, обратная пропорциональность квадрату R будет компенсирована множителем R^2, входящим в элемент объема, и окончательный результат будет пропорционален толщине слоя, который устремляется к бесконечности. Следовательно, суммарный эффект обратного воздействия на источник получается бесконечным. «И, наконец,— сказал мне Уилер, — Вы забыли кое-что еще: при ускорении первого заряда второй реагирует несколько позже, а значит, и реакция назад на источник дойдет еще позже». Другими словами, в моих расчетах действие проявляется совсем не в те моменты времени. Внезапно я понял, насколько я глуп; ведь то, что я описывал и вычислял, было просто отраженным светом, а отнюдь не реакцией излучения.

Но насколько я был глуп, настолько был умен профессор Уилер, потому что он продолжал читать мне лекцию так, как будто бы он занимался всеми этими вопросами раньше и был полностью готов к ответу; на самом деле он не занимался этим и попросту импровизировал. «Во-первых,— сказал он,— давайте предположим, что обратное действие зарядов поглотителя доходит до источника как с помощью обычных запаздывающих волн отраженного света, так и с помощью опережающих волн. Тогда закон воздействия справедлив как в прошедшие, так и в будущие моменты времени». К тому времени я был уже в достаточной степени физиком, чтобы не сказать: «О нет, этого не может быть?». Сейчас все физики знают, на примере Эйнштейна и Бора, что нередко идея, которая на первый взгляд кажется абсолютно парадоксальной, проанализированная в деталях и конкретной экспериментальной ситуации, может на самом деле оказаться совсем не парадоксальной. Поэтому использование опережающих волн — решения уравнений Максвелла, которое прежде не использовалось в физике,— беспокоило меня ничуть не больше, чем профессора Уилера.

Профессор Уилер использовал опережающие волны для того, чтобы обратное воздействие приходило в нужный момент времени. Затем он предложил следующее. Если бы поглотитель содержал большое количество электронов, то можно было бы применить понятие показателя преломления n. Тогда запаздывающие волны, испускаемые источником, обладали бы длиной волны, слегка изменяющейся при прохождении через поглотитель. Если мы теперь предположим, что опережающие волны идут из поглотителя без преломления (вы спросите, почему? Я не знаю, но давайте предположим, что они идут назад, не преломляясь!), то постепенно будет накапливаться сдвиг фазы между обратным и первоначальным сигналами. Тогда мы должны были бы представить себе, что все вклады в реакцию таковы, как будто бы они обусловлены слоем конечной тол-

щины, а именно, первой волновой зоной. (Более точно, такой толщиной, на которой фаза в среде заметно изменяется по сравнению с фазой в вакууме, т. е. толщиной, пропорциональной $\lambda/(n-1)$.) Но чем меньше число электронов в среде, чем меньше вклад каждого из них, тем толще будет слой, который оказывает эффективное влияние, поскольку чем меньше число электронов, тем меньше показатель преломления отличается от единицы. Чем больше величина зарядов этих электронов, чем больший вклад вносит каждый из них, тем тоньше эффективный слой, поскольку показатель преломления при этом возрастает. И когда мы оценили все это (т. е. вычислили, не заботясь о том, чтобы сохранить правильные числовые множители), то, действительно, оказалось, что обратная реакция на источник абсолютно не зависела от свойств тех зарядов, которые находились в окружающем поглотителе. Далее, она вела себя как раз так, как должна себя вести реакция излучения. Однако мы не смогли выяснить, правильную ли величину мы получили. Уилер послал меня домой и попросил точно вычислить, какие вклады от опережающих и запаздывающих волн необходимы, чтобы получить численно верный ответ. Кроме того, он сказал, что нужно выяснить, что происходит с опережающими эффектами, которые здесь должны проявиться, если поместить пробный заряд очень близко к источнику. Потому что если все заряды приводят не только к запаздывающим, но и к опережающим эффектам, то почему бы опережающим волнам от источника не воздействовать на этот пробный заряд?

Я обнаружил, что можно получить правильный ответ, если поле, создаваемое каждым зарядом, описывать полусуммой опережающих и запаздывающих волн. Другими словами, нужно использовать то решение уравнения Максвелла, которое симметрично во времени. Причина же того, что опережающие эффекты не наблюдаются в точке, близкой к источнику, несмотря на то, что источник испускает опережающие волны, заключается в следующем. Допустим, что источник окружен сферической поглощающей стенкой, находящейся от него на расстоянии в десять световых секунд. Пусть пробный заряд находится справа от источника на расстоянии в одну секунду. Тогда пробный заряд будет удален от одних частей стены на одиннадцать секунд, а от других — только на девять. Сигнал источника, испущенный при $t = 0$, вызывает движение в стенке в момент времени $+10$. Опережающие эффекты от этого движения могут воздействовать на пробный заряд на одиннадцать секунд раньше, т. е. при $t = -1$. Но именно в этот момент к нему приходят прямые опережающие волны от источника. Оказывается, что эти два эффекта в точности равны по абсолютной величине, но противоположны по знаку, а потому сокращаются! В более поздний момент времени $+1$ воздействия источника и стенки на пробный заряд снова оказываются равными. Но теперь уже у них одинаковый знак и они складываются таким образом, чтобы превратить наполовину запаздывающую волну от источника в полностью запаздывающую суммарную волну.

Таким образом, стало ясно, что можно представлять себе реакцию излучения как прямое действие зарядов поглотителя на источник посредством опережающих волн, если предположить, что все взаимодействия описываются полусуммой опережающих и запаздывающих решений уравнений Максвелла, и, кроме того, все источники окружены веществом, поглощающим весь испускаемый свет.

Много месяцев было потрачено на проверку всех этих утверждений. Я доказывал, что эффект не зависит от формы контейнера и прочих деталей, что эти законы строго справедливы и что опережающие эффекты на самом деле исчезают в каждом конкретном случае. Мы всегда пытались увеличить эффективность наших выводов и увидеть все более и более

четко, почему эти эффекты имеют место. Я не хотел бы утомлять вас перечислением всех этих подробностей. Применив опережающие волны, мы столкнулись с рядом явных парадоксов, которые мы постепенно разрешали один за другим. Мы поняли, что в действительности в теории не существует какой бы то ни было логической трудности. Она была абсолютно удовлетворительной.

