

А. Пайс

ГЕНИИ НАУКИ

Перевод с английского Е. И. Фукаловой
Под редакцией к.ф.-м.н. С. Г. Новокшенова



Москва

2002

Интернет-магазин

MATHESIS

<http://shop.rcd.ru>

- физика
 - математика
 - биология
 - техника
-

Пайс А.

Гении науки. — Москва: Институт компьютерных исследований, 2002, 448 стр.

В этой книге Абрахам Пайс, сам являясь выдающимся физиком-теоретиком, рассказывает о других великих ученых, с которыми он был знаком.

На страницах этой книги мы встретим молчаливого Поля Дирака; Макса Борна, который придумал термин «квантовая механика»; Вольфганга Паули, известного своим принципом запрета; Митчелла Фейгенбаума, создателя теории хаоса, и Джона фон Неймана, одного из самых влиятельных математиков прошлого столетия. Не забыл Пайс также Альберта Эйнштейна и Нильса Бора, полные биографии которых он уже писал в отдельных книгах.

Книга полна исторических фактов, точных характеристик описываемых личностей и их научных достижений, а потому будет интересна широкому кругу читателей.

ISBN 5-93972-168-0

© Перевод на русский язык,
Институт компьютерных исследований, 2002

<http://rcd.ru>

Поль Дирак: аспекты его жизни и работы*

Из всех физиков, самая чистая душа — у Дирака.

Нильс Бор

В 1902 году литературный мир был свидетелем смерти Золя, рождения Джона Стейнбека, первых публикаций «*Собаки Баскервиллей*», «*Негодяя*» («*Immoralist*»), «*Трех сестер*» и «*Разновидностей религиозного опыта*». Моне написал «*Мост Ватерлоо*», Элгар** сочинил «*Блеск и Положение*». Карузо записал свою первую фонограмму, а Ирландский канал впервые был пересечен на воздушном шаре. В мире науки Хевисайд постулировал свой слой Хевисайда, Резерфорд и Содди опубликовали свою теорию превращений радиоактивных элементов, Эйнштейн начал работать клерком в патентном бюро в Берне, а 8 августа в Бристоле родился Поль Адриан Морис Дирак. Его отец, Чарльз Дирак, был уроженцем Монфи (Monthey), в швейцарском кантоне Валайс (Valais), а мать, Флоренция Холтен, — дочерью британского капитана. В семье было трое детей, брат Поля, Реджинальд, был на два года старше его, а сестра, Беатрис, — на четыре года моложе. Жизнь Реджинальда закончилась трагически. В 1924 году он покончил жизнь самоубийством. О своем отце Дирак писал:

Мой отец сделал правилом то, что я должен разговаривать с ним только по-французски. Он думал, что это хороший способ выучить французский язык. Но поскольку я обнаружил, что не могу выразить свои мысли на французском, то предпочитал молчать, но не говорить на английском. Так что я стал очень молчаливым — это началось очень рано².

*Обращение к Королевскому Обществу, Лондон, 13 ноября 1995 года, по случаю торжественного открытия мемориальной таблички Дираку в Вестминстерском Аббатстве.

**Элгар Эдуард (1857–1934), англ. композитор и дирижер. Деятель движения за возрождение традиций англ. нар. и старинной проф. музыки. Оратории (в т. ч. «Сновидение Геронтиуса», 1900), кантаты, оркестровые сочинения и др. — *Прим. перев.*

О самоубийстве брата:

Конечно, это было огромным шоком для нашей семьи. . . Я думаю, у него была сильная депрессия. Такая жизнь, какую вели мы, без дружеских связей и знакомств — была очень удручающей как для него, так и для меня. А иметь младшего брата, который был толковее, чем он, должно было тоже добавить отчаяния. . . Я, например, был первым учеником в классе по прикладным наукам, а он третьим. Он получил работу по инженерной специальности в центральных графствах Англии, в Ковентри. В течение какого-то времени они вместе с Уолвером Хамптоном приезжали домой. Я думаю, ему должно было нравиться приезжать домой, хотя там не было большой возможности социальных контактов, потому что каким бы маленьким ни был отпуск, он немедленно мчался в Бристоль и проводил там столько времени, сколько отпускалось на отдых. . . У него была девушка. . . [После смерти Реджиальда] мой отец предложил пригласить ее погостить у нас, но мама сказала: «Нет», потому что боялась, что она могла увлечься мной. . . Мне тогда было 22 года, и мама считала, что в этом возрасте меня еще нужно защищать от девушек. Я негодовал по этому поводу, но девушку, в результате, так и не пригласили. . .