Мы также обнаружили, что все проделанное нами можно переформулировать на другом языке с помощью принципа наименьшего действия. Так как мой первоначальный план состоял в том, чтобы все описать непосредственно в терминах движения частиц, то мне хотелось сформулировать эту новую теорию без какого-либо упоминания о полях. В результате мы нашли такую форму записи действия, которая содержала непосредственно только лишь движение зарядов и после варьирования приводила к уравнениям движения этих зарядов. Выражение для действия A записывается в виде

$$A = \sum_i m_i \int_{\epsilon}^{\infty} (\dot{X}^i_\mu \dot{X}^i_\mu)^{1/2} \, d\alpha_i + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,\, j \\ i \neq j}} e_i e_j \int_{\epsilon}^{\infty} \int_{\epsilon}^{\infty} \delta(I^2_{ij}) \, \dot{X}^i_\mu(\alpha_i) \, \dot{X}^j_\mu(\alpha_j) \, d\alpha_i \, d\alpha_j, \qquad (1)$$

где

$$I^2_{ij} = [X^i_\mu(\alpha_i) - X^j_\mu(\alpha_j)] \, [X^i_\mu(\alpha_i) - X^j_\mu(\alpha_j)].$$

Здесь $X^i_\mu(\alpha_i)$ — четырехмерный радиус-вектор i-й частицы, как функция от некоторого параметра α_i; что касается $\dot{X}^i_\mu(\alpha_i)$, то это просто $dX^i_\mu(\alpha_i)/d\alpha_i$. Первый член является обычным действием релятивистской механики свободных частиц с массами m_i. (Мы суммируем, как обычно, по повторяющимся индексам μ.) Второй член описывает электрическое взаимодействие зарядов. Суммирование ведется по каждой паре зарядов (множитель $^1/_2$ введен, чтобы каждую пару учесть лишь один раз; член с $i = j$ опущен, так как он описывает самодействие). Взаимодействие представлено в виде двукратного интеграла от дельта-функции от квадрата пространственно-временнóго интервала I^2, взятого между двумя точками на путях интегрирования. Таким образом, взаимодействие появляется только тогда, когда интервал обращается в нуль, т. е. на световых конусах.

Именно то обстоятельство, что взаимодействие записано в виде полусуммы опережающих и запаздывающих волн, и позволило записать в таком виде принцип наименьшего действия. Этого сделать нельзя, если взаимодействие только запаздывающее.

Итак, вся классическая электродинамика заключалась в таком простом выражении. На вид это выражение было очень хорошо и потому, несомненно, верно, по крайней мере для начинающего физика. Оно автоматически приводило к полуопережающим и полузапаздывающим эффектам, и в нем не содержалось полей. Опустив в сумме член с $j = i$, я опустил самодействие и потому не сталкивался с какой-либо бесконечной собственной энергией. Это было то самое решение проблемы устранения бесконечностей в классической электродинамике, на которое я надеялся.

Конечно, можно восстановить поля, если вы желаете сделать это, но тогда надо следить за полем, создаваемым каждой частицей в отдельности. Причина этого заключается в том, что надо исключить поле, создаваемое данной частицей, чтобы определить то поле, которое на нее действует. Единого универсального поля, в которое дают вклад все частицы, не существует. Эта идея была предложена ранее Френкелем, и потому мы назвали эти поля полями Френкеля. Эта теория, которая разрешала частицам действовать только друг на друга, была эквивалентна полям Френкеля, описываемым полусуммой опережающих и запаздывающих решений.

Было предложено много интересных вариантов модификации электродинамики. Мы обсудили большое число их, однако я расскажу только об одном. Он состоял в том, чтобы заменить дельта-функцию во взаимодействии другой функцией, скажем, $f(I_{ij}^2)$, которая не является бесконечно острой. Мы заменили дельта-функцию от I^2 на некий узкий пик, т. е. взаимодействие появлялось не только тогда, когда интервал между зарядами точно равен нулю. Пусть $f(Z)$ велика лишь вблизи точки $Z = 0$ с шириной порядка a^2. Взаимодействия появятся теперь, когда $T^2 - R^2$, грубо говоря, порядка a^2, где T — разность времен, а R — пространственное разделение зарядов. Могло бы показаться, что это не согласуется с опытом. Однако если расстояние a достаточно мало́, скажем, порядка 10^{-13} *см*, то отсюда следует, что запаздывание действия по времени T порядка $\sqrt{R^2 \pm a^2}$ или, приблизительно, если R намного больше a, имеем $T = R \pm \frac{a^2}{2R}$. Это означает, что чем дальше находятся заряды, тем все меньше и меньше отклонение времени T от идеального теоретического максвелловского времени R. Поэтому все теории, проверявшиеся с помощью генераторов, моторов и т. п., т. е. с помощью всех тех опытов, которые были доступны во времена Максвелла, будут отвечать всем этим требованиям, если a порядка 10^{-13} *см*. Если R порядка одного сантиметра, то относительное отклонение в T будет величиной порядка 10^{-26}. Поэтому оказалось возможным произвести простые изменения в теории, не нарушая согласия со всеми наблюдениями классической электродинамики. У нас нет ни малейшего представления о том, каков точный вид функции f. Однако эта возможность представляется достаточно интересной, чтобы иметь ее в виду, развивая далее квантовую электродинамику.

Нам также казалось, что если бы мы сделали это, т. е. заменили бы δ на f, то мы не смогли бы ввести в сумму член с $i = j$, потому что он описывал бы теперь в релятивистски инвариантной форме конечное воздействие заряда самого на себя. В действительности, можно было доказать, что если проделать такую процедуру, то основной эффект самодействия (в случае не слишком больших ускорений) состоял бы в изменении массы. Более того, можно было бы вообще обойтись без члена с массой m_i. Вся механическая масса могла бы быть обусловлена электромагнитным самодействием. Итак, если хотите, можно было бы построить другую теорию с еще более простым выражением для действия A. При этом в выражении (1) остается только второй член, суммирование ведется по всем i и j, а дельта-функция заменяется на некоторую функцию f. Таким простым выражением можно было бы описать всю классическую электродинамику, которая, если не считать гравитацию, исчерпывает собой практически всю классическую физику. Хотя это и не содействует ясности изложения, я описываю одновременно несколько возможных теорий. Дело в том, что в то время все эти теории представлялись нам как различные возможности решения. Имелось несколько возможных решений трудности классической электродинамики; любое из них могло оказаться хорошей отправной точкой для разрешения трудностей квантовой электродинамики.

Я бы хотел также подчеркнуть, что к тому времени я стал привыкать к физической точке зрения, отличной от общепринятой. Обычно все события рассматриваются довольно детально в зависимости от времени. Например, задается поле в некоторый момент времени. Дифференциальное уравнение определяет это поле в следующий момент и так далее. Этот метод, который я буду называть гамильтоновым методом, является методом, дифференциальным по времени. Вместо этого в нашем методе мы сталкиваемся (скажем, в (1)) с описанием характера пути во времени и пространстве. Поведение природы будет вполне определено, если считать,

что ее пространственно-временной путь имеет однозначный вид. В случае действия, заданного формулой (1) или подобной ей, уравнения, полученные варьированием по $X^i_\mu(\alpha_j)$, записать снова в гамильтоновой форме уже нелегко. Если вы желаете использовать в качестве переменных лишь координаты частиц, то нужно говорить о свойствах пространственно-временны́х путей. Однако путь одной из частиц в данный момент времени испытывает влияние пути другой из них в отличный от этого момент времени. Поэтому если попытаться описать явление дифференциальным способом, задавая состояние частицы в данный момент и формулируя, как это состояние будет меняться в будущем, это для одной отдельной частицы окажется невозможным, потому что предыстория этой частицы влияет на ее будущее.

Понадобится ввести множество переменных, чтобы проследить за тем, что происходило с частицей в прошлом. Эти переменные называются переменными поля. Кроме того, нужно также знать, каково поле в настоящий момент, если вы хотите предвидеть, что должно произойти. Из общей пространственно-временной трактовки принципа наименьшего действия поле исчезает; оно рассматривается просто как формальные переменные, вводимые в гамильтоновом методе.

Однажды мне позвонил в Принстонский университет Уилер. Наш разговор был побочным продуктом все тех же размышлений: «Фейнман, я знаю, почему у всех электронов одинаковый заряд и одинаковая масса». «Почему?» «Потому что все они — это один и тот же электрон!». И затем он объяснил по телефону: «Предположим, что мировые линии, которые мы ранее рассматривали обычно во времени и пространстве, не идут непрерывно по времени, а образуют огромный узел. Тогда, если мы разрежем этот узел плоскостью, на которой время постоянно, мы увидим очень много мировых линий, которые представляли бы собой множество электронов, если бы не одно интересное обстоятельство. Если в одном из сечений это — обычная мировая линия электрона, то в сечении, в котором эта линия поворачивается и идет назад из будущего, мы получим неверный знак собственного времени — собственных четырехмерных скоростей, а это эквивалентно изменению знака у заряда, и потому эта часть пути будет действовать подобно позитрону». «Но, профессор,— сказал я,— ведь позитронов куда меньше, чем электронов.» «О, может быть, они запрятаны в протонах или где-то еще»,— ответил он. Я не воспринял серьезно его идею о том, что все электроны эквивалентны. Однако я ухватился за его мысль о том, что позитроны можно представлять просто как электроны, идущие из будущего в прошедшее в обратном сечении их мировых линий. Вот это я и присвоил!

Подводя итоги, можно сказать, что когда я проделал все это, то как физик я сделал два приобретения. Во-первых, я знал множество различных путей формулировки классической электродинамики в самых различных математических формах. Я узнал, как можно выразить ее в каждой из этих форм. Во-вторых, у меня появилась некоторая точка зрения — общая пространственно-временна́я точка зрения — и укрепилось неуважение к гамильтонову методу описания физических явлений.

Я бы хотел несколько отвлечься, чтобы сделать одно замечание. То, что электродинамика может быть представлена большим числом способов — дифференциальные уравнения Максвелла, различные принципы минимума при наличии полей, принципы минимума без полей и всеми другими способами,— мне было хорошо известно. Однако я никогда не понимал этого. Мне всегда казалось странным, что фундаментальные законы физики, когда они уже обнаружены, могут быть представлены в столь разнообразных формах. Эти формы на первый взгляд кажутся

не идентичными, однако при помощи несложных математических манипуляций можно обнаружить их взаимосвязь. Примером тому служит уравнение Шредингера и гайзенберговская формулировка квантовой механики. Я не знаю, почему так происходит,— это остается для меня непонятным, но именно это я почерпнул из опыта. Всегда существует другой способ выразить ту же самую мысль; он совсем не похож на тот способ, которым вы пользовались сначала. Я не знаю, в чем кроется причина этого. Мне кажется, что это как-то отражает простоту природы. Например, закон обратной пропорциональности силы квадрату расстояния совершенно точно можно представить как решение уравнения Пуассона; это уравнение, следовательно, служит другим способом выражения того же самого обстоятельства; но оно совсем не похоже на закон обратной пропорциональности квадрату расстояния. Я не знаю, что могло бы значить то, что природа выбирает эти удивительные формы; но, может быть, это есть способ проявления простоты. Возможно, вещь по-настоящему проста, если можно достаточно полно описать ее несколькими различными способами, не ощущая непосредственно, что вы описываете одно и то же.

Я был теперь убежден, что поскольку мы решили проблему классической электродинамики (при этом полностью в соответствии с моей программой в *M.I.T.*, оставив лишь прямое взаимодействие между частицами, сделав поля не нужными), то и дальше все пойдет хорошо. Я был убежден, что мне оставалось сделать одно-единственное дело — построить квантовую теорию, аналогичную классической. И все проблемы будут решены.

Итак, надо было построить квантовую теорию, которая в качестве классического аналога содержала бы выражение (1). Но единого способа перехода от классической механики к квантовой теории не существует, хотя во всех учебниках утверждается обратное. То, что в них рекомендуется делать с этой целью, это найти переменные импульса и заменить их на $\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x}$. Однако я найти эти переменные не смог, так как их у меня не было.

В то время характер использования квантовой механики определялся тем, что все записывалось в знаменитой гамильтоновой форме, т. е. с помощью оператора H в форме дифференциального уравнения; это уравнение описывало, каким образом волновая функция меняется с течением времени. Если бы классическую физику можно было свести к гамильтоновой форме, то все было бы прекрасно. Но принцип наименьшего действия не приводит к гамильтоновой формулировке, если действие является не только функцией координат и скоростей в один и тот же момент времени, но функцией каких-то других переменных. Если действие представить в виде интеграла от функции (обычно называемой лагранжианом *)) от скоростей и координат в один и тот же момент времени:

$$S = \int L(\dot{x}, x)\, dt, \tag{2}$$

то можно, исходя из лагранжиана, найти гамильтониан и построить квантовую механику более или менее однозначно. Однако в формуле (1) основные переменные, координаты, входят при различных временах. Поэтому отнюдь не было очевидным, по какому пути идти, чтобы сформулировать квантовомеханический аналог.

Я пытался выпутаться из этого дела, я устремлялся в разных направлениях. Одно из них заключалось в следующем. Если бы имелись

*) Для функции L часто используют термин «функция Лагранжа». (*Прим. перев*).

гармонические осцилляторы, взаимодействующие с запаздыванием по времени, то можно было бы определить их нормальные моды и предположить, что квантовая теория нормальных мод точно такая же, как и в случае простых осцилляторов, а затем проделать мою работу в обратном порядке к первоначальным переменным. Я выполнил эту программу. Затем я надеялся обобщить этот метод на системы, более сложные чем гармонический осциллятор, но тут я узнал, к моему сожалению, то, что знали уже многие. Гармонический осциллятор — слишком простая система. Очень часто удается понять, что будет происходить с ним в квантовой теории, но это не дает никакого ключа к обобщению этих результатов на другие системы.

Так что эта деятельность не очень-то помогла мне. И вот однажды, когда я блуждал в темноте около этой проблемы, я пошел выпить пива в Нассау-таверне в Принстоне. Там был один физик, только что приехавший из Европы (Герберт Джел). Он сел рядом со мной. Европейцы куда более серьезны, чем мы в Америке, потому что они считают, что такая вечеринка с пивом является подходящим местом для обсуждения головоломных вопросов. Итак, он сел около меня и спросил: «Что Вы делаете?» и т. д. Я ответил: «Пью пиво». Затем я понял, что он хотел узнать, чем я занимаюсь, и я рассказал ему о той задаче, которая меня увлекла. Наконец, я попросту повернулся к нему и спросил: «Слушайте, не знаете ли Вы какой-либо путь получения квантовой механики из принципа действия, где интеграл, определяющий действие, непосредственно входил бы в квантовую механику?» «Нет,— ответил он,— но у Дирака была статья, в которой в квантовую механику, по крайней мере, вводится лагранжиан. Я покажу ее Вам завтра.»