Со смертью брата была связана какая-то тайна, потому что за три месяца до смерти он ушел с работы, и никто не смог выяснить, чем он занимался эти три месяца. Он не сказал хозяйке комнаты, которую снимал, что оставил работу. Он продолжал регулярно уходить рано утром и приходил вечером. Он продолжал регулярно вносить арендную плату. Он просто тратил свои собственные сбережения. Когда деньги кончились, он убил себя. Полиция вела интенсивное расследование, но так и не смогла выяснить, что он делал последние три месяца. . .

Мы не переписывались друг с другом. Фактически, мы в течение долгих лет не разговаривали по душам. . . И одна из причин была в том, что мы должны были говорить по-французски, или мы попадали в немилость, и это была одна из причин замкнутости².

Такая вот семейная жизнь.

Книга Дирака «*Принципы квантовой механики*» в своем первом издании стояла на моей книжной полке, еще когда я заканчивал учебу в Голландии. Я никогда не забуду, как восхищала меня красота и сила его компактных уравнений. Через много лет, в январе 1946 года, состоялась моя первая встреча с Дираком и его женой. Я нанес им краткий визит в Кембридже, где они жили на Кавендиш Авеню, 7. Осенью того же года мы вновь встретились в Принстоне, в Институте перспективных исследований. Он провёл там академический год 1934–35 и осенний семестр 1946 года.

когда я тоже там находился. Затем учебные годы: 1947–48, 1958–59 и 1962–63. Благодаря этим визитам в Принстон, я довольно хорошо узнал Дирака. Мы стали друзьями. В ходе наших бесед, прогулок и выездов в лес за дровами я хорошо узнал его взгляды на физику. Я встречал его и позднее, особенно часто в Таллахасси, где в 1972 году в возрасте 70-ти лет он начал новую карьеру: профессора физики в университете штата Флорида.

Я расскажу об этих встречах с Дираком и своих впечатлениях о его личности, но сначала мне бы хотелось поговорить о его научной деятельности.

Маленький Пол сначала посещал начальную школу Бишоп Роуд (Bishop Road), затем, когда ему исполнилось 12 лет, начал получать среднее образование в Техническом колледже Мерчент Вентчез (Merchant Ventur's). Обе школы находились в Бристоле, где отец Поля работал преподавателем французского языка. Много позднее Дирак вспоминал: «[Это] была отличная школа, где хорошо преподавались наука и современные языки. Там не было ни латыни, ни греческого, чему я был рад, потому что не понимал ценности древних культур. . . Я играл в футбол и в крикет. . . впрочем, без особого успеха. Но на протяжении школьных лет во мне рос и стимулировался интерес к науке»³.

В 1918 году по предложению отца Дирак поступил на факультет электротехники Бристольского университета, который с отличием окончил в 1921 году. Через сорок лет он написал:

Я бы хотел объяснить, какое влияние оказала на меня учеба на инженерном отделении. Я не работал конкретно по данной специальности после окончания университета, но эта учеба в большой степени изменила мой подход к науке в целом. Прежде меня интересовали лишь точные уравнения. Инженерная же подготовка, которую я прошел, научила меня терпимо относиться к приближениям. И я увидел, что даже те теории, которые основываются на приближениях, могут порой содержать в себе достаточно много красоты. Я думаю, что если бы не эти годы учебы на инженерном факультете, то я не преуспел бы в той деятельности, которой занимался позднее. . . В своей более поздней работе я продолжал использовать, главным образом, нестрогую математику инженеров, и я думаю, вы увидите, что большинство моих более поздних работ действительно не включают в себя строгую математику. . . Чистый математик, который хочет организовать всю свою работу с абсолютной точностью, вряд ли далеко продвинется в физике^{4,5}.

Во время учебы на инженерном факультете

произошло замечательное событие. Относительность потрясла мир... Нетрудно увидеть причину этого события, оказавшего огромное воздействие. Мы только что пережили ужасную и очень серьезную войну... Все хотели одного — забыть о ней. И тут появилась относительность. Это было бегство от войны.

Когда я был школьником, меня очень интересовало соотношение между пространством и временем. Я много размышлял об этом. Для меня было очевидным, что время очень похоже на другое измерение. И мне вдруг пришло в голову, что между пространством и временем может быть какая-то связь и что нам нужно рассматривать их с общей четырехмерной точки зрения. Но единственной геометрией, которая была мне тогда известна, была евклидова геометрия⁴.