На следующий день мы пошли в Принстонскую библиотеку. Там имеются маленькие комнатки, в которых можно вести любые дискуссии. Он показал мне эту статью. Дирак утверждал в ней следующее. В квантовой механике, помимо дифференциального уравнения, существует очень важная величина, которая преобразует волновую функцию от одного момента времени к другому и которая эквивалентна дифференциальному уравнению. Она имеет вид ядра интеграла, которое мы обозначим через $K(x', x)$ и которое преобразует волновую функцию $\psi(x)$, заданную в момент времени t, в волновую функцию $\psi(x')$, взятую в момент времени $t+\varepsilon$. Дирак указывает, что эта функция K аналогична некоторой величине в классической механике. Последняя получается, если взять экспоненту в степени, равной произведению $i\varepsilon$ на лагранжиан $L(\dot{x}, x)$, представив себе, что точки x и x' соответствуют временам t и $t+\varepsilon$. Другими словами, $K(x', x)$ аналогична $e^{i\varepsilon L\left(\frac{x'-x}{\varepsilon}, x\right)}$.

Профессор Джел показал это место мне. Я прочитал. Он разъяснил его мне. Тогда я спросил: «Что он имеет в виду, когда говорит, что они аналогичны; что это значит — аналогичны? Как это можно использовать?» Он ответил: «О вы, американцы! Вы всегда ищете применение для всего!» Я сказал, что мне кажется, что Дирак должен был подразумевать равенство этих величин. «Нет,— возразил он,— Дирак вовсе не говорит этого». «Тогда давайте посмотрим, что произойдет, если мы положим их равными»,— сказал я.

Итак, я просто приравнял их, рассмотрев простейший пример, когда лагранжиан имеет вид $\frac{1}{2}M\dot{x}^2 - V(x)$, однако вскоре обнаружил, что надо еще ввести соответствующую константу пропорциональности A. Когда я подставил $Ae^{i\varepsilon L}$ вместо K, т. е. записал

$$\psi(x', t+\varepsilon) = \int A \exp\left[\frac{i\varepsilon}{\hbar} L\left(\frac{x'-x}{\varepsilon}, x\right)\right] \psi(x, t)\, dx, \qquad (3)$$

а затем вычислил интеграл с помощью разложения в ряд Тэйлора, то получил уравнение Шредингера. Затем я обернулся к Джелю, еще не полностью осознав проделанное, и сказал: «Вот, видите, Дирак думал, что эти величины пропорциональны». Глаза Джеля были широко раскрыты,— он вынул маленькую записную книжку и быстро списал все с доски. Затем он произнес: «О, это важное открытие. Вы, американцы, всегда пытаетесь найти всему применение. Это — хороший способ делать открытия!». Итак, подумал я, пока я искал, что хотел сказать Дирак, я сделал открытие: то, что Дирак считал аналогичным, было на самом деле равным. Тогда уже по крайней мере хоть намечалась связь между лагранжианом и квантовой механикой. Однако все равно еще использовались волновые функции и понятие о бесконечно малых временах. Спустя день или около того, лежа в постели и обдумывая все эти проблемы, я представил себе, что бы произошло, если бы я захотел вычислить волновую функцию в момент времени, отделенный конечным интервалом от начального.

Я бы подставил один из множителей $e^{i\varepsilon L}$ в интеграл и получил бы волновую функцию в следующий момент $t + \varepsilon$. Затем я мог бы подставить полученный результат вновь в формулу (3) с ядром $e^{i\varepsilon L}$ и получил бы волновую функцию в момент $t + 2\varepsilon$ и т. д., и т. д.Тут выяснилось, что я думаю уже о большом числе интегралов, которые надо брать последовательно один за другим. В подынтегральном выражении стояло произведение экспонент, которое, конечно, выражалось как экспонента от суммы членов типа εL. Но L — это лагранжиан, а ε подобен интервалу времени t. Так что если взять сумму таких членов, то она выглядит в точности как интеграл. Получается нечто вроде формулы Римана для интеграла $\int L\,dt$, так как берется значение в каждой точке, а затем все суммируется. Конечно, при этом нужно перейти к пределу $\varepsilon \to 0$. Таким образом, связь между волновой функцией в один момент времени и волновой функцией в другой момент времени, который позже первого на некоторый конечный интервал, задается бесконечным числом интегралов (конечно, из-за того, что ε стремится к нулю) от экспоненты $e^{iS/\hbar}$, где S есть действие, определенное формулой (2). Наконец-то мне удалось описать квантовую механику непосредственно в терминах действия S.

Позже возникла идея об амплитуде для траектории. Идея состояла в том, что для каждого возможного пути, по которому частица может перейти от одной точки пространства-времени к другой, существует своя амплитуда. Эта амплитуда равна основанию натуральных логарифмов e, возведенному в степень, равную произведению $i/\hbar$ на действие вдоль этого пути. Амплитуды по различным траекториям складываются друг с другом. Таким образом это есть другой, третий способ формулировки квантовой механики. Эта формулировка кажется отличной от формулировок Шредингера или Гейзенберга, а на самом деле эквивалентна им.

После того как я проверил несколькими способами это утверждение, первым моим намерением было, конечно, подставить действие, определенное формулой (1), вместо (2). Первое затруднение состояло в том, что я не мог последовательно рассмотреть релятивистские частицы со спином $^1/_2$. Однако, хотя мне удалось рассчитать лишь нерелятивистский случай, я мог учесть абсолютно точно взаимодействие света или фотонов. Для этого надо было просто подставить члены взаимодействия из формулы (1) в действие, заменив члены с массой на их нерелятивистский предел $(M\dot{x}^2/2)\,dt$. Если действие передается с запаздыванием — а именно это теперь имело место — и в рассмотрение включается несколько моментов времени, я должен был отбросить идею о волновой функции. Следовательно, я не мог уже формулировать свою программу так: по задан-

ной амплитуде для всех положений в данный момент времени вычислить амплитуду в другой момент времени. Однако это обстоятельство не доставило мне хлопот. Это просто привело к возникновению новой идеи. Вместо волновой функции можно было ввести следующее. Пусть источник испускает частицу и имеется детектор, который может зарегистрировать ее. Тогда можно записать амплитуду того, что источник испускает, и того, что детектор регистрирует. Мы проделываем это, не указывая точного времени, когда источник испускает или детектор регистрирует частицу. Мы не пытаемся определить состояние чего бы то ни было в любой промежуточный момент времени, а просто ищем амплитуду для полного эксперимента. А если так, то мы могли бы рассмотреть без волновой функции и то, как эта амплитуда изменится, если в промежутке между источником и детектором поместить рассеиватель, поворачивать его и менять углы и т. п.

Удалось выяснить также, как видоизменяются старые понятия энергии и импульса в этом случае обобщенного действия. Поэтому я полагал, что я проквантовал классическую электродинамику или, точнее, новую классическую электродинамику, описываемую действием (1). Я предпринял некоторые проверки. Если я принимал за основу френкелевскую полевую точку зрения, которая, как вы помните, была в основном дифференциальной, то в этом случае я мог квантовать довольно стандартным способом. Единственная неразрешимая проблема состояла в том, как сформулировать в квантовой механике классические граничные условия так, чтобы получить только полусумму опережающих и запаздывающих решений. Проявив некоторую изобретательность в выяснении того, что это означает, я обнаружил, что квантовая механика в сочетании с полями Френкеля и определенными граничными условиями приводила к новой форме квантовой механики с учетом запаздывания и действием, имеющим вид (1). Итак, с разных сторон подходили подтверждения, что, вне всякого сомнения, мне удалось все привести в порядок.