В 1921 году Дирак безуспешно пытался найти работу по специальности инженера. Затем, на его счастье, ему предложили бесплатно изучать математику в Бристольском университете в течение двух лет.

Эти годы были завершающими в том, что можно назвать прелюдией научной карьеры Дирака.

Осенью 1923 года Дирак был зачислен в Кембридж со стипендией от Департамента Научных и Промышленных Исследований. Через девять лет он сменил Джозефа Лармора и возглавит кафедру математики в Кембридже, когда-то возглавляемую Ньютоном⁵. Со старой квантовой теорией Дирака познакомил Ральф Фаулер. Это случилось, когда Дирак учился в Кембридже. В это же время он впервые узнал об атоме Резерфорда, Бора и Зоммерфельда.

В мае 1925 года Дирак впервые встретился с Бором, когда последний читал в Кембридже лекцию о фундаментальных проблемах и трудностях квантовой теории. Дирак позднее вспоминал об этом так:

Люди были в значительной степени зачарованы тем, что говорил Бор... На меня он произвел большое впечатление, но его аргументы носили, в основном, качественный характер, и я не мог найти факты за его аргументами. Я хотел утверждений, которые могли бы быть выражены языком уравнений, а в работе Бора таких утверждений было мало. Я, в действительности, не уверен, насколько велико было то влияние, которое лекции Бора оказали на мою дальнейшую работу... Определенно, он не оказал прямого влияния, потому что не побуждал к поискам новых уравнений⁴.

В июле 1925 года Дирак впервые встретился с Гейзенбергом, это тоже произошло в Кембридже. В этом месяце вышла первая

работа Гейзенберга по квантовой механике. «Об этой теории Гейзенберга я узнал в сентябре. Сначала мне было очень трудно оценить ее по достоинству. На это потребовалось две недели. Затем я вдруг осознал, что некоммутативность — это, в действительности, самая значительная идея Гейзенберга»⁷. Результатом этого осмысления стала первая работа Дирака по квантовой механике⁸. До этого времени он уже опубликовал семь достойных уважения работ, которые не вызвали какого-либо определенного отклика. Но его работа номер восемь вызвала потрясение. Она содержала соотношение $pq - qp = h/2\pi i$, которое незадолго до того независимо вывели Борн и Иордан. Уважаемые авторы не знали о результатах исследований друг друга. Когда Борн получил статью Дирака, он описал свою реакцию следующим образом: «Это было — я хорошо помню — одно из величайших изумлений в моей научной жизни. Поскольку имя Дирака было мне абсолютно неизвестно, автор оказался молод, но все в его работе было безупречно и достойно восхищения»⁹.

В те дни Дирак изобрел несколько обозначений, ставших сейчас частью нашего языка: q -числа, где q — это квант или, возможно, странный (queer); c -числа, c — это классический или, возможно, коммутирующий»⁴. Свой рабочий режим в это время Дирак впоследствии описывал так: «В течение недели интенсивные размышления над этими проблемами, в воскресенье — отдых: прогулка за город в одиночестве»⁴. Дирака всегда влекла красота природы, особенно он любил горы. Он любил совершать восхождения и практиковался, взбираясь на деревья на холмах Гог-Магог в окрестностях Кембриджа, даже тогда в своем вечном темном костюме. Он избегал технических восхождений, но, тем не менее, поднимался на впечатляющие вершины в Скалистых Горах, Альпах и на Кавказе. В 1936 году ему вместе с Игорем Таммом удалось совершить восхождение на вершину Эльбруса высотой 5640 метров, самый высокий пик Европы. Но на большой высоте он занемог и вынужден был отдыхать 24 часа, прежде чем завершить спуск¹⁰.

В мае 1926 года Дирак защитил кандидатскую диссертацию по теме «Квантовая механика»¹¹. В это же время появились работы Шредингера по волновой механике, первоначальной реакцией Дирака на которые было неприятие, сменившееся затем энтузиазмом. Он быстро применил эту теорию к системам тождественных частиц¹². Почти в это же время эта проблема привлекла внимание Гейзенберга¹³, который сконцентрировал свое внимание на системах с несколькими микрочастицами. В результате появилась его работа по теории атома гелия¹⁴. Работа Дирака¹² (август 1926 года), с другой стороны, запомнится как первая, в которой

квантовая механика была соединена со статистикой. Вспомните, что самая ранняя работа по квантовой статистике — это работа Бозе и Эйнштейна — предшествует квантовой механике. Кроме того, введение Ферми принципа запрета в статистических задачах, хотя и опубликованное¹⁵ после появления квантовой механики, все еще рассматривается в контексте «старой» квантовой теории¹⁶. Под все эти достижения Дирак подвел соответствующее квантово-механическое обоснование. Дирак был, фактически, первым, кто дал правильное обоснование закона Планка, с которого все началось: «Симметричные собственные функции. . . дают в точности статистическую механику Эйнштейна–Бозе. . . , (которая) ведет к планковскому закону излучения абсолютно черного тела»¹².

Поучительно вспомнить, что потребовалось еще некоторое время, чтобы определить, когда применима статистика Бозе–Эйнштейна, а когда — Ферми–Дирака. Дирак в августе 1926 года писал: «Решение с антисимметричными собственными функциями (статистика Ф. Д.) . . . возможно, является верным для молекул газа, поскольку известно, что оно верно для электронов в атоме. Следует ожидать, что молекулы будут иметь сходство с электронами гораздо в большей степени, чем со световыми квантами»¹². Другие известные физики не сразу заняли ясную позицию в отношении этого вопроса. Среди них: Эйнштейн, Ферми, Гейзенберг и Паули¹⁶.

Получив докторскую степень, Дирак мог свободно путешествовать, и в сентябре 1926 года он отправился в Копенгаген. «Я в большой степени восхищался Бором. У нас были долгие беседы, во время которых говорил, главным образом, Бор»⁴. Именно там он разработал теорию канонических преобразований в квантовой механике, известную с тех пор как теория преобразований¹⁷. «Я думаю, что из всех трудов моей жизни этот доставил мне самое большое удовольствие. . . Теория преобразований стала моей возлюбленной»⁷. В этой работе Дирак впервые ввел важный инструмент современной физики, δ -функцию, о которой сразу же сказал: «Строго говоря, $\delta(x)$ не является, конечно, собственно функцией x , но может считаться пределом определенной последовательности функций. Тем не менее, практически для целей квантовой механики можно, без искажения результатов, использовать $\delta(x)$ как обычную функцию»¹⁸.

Пребывание Дирака в Копенгагене — до февраля 1927 года — тоже в высшей степени памятно. Именно в это время он завершил первую¹⁹ из двух работ, в которых заложил основы квантовой электродинамики. Продолжение²⁰ было написано в Геттингене, который был следующей важной остановкой в его путешествии.

Этим двум работам предшествовала¹² теория индуцированных радиационных переходов, где атомы рассматривались с квантово-механической точки зрения, но максвелловское поле по-прежнему считалось классической системой²¹. Тем не менее, «нельзя учесть спонтанную эмиссию, не имея более точной теории»¹². Здесь Дирак повторил Эйнштейна, который уже в 1917 году, еще в дни старой квантовой теории, подчеркивал, что спонтанная эмиссия «почти неизбежно ведет к формированию истинно квантовой теории излучения»²². Именно это и сделал Дирак в своей копенгагенской работе¹⁹. Он перешел к квантованию электромагнитного поля, дав, тем самым, первое рациональное описание световых квантов, а затем из первых принципов вывел феноменологический коэффициент спонтанной эмиссии Эйнштейна²³.

Но теория, тем не менее, еще не была завершена: «Радиационные процессы... в которых принимает участие одновременно более одного светового кванта, не учитываются в этой теории»¹⁹. Какой молодой все еще была квантовая механика! В начале 1927 года Дирак еще не знал, что эти процессы безупречным образом включены в его теорию. Все, что требовалось сделать для их учета, — это расширить теорию возмущений от первого порядка (используемого им при рассмотрении спонтанной эмиссии) до второго. Так, в своей геттингенской работе²⁰ он разработал²⁴ теорию возмущений второго порядка, что привело его к квантовой теории рассеяния²⁵. Далее он отмечал²⁶, что эту теорию можно также применить к эффекту Комптона, — эта тема интересовала его ранее²⁷.

В Геттингене Дирак встретил Роберта Оппенгеймера, проживающего в том же пансионе. Они стали близкими друзьями. Дираку было очень трудно понять католические интересы Оппенгеймера, который проводил много времени за чтением Данте в оригинале. Говорят, Дирак однажды спросил Оппенгеймера: «Как ты можешь совмещать физику с поэзией? В физике мы пытаемся на простом языке объяснить то, о чем никто не знал раньше. В поэзии же — все в точности наоборот».