Легко было также догадаться, как нужно видоизменить электродинамику, если бы в этом была необходимость. Я просто заменил дельта-функцию на f точно так же, как в классическом случае. Итак, все было легко и просто. Чтобы описать старую теорию с запаздывающими волнами, не упоминая о них явным образом, мне пришлось записать вероятности, а не только амплитуды. Мне пришлось возвести амплитуды в квадрат, а это привело к появлению двойных интегралов по путям, в которых S входило дважды и т. п. По мере того как я продвигался дальше и изучал разные формы теории и разные граничные условия, у меня возникло странное ощущение, что что-то было не то. Я не мог четко сформулировать, в чем кроется трудность; в один из тех коротких периодов, когда я вообразил, что все уже окончательно завершено, я написал диссертацию и получил ученую степень.

Во время войны у меня не было времени, чтобы достаточно интенсивно работать над этим. Но я бредил этим в автобусах и тому подобных местах, пытаясь действовать на клочках бумаги. И тут я открыл, что, действительно, кое-что было неверным, а кое-что потрясающе неверным. Я обнаружил, что если обобщить действие и вместо хорошей лагранжевой формы (2) придать ему вид (1), то величины, которые я определил как энергию и т. п., станут комплексными. Значения энергии стационарных состояний оказываются уже не вещественными, а полная вероятность событий оказывается не равной 100%. Другими словами, если взять вероятности того, что произойдет то или иное событие, а затем сложить вероятности всех мыслимо возможных событий, то их сумма получается отличной от единицы.

Другая проблема, которую я очень упорно старался разрешить, состояла в том, чтобы включить в описание в рамках новой квантовой

механики релятивистские электроны. Я хотел получить некоторый однозначный путь, отличный от того, что было раньше, а не просто переписать операторы Дирака в виде некоего выражения, а затем применить нечто вроде алгебры Дирака вместо обычных комплексных чисел. Меня очень воодушевляло то, что в случае одномерной задачи я действительно нашел способ приписать амплитуды каждому пути, когда я ограничивался лишь теми траекториями, которые со скоростью света вели вперед или назад. Амплитуда записывалась просто в виде $i\varepsilon$, возведенного в степень, равную числу изменений знака скорости. При этом я разбил весь интервал времени на отрезки величиной ε и допустил, что скорость может менять знак только в эти моменты. Это приводит (в случае, когда ε устремляется к нулю) к двумерному уравнению Дирака — одна пространственная и одна временна́я компонента ($\hbar = M = c = 1$).

Дираковская волновая функция имеет четыре компоненты в четырехмерном случае. Однако в моем случае у нее имеется лишь две компоненты. Необходимость двух компонент автоматически вытекает из правила для амплитуды по пути. Потому что, если имеется формула для амплитуд по пути, то даже если известна полная амплитуда всех путей, приходящих в данную точку, вы не сможете найти амплитуду, которая приходит в следующую точку. Дело в том, что если путь выходит налево, то не появляется никакого нового множителя $i\varepsilon$, если он вошел справа, тогда как такой множитель появляется, если он вошел слева. Итак, чтобы получить такую же информацию в последующие моменты, недостаточно знать лишь полную приходящую амплитуду, а надо знать независимо амплитуду, приходящую справа, и амплитуду, идущую налево. Однако если это было известно, то можно было снова вычислить независимо обе эти амплитуды. Таким образом, надо было следить за двумя амплитудами в дифференциальном уравнении (которое было первого порядка по времени).

И вот я мечтал о том, что если бы я был умнее, я бы нашел в случае четырехмерного пространства-времени формулу для амплитуды по пути, которая была бы красивой, простой, эквивалентной уравнению Дирака и из которой четырехкомпонентность, матрицы и все другие забавные математические штучки такого сорта вытекали бы как простое следствие. Однако я не смог добиться успеха в этом направлении. Излагая все это, я хотел рассказать вам о нескольких из тех безуспешных попыток, на которые я затратил почти столько же усилий, сколько и на те, которые оправдали надежды.

Итак, описывая положение, в котором я очутился несколькими годами позже, я бы сказал, что я многое знал о квантовой электродинамике, по крайней мере знал множество различных способов формулировки ее — в терминах интегралов по путям от действия и другими способами. Например, один из важных побочных результатов моей деятельности, полученный при работе с простейшими формулировками, состоял в том, что я ясно понимал, как описать единственным образом те части поля, которые в то время назывались продольными и поперечными полями. И, вообще, я ясно понимал вопрос о релятивистской инвариантности теории. В то время в квантовой электродинамике поле разбивалось на две части, одна из которых называлась продольной частью поля, а другая была обусловлена фотонами, или поперечными волнами. Это было вызвано необходимостью проводить вычисления отдельно для каждой части. Продольная часть описывалась кулоновским потенциалом, который подставлялся и в уравнение Шредингера. В то же время поперечная часть описывалась в корне отличным образом — в терминах квантования поперечных волн. В релятивистской теории такое разбиение зависело от положения выбранных осей координат в пространстве-времени.

Люди, движущиеся с разными скоростями, разбили бы одно и то же поле на продольные и поперечные поля различным образом. Более того, полную формулировку квантовой механики, настаивающей на существовании волновой функции в заданный момент времени, было бы весьма трудно проанализировать с релятивистской точки зрения. В разных координатных системах вычисления последовательности событий в терминах волновых функций велись при различном разбиении временнóго интервала на отрезки и при разном разделении поля на продольную и поперечную части. Хотя, конечно, гамильтонов формализм был релятивистски инвариантен, он совсем не казался таковым. Одно из огромных преимуществ единой точки зрения и состояло в том, что можно было непосредственно убедиться в релятивистской инвариантности. Или, как сказал бы Швингер, ковариантность была очевидной. Поэтому мое преимущество заключалось в том, что у меня имелась явно ковариантная форма квантовой электродинамики, а также ряд предложений по модификации теории и т. д. Недостатком всего этого было то, что если принять это слишком серьезно (под этим я имею в виду принять теорию серьезно вообще в этом виде), то возникали неприятности с комплексностью энергии, с отличием полной вероятности от единицы и т. д. Я безуспешно бился над этими проблемами.

И тут Лэмб поставил свой эксперимент. Он измерил разность частот уровней $2S_{1/2}$ и $2P_{1/2}$ в водороде и обнаружил, что она равна примерно 1000 *Мгц*. В то время я работал в Корнелле с профессором Бете. У этого человека есть великолепный принцип. Он считает, что если имеется хороший экспериментальный результат, то надо получить его и теоретически. Поэтому он использовал квантовую электродинамику того времени с целью получить расщепление этих уровней. Он указал, что собственная энергия электрона сама по себе обращается в бесконечность. Поэтому и вычисляемая энергия связанного электрона также должна быть бесконечной. Однако он думал, что при вычислении расщепления двух энергетических уровней в терминах исправленной массы вместо старой массы окажется, что теория приведет к конечным сходящимся выражениям. Он произвел оценку расщепления таким способом и обнаружил, что расходимость все еще оставалась. Однако он полагал, что это было обусловлено, возможно, тем, что он использовал нерелятивистскую теорию. Предположив, что результат будет сходящимся, если рассмотрение вести в рамках релятивистской теории, он оценил, что для лэмбовского сдвига получится значение около 1000 *Мгц*. Так он сделал самое важное открытие в истории теории квантовой электродинамики. Он вычислил все это в поезде на пути из Итаки (штат Нью-Йорк) в Шенектеди и весьма возбужденный позвонил мне из Шенектеди, чтобы сообщить о результате, который я оценил в тот момент, кажется, не полностью.