В 1927 году Дирак был избран членом совета колледжа Св. Иоанна в Кембридже и начал читать лекции по квантовой механике. В 1929 году он был назначен старшим лектором по математике и физике — должность, лишь с номинальными обязанностями. В 1930 году он избран членом Лондонского Королевского Общества. 30 сентября 1932 года Дирак становится профессором Кембриджского университета, и эту должность он будет занимать

до 1969 года. Его книга по квантовой механике сложилась из лекций, прочитанных студентам. В 1930 году появилось ее первое издание. Могу отметить, что всего Дираком было опубликовано около 200 работ.

Лишь малую часть своих служебных обязанностей Дирак посвящал преподаванию и не брал на себя никаких административных обязанностей. Он предпочитал работать в одиночестве и не создал никакой школы. О нем писали, что это был один из немногих ученых, способных работать даже на необитаемом острове²⁸. И хотя не в его характере было разыскивать студентов-исследователей, он все же был руководителем значительного количества кандидатских диссертаций²⁹.

Когда Дирак писал научную статью или читал лекцию, он не считал нужным изменять свои тщательно отобранные фразы. Когда кто-нибудь из аудитории просил его разъяснить тот или иной пункт, который был не понятен, Дирак повторял в точности то, что сказал раньше, используя те же самые слова³⁰. Как бы то ни было, стиль его лекций был достоин восхищения. Я имел счастье часто отмечать это. Кто-то из его студентов выразился так по этому поводу: «Его речь всегда была исключительно ясной, и увлекательное развертывание аргументации казалось таким же величественным и неминуемым как развитие темы в фуге Баха»³¹. Но, тем не менее, я вынужден согласиться с сэром Невилом Моттом, который сказал: «Я должен отметить тот факт, что его влияние как преподавателя было невелико. . . Он никогда не советовал студенту рассмотреть экспериментальные данные и понять, что это значит. . . Он никогда, посреди своих великих открытий, не решал насущные задачи. Его это совсем не интересовало»³².

Я возвращаюсь к 1927 году. Итак, Дирак в Геттингене. Оттуда он направился в Лейден и завершил свое путешествие в этом году, приехав в октябре в Брюссель на Сольвеевский конгресс. Там он впервые встретил Эйнштейна. Из разговоров с Дираком я знаю, что он восхищался Эйнштейном. Уважение было взаимным («. . . Дирак, которому, по моему мнению, мы обязаны самым совершенным, в логическом смысле, представлением (квантовой механики)»³³). Но связь между ними была минимальной, я думаю, причиной этому была личность Дирака, который не искал себе покровителя и вдохновителя.

Сольвеевский конгресс 1927 года отличает начало хорошо известного спора между Бором и Эйнштейном по интерпретации квантовой механики. Через пятьдесят лет Дирак сказал: «Эта за-

дача интерпретации оказалась гораздо более трудной, чем просто вывод уравнений»⁷. По прошествии времени он выразил сомнения не только в отношении обычной квантовой теории поля, но и в отношении обычной квантовой механики^{34,35}, но яснее всего он высказался по этому поводу в 1979 году, когда мы оба были в Иерусалиме на праздновании столетия Эйнштейна:

Я не принимал большого участия в том споре между Эйнштейном и Бором на Сольвеевской конференции [в 1927 году]. Я выслушивал аргументы, но не ввязывался в спор, главным образом, потому что меня это мало интересовало. В большей степени меня интересовал вывод правильных уравнений. Мне казалось, что основой работы физика-математика должно быть получение верных уравнений, а не интерпретация этих уравнений — это уже второстепенный вопрос. . . Кажется ясным, что сегодняшняя квантовая механика еще не достигла завершенности. . . Я думаю, что весьма вероятно, или, по крайней мере, вполне возможно, что, в конце концов, Эйнштейн окажется прав, хотя сейчас физикам приходится принимать интерпретацию вероятности Бора, особенно если им предстоит сдавать экзамены³⁶.

Позже я еще прокомментирую позицию Дирака.

Дирак вспоминал свой разговор с Бором во время Сольвеевской конференции 1927 года. Бор: «Над чем Вы работаете?» Дирак: «Пытаюсь разработать релятивистскую теорию электрона». Бор: «Но Клейн уже решил эту задачу»³⁶.

Дирак с этим не согласился.

Ко времени Сольвеевской конференции 1927 года уже было известно релятивистское волновое уравнение: скалярное уравнение, независимо сформулированное, по крайней мере, шестью авторами, среди которых были Клейн и Шредингер. Но, тем не менее, казалось невозможным связать положительную определенную плотность вероятности с этим уравнением. Это совсем не нравилось Дираку, существование такой плотности было (и остается) центральным элементом его теории преобразований. «Теория преобразований стала моей возлюбленной. Меня не интересовало рассмотрение ни одной теории, которая не подходила бы к моей возлюбленной теории. . . Я просто не мог даже подумать о том, чтобы отбросить теорию преобразований»⁷. Вот почему Дирак был не согласен с Бором. Поэтому он начал собственный поиск релятивистского волнового уравнения, для которого можно было определить неотрицательную плотность вероятности. И он

не только нашел его, но в ходе поиска он также открыл релятивистскую квантово-механическую трактовку спина.

Это было главным новшеством. В мае 1927 года Паули предположил, что электрон удовлетворяет двухкомпонентному волновому уравнению, которое содержит спин электрона, явно связанный с орбитальным кинетическим моментом электрона. Ничто не определяло силу этой связи, тот самый «коэффициент Томаса», который должен был быть введен искусственно, «без дальнейшего обоснования». Этот дефект, отмечал Паули, был следствием того, что данное уравнение не отвечало требованиям относительности. Теория, по его словам, была предварительной и приближительной.

В своем уравнении Паули описал спин матрицами 2×2 , известными с тех пор как матрицы Паули. Оказывается, Дирак открыл их независимо от Паули: «Я считаю, что я получил их (матрицы) независимо от Паули, и, возможно, Паули тоже получил их независимо от меня»⁴. Не прекращая поиск релятивистского волнового уравнения с положительной плотностью вероятности, Дирак продолжал играть³⁹ со спиновыми матрицами.

Мне потребовалось достаточно много времени... прежде чем я вдруг осознал, что нет необходимости придерживаться количества... лишь двух строк и столбцов. Почему бы не перейти к четырем строкам и столбцам⁴.

Достаточно долго в данном случае — это лишь несколько недель. До конца своей жизни Дирак вспоминал: «Ретроспективно кажется странным, что можно так надолго задержаться на таком элементарном пункте (!)»⁴⁰.

Таким образом, в начале 1928 года появилось уравнение Дирака^{41,42} с положительной плотностью, которого так горячо желал автор. Но, к его удивлению, он наткнулся на нечто, гораздо большее.

Оказалось, что это уравнение описывает частицу со спином $1/2$. Кроме того, оно дает ей магнитный момент. Из этого уравнения получались те свойства, которые требовались для электрона. Это действительно было неожиданной наградой для меня, абсолютно неожиданной⁷.

Спин был необходимым следствием, магнитный момент и формула тонкой структуры Зоммерфельда получались правильными, автоматически появился коэффициент Томаса; и были восстановлены все результаты нерелятивистской теории Шредингера для кинетических энергий — малых по сравнению с mc^2 (m — масса электрона). Дирак играл увлеченно и хорошо. Его открытие («как только вы выбрали правильный путь, открытие само находит вас, без всяких усилий с вашей стороны»⁴³), одно из высших достижений науки XX века. еще более примечательно. так как

оно было сделано в поисках положительной вероятности — того, что, в конце концов, оказалось побочной задачей⁴⁴.

Но помимо того, что уравнение Дирака было грандиозным успехом, оно же в течение нескольких лет не давало покоя, став причиной новых поисков.

Волновые функции Паули имеют два компонента, соответствующих направлению спина — вверх и вниз. Но волновые функции Дирака имели четыре компонента. Вопрос: почему четыре? привел к колоссальной путанице, о которой в 1960-х годах Гейзенберг вспоминал так: «До этого времени [1928 год] у меня было впечатление, что в квантовой теории мы пришли в гавань, в порт. Работа Дирака вновь выбросила нас в открытое море»⁴⁵.

С самого начала⁴¹ Дирак правильно определил причину этого удвоения числа компонент: две компоненты с положительной энергией и две — с отрицательной, в каждой паре есть спин, направленный вверх, и спин, направленный вниз. Что делать с решениями с отрицательной энергией? «В классической теории эта трудность преодолевается произвольным отбрасыванием решений с отрицательной энергией. В квантовой теории этого делать нельзя, поскольку под влиянием общего возмущения возможны переходы между состояниями с положительной и отрицательной энергиями»⁴¹. Дирак продолжил рассуждение: состояния с отрицательной энергией могут быть связаны с частицами, заряд которых противоположен заряду электрона. Тогда Дирак еще точно не знал, о чем он говорит, об этом он узнал лишь полтора года спустя. Эта зарождающаяся идея позволила ему сначала легко отнестись к задаче: «Половину состояний можно отбросить как относящиеся к заряду $+e$ электрона»⁴¹. Но в июне 1928 года в своем лейпцигском докладе он уже не говорил о таком отказе. Переходы к состояниям с отрицательной энергией просто невозможно было игнорировать. «Следовательно, настоящая теория является приближением»⁴⁶.