Возвратившись в Корнелл, он прочитал по этому вопросу лекцию, на которой присутствовал я. Он объяснил, что весьма сложно установить, чему именно соответствуют те или иные бесконечные члены, когда пытаешься вводить поправки на бесконечное изменение массы. Если бы существовали хоть какие-нибудь модификации теории,— сказал он,— даже, может быть, физически и не корректные (т. е. не обязательно описывающие тот путь, который использует природа), а просто любые модификации, которые при высоких частотах делают поправки конечными, то проблемы бы не существовало и можно было бы подробно проследить все детали. Тогда, вычислив конечную поправку Δm к массе электрона m_0, можно подставить численное значение $m_0 + \Delta m$ вместо m в решение любой другой проблемы и, таким образом, устранить весь имеющийся произвол. Если бы, вдобавок, этот метод был и релятивистски инвариантным, то можно было бы провести всю эту процедуру, не нарушая релятивистской инвариантности.

После лекции я подошел к нему и сказал: «Я могу это сделать; я принесу это вам завтра». Я считал, что я знал все известные в то время людям способы видоизменения квантовой электродинамики. Итак, я пришел к нему на следующий день и объяснил, что произошло бы при замене дельта-функции на f. Я попросил объяснить мне, как вычисляется, например, собственная энергия электрона, чтобы мы смогли проверить, конечная ли она.

Мне хочется, чтобы вы отметили один интересный момент. Я не воспользовался советом профессора Джеля и не нашел применения своим расчетам. Я никогда не применял всю эту технику, которая была мной изобретена, для решения какой-либо конкретной релятивистской проблемы. Вплоть до того момента я даже не вычислил собственную энергию электрона, а изучал трудности с сохранением вероятности и т. п. Я действительно не занимался ничем, кроме обсуждения общих свойств теории.

Но теперь я пришел к Бете, который, пока мы обсуждали все эти проблемы, объяснил мне на доске, как вычислять собственную энергию электрона. Однако когда надо было вычислить интегралы, то они оказались логарифмически расходящимися. Я рассказал ему, как получить релятивистски инвариантные модификации теории, которые, по моему мнению, привели бы все в порядок. Мы выписали интеграл, который вместо логарифмической расходимости обладал теперь еще более сильной расходимостью — рос пропорционально частоте в шестой степени!

Тогда я вернулся в свою комнату и, озабоченный этим, колесил по ней кругами, пытаясь понять, что же было неверно. Ведь я был уверен, что результат должен быть конечным из физических соображений. Я не мог понять, как он оказался бесконечным. Это интриговало меня все больше и больше. Наконец, я понял, что мне надо научиться вычислять. И, в конце концов, я научился вычислять собственную энергию электрона, неторопливо пробираясь своим путем через ужасную путаницу тех дней с состояниями с отрицательной энергией и дырками, с вкладами продольных волн и т. п. Когда я, наконец, понял, как производится расчет, и провел его с теми изменениями, которые я хотел предложить, то результат оказался прекрасно сходящимся и конечным, как я и ожидал. Мы с Бете так и не смогли никогда обнаружить, что мы сделали неверно на доске двумя месяцами раньше. Очевидно, мы где-то сбились с верного пути, но где, мы так никогда не узнали. Оказалось, что если провести вычисления без ошибок тем способом, который я предлагал, то все будет в порядке, и поправки станут конечными. Во всяком случае, это заставило меня вновь проверить все расчеты, чтобы убедиться своими руками, что нигде не было допущено ошибки. По крайней мере поправка к массе была теперь конечной, пропорциональной $\ln (ma/\hbar)$, где a — ширина той функции f, которая заменила собой дельта-функцию. В случае немодифицированной квантовой электродинамики величина a была равна нулю, что и приводило к бесконечной поправке к массе. Но не в этом была суть. Положив a конечной, я затем просто следовал программе, указанной Бете. Я показал, как вычислять множество различных процессов — рассеяние электронов на атомах без излучения, сдвиги уровней и т. п. Вычисления велись с использованием экспериментальной массы. Я заметил, что, как и предполагал Бете, в такой форме результаты были нечувствительны к величине a и даже обладали определенным пределом при $a \to 0$.

Затем я работал над тем, чтобы улучшить технику вычислений, применявшуюся в то время, и строил диаграммы, которые помогали быстрее анализировать теорию возмущений. Большая часть этих результатов была получена по догадкам. Дело в том, что у меня не было релятивистской теории материи. Например, мне казалось очевидным, что скорости, появлявшиеся в нерелятивистских формулах, следует заменять на дираков

ские матрицы α или, в более релятивистском виде, на матрицы γ_μ. Я делал эти предположения на основе тех формул, которые были получены мною при использовании интегралов по путям для нерелятивистских частиц, но релятивистских квантов света. Нетрудно было сформулировать правила, которые указывали бы, что надо подставить в формулы, чтобы описать полностью релятивистский случай. Я был очень удивлен, когда обнаружил, что в то время не знали, что каждая из формул, которые выводились столь медленно путем разделения продольных и поперечных волн, могла быть получена из формулы только для поперечных волн. Нужно было лишь вместо суммирования только по двум направлениям перпендикулярной поляризации суммировать по всем четырем возможным направлениям поляризации. Это было настолько очевидным из формулы (1), что я думал, что это все знают и поступают именно так. Я бы мог даже оказаться вовлеченным в спор лишь из-за того, что я не представлял себе, что люди не знают этого. Но оказалось, что вся их громоздкая работа с продольными волнами всегда давала тот же результат, что и суммирование по всем четырем направлениям поляризации вместо двух поперечных направлений. В этом заключалось одно из удивительных достоинств метода. Кроме того, я записал диаграммы для разных членов ряда теории возмущений, улучшил обозначения, разработал простые способы вычисления интегралов, которые появлялись при решении этих проблем, и т. д. На основе этого я написал нечто вроде руководства по квантовой электродинамике.

Один из важных новых шагов с физической точки зрения был связан с отрицательными энергиями — морем Дирака, из-за которого у меня возникло так много логических трудностей. Я был в таком замешательстве, что даже вспомнил о старой идее Уилера, что позитрон, может быть, является электроном, движущимся обратно во времени. Я использовал теорию возмущений, зависящую от времени, которая применялась обычно для вычисления собственной энергии. Я просто на время предположил, что можно двигаться обратно во времени, и посмотрел, какие члены получаются, когда время течет в обратном направлении. Они совпадали (с точностью, возможно, до некоторых знаков) с теми членами, которые были вычислены другими авторами, когда те решали эту задачу более сложным способом, используя понятие дырок в море. Знаки этих членов я вначале определял эмпирически, изобретая и пробуя некоторые правила.

Я пытался даже предположить, что все улучшения в релятивистской теории были вначале более или менее прямолинейным, полуэмпирическим обманом. Однако каждый раз, как я открывал что-нибудь новое, я возвращался назад и проверял это многими способами, сравнивал с каждой задачей, которая была решена ранее в электродинамике (а позже и в мезонной теории со слабой связью), с целью посмотреть, всегда ли согласуются результаты и т. д. Так я убеждался в справедливости различных принципов и правил, которые я придумал, чтобы упростить себе работу.