Будучи в Лейпциге, Дирак, конечно же, наведаясь к Гейзенбергу (он недавно получил туда назначение), который должен был быть хорошо осведомлен об этих трудностях. В мае Гейзенберг писал Паули: «Чтобы Дирак меня постоянно не раздражал, я занялся, для разнообразия, другим»⁴⁷. Этим другим была его квантовая теория ферромагнетизма. Дирак и Гейзенберг обсудили несколько аспектов этой новой теории⁴⁸. Вскоре после этого Гейзенберг вновь писал Паули: «Теория Дирака остается самой печальной главой в современной физике»⁴⁹, он упомянул о собственной работе, которая выказывала трудности, и добавил, что магнитный электрон нагоняет *trübsinnig* (грусть) на Иордана. Примерно в это же самое время Дирак, испытывая те же чувства, писал Оскару Клей-

ну: «Мои попытки решить проблему $\pm e$ безуспешны. Гейзенберг (с которым я встретился в Лейпциге), думает, что задача не будет решена, пока не появится единая теория протона и электрона»⁵⁰.

В начале 1929 года Дирак и Гейзенберг совершили свою первую поездку в Соединенные Штаты. Дирак должен был читать лекции в университете Висконсина, а Гейзенберг — в университете Чикаго. В августе того же года они взойшли на палубу парохода *Shinyo Maru* в Сан-Франциско, сделали остановку на Гавайях⁵¹ и затем поплыли в Японию, где оба читали лекции в Токио и Киото. Мне стало любопытно, обсуждали ли они проблематику уравнения Дирака во время путешествия. Я спросил об этом Дирака. Он ответил:

В 1929 году мы с Гейзенбергом пересекли Тихий океан и работали вместе какое-то время в Японии, но никаких специальных дискуссий не вели. Нам обоим просто хотелось отдохнуть, в том числе и от физики. Мы не говорили на тему физики за исключением тех лекций, которые читали в Японии. Мы слушали лекции друг друга. Я не помню, что говорилось в этих случаях, но помню, что между нами было согласие⁵².

Гейзенберг рассказал мне историю, которая произошла во время путешествия и которая представляет редкий случай взглянуть на отношение Дирака к противоположному полу:

Мы плыли из Америки в Японию, и мне понравилось участвовать в жизни парохода. Я, например, танцевал по вечерам. Полно почему-то это не очень нравилось, но он сидел на стуле и смотрел на танцующих. Однажды после очередного танца я присел рядом с ним, и он спросил: «Гейзенберг, почему ты танцуешь?» Я ответил: «Ну, здесь есть милые девушки, с которыми приятно танцевать». Он долго обдумывал это и минут через пять спросил: «Гейзенберг, а откуда ты *заранее* знаешь, что они милые?»⁵³.

Между тем Вейль высказал⁵⁴ новое предположение относительно двух лишних компонент: «Мне кажется вполне возможным, что из двух пар компонент Дирака одна принадлежит электрону, а другая — протону». В декабре 1929 года Дирак (снова в Кембридже) не согласился⁵⁵: «Нельзя просто заявить, что электрон с отрицательной энергией *является* протоном, поскольку если бы электрон перепрыгнул из состояния с положительной энергией в состояние с отрицательной энергией, это нарушило бы закон сохранения заряда»⁵⁶. Скорее, «давайте допустим. . . , что все состояния с отрицательной энергией заняты, кроме, возможно, нескольких с очень маленькой скоростью», эти одночастотные состояния заняты, согласно принципу Паули, поодиночке электронами с отрицательной энергией. Представьте, что один такой электрон с отрицательной энергией убрали, оставив тем самым

дырку в исходном распределении. В результате мы имеем подъем в энергии и заряде на одну единицу. Эта дырка, отмечал Дирак, ведет себя как частица с положительной энергией и положительным зарядом. Это рассуждение привело нас к предположению о том, что дырки в распределении электронов с отрицательной энергией являются протонами»⁵⁶.