В это время усиленно развивалась мезонная теория. Я совершенно не знал этого предмета. Но я заинтересовался возможными применениями моих методов к вычислениям по теории возмущений в мезонной теории. Однако, что же такое мезонная теория? Все, что я знал о ней, состояло в том, что эта теория аналогична квантовой электродинамике. Правда, частицы, соответствующие фотону, обладали массой. Легко было догадаться, что дельта-функцию в (1), которая получалась как решение уравнения с приравненным нулю даламбертианом, надо заменить на соответствующее решение с даламбертианом, равным m^2. Далее, существовали различные типы мезонов. Одни из них были прямой аналогией фотонов. Их связь давалась матрицей γ_μ. Они назывались векторными мезонами.

Были также и скалярные мезоны. Возможно, они соответствуют замене γ_μ (а это, кажется, называют «псевдовекторной связью» *)) на единицу,— догадывался я. Я не мог понять, каким образом все это определялось в то время в статьях, потому что они были написаны с использованием таких понятий, как операторы рождения и уничтожения и т. п., в которых я не разбирался. Я помню, что когда кто-нибудь начинал обучать меня операторам рождения и уничтожения, начинал говорить, что данный оператор рождает электрон, я восклицал: Как можно родить электрон? Это не согласуется с законом сохранения заряда! Таким способом я ограждал свой ум от изучения практически очень важной схемы вычислений. Поэтому я должен был найти как можно больше возможностей, чтобы проверить справедливость своих догадок о различных теориях.

Однажды на заседании в Физическом обществе разгорелся спор о правильности вычислений Слотника, который рассмотрел взаимодействие электрона с нейтроном в псевдоскалярной теории с псевдовекторной связью и в псевдоскалярной теории с псевдоскалярной связью. Он обнаружил, что ответы получаются не одинаковыми. Более того, из одной теории следовал расходящийся результат, тогда как из другой — сходящийся. Кое-кто полагал, что эти две теории должны приводить к одинаковому ответу для этой задачи. Мне представилась хорошая возможность проверить правильность моих догадок относительно того, что на самом деле представляли собой эти два вида связи. Итак, я пошел домой и в течение вечера получил формулы для рассеяния электрона на нейтроне в случае псевдоскалярной и псевдовекторной связи. Я обнаружил, что они не одинаковы, вычел одну из другой и детально проанализировал получившуюся разность. На следующий день во время заседания я увидел Слотника и сказал ему: «Слотник, я получил формулы прошлой ночью. Я хотел бы посмотреть, совпадают ли наши результаты. У меня получились разные ответы для разной связи. Но я хотел бы подробно посмотреть это с Вами, потому что я хочу удостовериться в правильности своих методов». Он ответил: «Как это так Вы сделали это прошлой ночью, когда у меня это заняло шесть месяцев!». Когда мы сравнивали ответы, он посмотрел на меня и спросил: «Что означает Q вот там, эта переменная Q?» (У меня имелись выражения типа $\operatorname{arctg} Q/Q$ и т. п.). Я ответил: «Это — переданный электрону импульс. Ведь электроны отклоняются на различные углы». «О,— сказал он,— нет, у меня рассмотрено лишь предельное значение при Q, стремящемся к нулю, т. е. рассеяние вперед». Было нетрудно подставить в моем выражении нуль вместо Q. Тогда я получил точно такие же ответы, какие были у него. Но ему потребовалось шесть месяцев, чтобы рассмотреть случай с нулевой передачей импульса, тогда как я рассмотрел конечную и произвольную передачу импульса в течение одного вечера. Для меня это было весьма волнующим переживанием, подобным получению Нобелевской премии. Дело в том, что я, наконец, убедился, что у меня действительно есть некий метод и техника. Я понял, как надо проводить расчеты, тогда как все другие не знали этого. Это был мой триумф; я понял, что мне действительно удалось получить нечто ценное. В этот момент меня убедили опубликовать мой метод, так как каждый утверждал, что этот метод указывает легкий путь для проведения расчетов. Все хотели знать, как это нужно делать. Я вынужден был опубликовать это, опустив два пункта. Один из них состоял в математическом доказательстве каждого положения в общепринятом смысле. Часто, даже с физической точки зрения, я не мог показать, как получить все эти правила и уравнения

*) По-видимому, в целях простоты изложения Фейнман говорит здесь не совсем строго, опуская упоминание о матрице γ_5 и возможных производных $\partial/\partial x_\mu$. (*Прим. перев.*)

из обычной электродинамики. Но я действительно знал по своему опыту из многочисленных попыток, что на самом деле все это было эквивалентно обычной электродинамике. У меня было проведено несколько частичных доказательств тех или иных положений, хотя я никогда не пытался, подобно тому как Евклид заставлял это делать геометров в Греции, убедиться в том, что все это можно получить из одного простого набора аксиом. В конце концов работу раскритиковали, я не знаю, к счастью или к несчастью, и этот «метод» был назван «интуитивным методом». Однако для тех, кто еще не представил себе этого ясно, я хотел бы подчеркнуть, что необходимо проделать большую работу, прежде чем удастся успешно применить этот «интуитивный метод». Поскольку не было дано никакого простого ясного доказательства формул или идей, то надо было вновь и вновь проделывать необычно большое количество проверок правильности и согласованности с тем, что было уже известно, сравнивая с другими аналогичными примерами, с предельными случаями и т. д. Не имея прямого математического доказательства, надо быть очень осторожным и досконально проверять каждый пункт. Надо постоянно пытаться как можно полнее продемонстрировать правильность формулы. Очевидно, можно узнать намного больше истин, чем строго доказать их правильность.

Надо ясно понимать, что в течение всей этой работы я использовал обычную электродинамику с запаздывающим взаимодействием, а не мою полузапаздывающую, полуопережающую теорию, соответствующую (1). Я просто привлекал (1), чтобы делать разные предположения. Один из видов (1), предложенных мной, соответствовал замене δ на функцию f с шириной a^2. Это дало мне возможность получать конечные результаты для всех задач. Так мы приходим ко второму пункту, который был опущен, когда я опубликовал статью. До сих пор эта трудность не разрешена. Заменив δ на f, мы в результате вычислений получим ответ, который не «унитарен», т. е. сумма вероятностей всех возможностей не равна единице. Практически, отклонение от единицы было очень маленьким, если было мало a. В пределе весьма малых a это вообще не имело значения. Итак, можно было провести перенормировку, вычислить все в терминах экспериментальной массы и затем перейти к пределу. При этом очевидная трудность с временным нарушением унитарности, кажется, исчезает. Я не смог доказать этого, к тому же фактически унитарность нарушена.

К счастью, я не стал дожидаться, пока сумею доказать это; насколько я знаю, до сих пор никто еще не смог разрешить этот вопрос. Опыт работы с мезонными теориями с более сильными связями и с сильно взаимодействующими векторными фотонами, хотя он ничего и не доказывает непосредственно, убеждает меня в том, что когда связь становится сильнее, или когда вы переходите к более высоким порядкам теории возмущений (к 137-му порядку для электродинамики), то эта трудность остается даже при переходе к пределу и появляются разные неприятности. Я полагаю, что в действительности нет удовлетворительной квантовой электродинамики. Однако я не уверен в этом. Кроме того, я полагаю, что одной из причин того, что в понимании сильных взаимодействий в настоящее время столь медленный прогресс, является отсутствие какой бы то ни было релятивистской теоретической модели, с помощью которой можно было бы все вычислить. Обычно говорят, что трудность заключена в том, что сильные взаимодействия слишком сильны, чтобы можно было что-нибудь вычислить. Я же считаю, что эта трудность обусловлена тем, что в действительности сильные взаимодействия в теории поля не имеют решений, не имеют смысла — они или бесконечны, или же, если попытаться модифицировать их, в измененном виде нарушают унитарность. Я не думаю, что у нас имеется полностью удовлетворительная квантовомеханическая модель, хотя бы такая,

которая не согласуется с природой, но по крайней мере согласуется с требованием логики о равенстве суммы вероятностей всех возможных процессов единице. Поэтому я считаю, что теория перенормировок — это просто способ спрятать под плед трудности с расходимостями в квантовой электродинамике. Но я, конечно, не уверен в этом.

На этом завершается история развития пространственно-временно́й трактовки квантовой электродинамики. Интересно, можно ли чему-либо научиться из нее. Я сомневаюсь в этом. Наиболее поразительным является тот факт, что большинство идей, развитых в ходе этих исследований, в конечном счете не были использованы в окончательных результатах. Например, не был использован полузапаздывающий, полуопережающий потенциал, не была применена формула (1) для действия, была отброшена идея о том, что заряды не действуют сами на себя. Формулировка квантовой механики с помощью интегралов по путям оказалась полезной для получения окончательных выражений и построения общей теории в электродинамике новыми методами. Хотя, строго говоря, это не было абсолютно необходимым. То же самое относится и к идее о том, что позитрон — это движущийся назад во времени электрон. Она оказалась очень удобной, но не обязательно необходимой для теории, так как она в точности эквивалентна представлению о море отрицательных энергий.

Поразительно огромное множество различных физических точек зрения и весьма разных математических формулировок, которые оказываются эквивалентными друг другу. Поэтому примененный здесь метод, метод рассуждений на основе физических соображений, кажется весьма неэффективным. Оглядываясь назад на проделанную работу, я могу чувствовать только нечто вроде сожаления о том, что такое огромное количество физических идей и математических формулировок оканчивается простой переформулировкой того, что было известно ранее, хотя и выраженной в виде, который намного более пригоден для расчета конкретных задач. Не было ли легче работать полностью в рамках математики, чтобы получить более полезные формулы? Так, действительно, кажется. Однако следует отметить, что хотя решенная проблема и состояла только в такой переформулировке, но проблема, за которую взялись первоначально, была (возможно, все еще не решенной) проблемой устранения бесконечностей в обычной теории. Поэтому искали новую теорию, а не просто модификацию старой. Хотя поиски и не привели к успеху, имеет смысл обсудить вопрос о значении физических идей в развитии н о в о й теории.

Множество разных физических идей может описывать одну и ту же физическую реальность. Так, классическая электродинамика может быть описана с полевой точки зрения, с точки зрения действия на расстоянии и т. д. Первоначально Максвелл наполнял пространство направляющими колесами, а Фарадей — линиями поля. Однако сами уравнения Максвелла лежат в основе всего и не зависят от изменения слов, дающих физическое описание. Единственным истинно физическим описанием является описание экспериментального смысла величин, входящих в уравнение, или, лучше сказать, описание того, как надо использовать эти уравнения для трактовки экспериментальных результатов. В этом случае, по-видимому, лучше всего попытаться догадаться до уравнений и не обращать внимания на физические модели и описания. Например, МакКеллог догадался до правильных уравнений для распространения света в кристаллах задолго до того, как его коллеги, используя упругие модели, смогли понять это явление. Или еще, Дирак вывел свое уравнение для описания электрона из почти полностью математических утверждений. Все еще не существует простой физической точки зрения, которая охватывала бы все содержание этого уравнения.

Поэтому я думаю, что попытки отгадать уравнение, возможно, являются наилучшим способом определить законы той части физики, которая неизвестна в настоящее время. Когда я был значительно моложе, я пытался отгадывать уравнения; я видел многих студентов, пытавшихся делать это. Однако здесь очень легко сбиться с пути и пойти в абсолютно неверных и невозможных направлениях. Я думаю, что задача заключается не в том, чтобы найти наилучший или наиболее эффективный способ сделать открытие, а в том, чтобы вообще найти хоть какой-нибудь способ. Физические соображения, действительно, помогают некоторым лицам при формулировке предложений о том, как неизвестное может быть связано с известным. Теории известных явлений, которые описываются разными физическими идеями, могут быть эквивалентными во всех своих предсказаниях и, следовательно, научно неразличимыми.

Однако чисто психологически они совсем не тождественны попыткам продвинуться от известных теорий в область неизвестного. Дело в том, что различные точки зрения предлагают разные виды возможных модификаций теории. Следовательно, эти точки зрения различаются теми исходными гипотезами, которые должны привести к объяснению того, что было до сих пор неясно. Поэтому я думаю, что сегодня для хорошего физика-теоретика могло бы оказаться полезным наличие широкого диапазона физических точек зрения и математических формулировок одной и той же теории (например, квантовой электродинамики), которые он мог бы использовать. Может быть, требовать этого от одного человека слишком много. Тогда новые студенты, взятые все вместе, должны владеть этим. Если каждый студент следует одной и той же общепринятой линии при выражении и осмысливании электродинамики или теории поля, то разнообразие гипотез, которые могут быть выдвинуты, чтобы понять, скажем, сильные взаимодействия, будет ограничено. Возможно, что шансы того, что истина лежит в модном направлении, велики. Но кто уверен в этом? Может быть, она находится в другом направлении, развивающемся из немодной точки зрения теории поля. Это может понять только тот, кто пожертвовал собой, изучив квантовую электродинамику со своеобразной и необычной точки зрения, которую он, может быть, придумал сам для себя. Я говорю «пожертвовал собой», потому что наиболее вероятно, что он ничего не сможет извлечь из этого, так как истина может лежать в другом, возможно, и в самом модном, направлении.

Но если мой опыт что-нибудь да стоит, то жертва в действительности не так уже велика. Потому что, если принятая необычная точка зрения полностью эквивалентна обычной точке зрения в рамках известного эксперимента, то всегда существует область ее применимости к проблемам в той сфере, в которой эта новая точка зрения проявляет особую мощь и ясность мысли, которые ценны сами по себе. Более того, в поисках новых законов вы всегда чувствуете психологическое возбуждение от того, что, возможно, никто еще не думал над той безумной возможностью, на которую вы обратили сейчас свое внимание.

Так что же случилось со старой теорией, в которую я влюбился юношей? Я бы сказал, она превратилась в пожилую женщину, в которой осталось очень мало привлекательного; сердца молодых людей не забьются сегодня сильнее при встрече с ней. Но мы можем сказать ей лучшее из того, что можно сказать любой пожилой женщине: она была хорошей матерью и воспитала очень хороших детей. И я благодарен Шведской Академии наук за высокую оценку одного из них. Спасибо.

Калифорнийский
университет