Отождествление дырок с частицами прекрасно, но почему протоны? Дирак позднее говорил: «В то время... все были уверены в том, что электроны и протоны являются единственными элементарными частицами в Природе»⁵⁷. (Вспомните, что в 1929 году все еще считалось, что атомное ядро состоит из протонов и электронов!⁵⁷)

Непосредственно перед тем, как представить свою работу, Дирак написал письмо Бору, которое показывает, что он хорошо знал, что, по крайней мере, в отсутствие взаимодействий его дырки должны обладать такой же массой, как и сами электроны. Его надеждой (тщетной) было то, что это равенство будет нарушено электромагнитными взаимодействиями:

Пока взаимодействие игнорируется, между электронами и протонами устанавливается полная симметрия; можно отнести протоны к реальным частицам, а электроны — к дыркам в распределении протонов с отрицательной энергией. Тем не менее, когда берется в расчет взаимодействие между электронами, эта симметрия нарушается. Я еще не сделал математические вычисления последствий взаимодействия... Но можно надеяться, что правильная теория этого позволит вычислить соотношение масс протонов и электрона.

В действительности, «полная симметрия», о которой писал Дирак, инвариантность зарядового сопряжения распространяется и на электромагнитные взаимодействия. Нуждаясь в более хорошей методике, Дирак пока рассматривал массу m в этом уравнении как среднее значение массы протона и электрона⁶⁰.

Вся теория была в таком вот неуклюжем состоянии, когда Дирак докладывал о ее существующем состоянии на встрече Британской Ассоциации по Развитию Науки в Бристоле. Как писала «*Нью-Йорк таймс*», он привел аудиторию в замешательство, — и неудивительно. «Позднее доктора Дирака попросили обсудить эту теорию, но он покачал головой, сказав, что не может выразить то, что имеет в виду, более простым языком, не нарушив при этом точность».

Путаница продолжалась до 1930 года, когда сначала Оппенгеймер, а затем, независимо от него, Тамм⁶³ заметили, что предположение о протоне делает все атомы нестабильными из-за процесса: протон + электрон → фотоны. В ноябре 1930 года Вейль занял новую позицию⁶⁴ в отношении протонов:

Какой бы привлекательной ни показалась сначала эта идея, ее, конечно, невозможно поддержать без введения других глубоких модификаций. . . действительно, согласно теории о дырках, масса протона должна быть такой же, как масса электрона; кроме того. . . эта гипотеза ведет к необходимой эквивалентности отрицательного и положительного электричества при всех обстоятельствах. . . различие двух видов электричества, таким образом, кажется, скрывает тайну природы, лежащую еще глубже, чем различие между прошлым и будущим. . . Я боюсь, что тучи, нависшие над этой частью нашего вопроса, стуются и образуют новый кризис в квантовой физике.

Затем, в мае 1931 года Дирак сделал «удачный выстрел»⁶⁵ (по его словам, «маленький шаг» вперед⁴³): «Дырка, если она есть, — это новый тип частицы, неизвестной экспериментальной физике и имеющей ту же массу, что и электрон, и заряд, противоположный электрону». Дирак, в конце концов, назвал новую частицу антиэлектроном. И накануне Нового года Карл Андерсон сделал первое заявление об экспериментальном доказательстве существования антиэлектрона. В его поздних работах впервые появилось название «позитрон»⁶⁷. Предсказание существования позитрона и его последующее открытие причисляют к великим триумфам современной физики.

Это, тем не менее, не сразу стало очевидным.

Обнаружение позитрона почти всеми рассматривалось как подтверждение теории Дирака. Но основная идея, позитрон в качестве дырки в бесконечном море отрицательных электронов, не удовлетворяла некоторых ученых, и на то были причины. Даже самое простое состояние, состояние вакуума, — это комплекс, в который входит бесконечное множество частиц, абсолютно заполненное море. Если не учитывать взаимодействия между этими частицами, то вакуум обладает отрицательной бесконечной «нулевой энергией» и бесконечным «нулевым зарядом». Паули это не нравилось. Даже после того, как был обнаружен позитрон, он писал Дираку: «Я не верю в Ваше понимание «дырок», даже если доказано, что существует «антиэлектрон»»⁶⁸. Но это было не все. Через месяц Паули пишет Гейзенбергу: «Я не верю в теорию дырок, поскольку мне бы хотелось иметь асимметрии между положительным и отрицательным электричеством в законах природы (меня не удовлетворяет сдвиг эмпирически установленной асимметрии в сторону одного из начальных состояний)»⁶⁹.

Нулевые энергия и заряд, в действительности, не представляют никакого вреда теории. Они могут быть уничтожены просто ее переформулировкой⁷⁰. Но даже после того теория еще пестрит бесконечностями, причиной которых являются взаимодействия. И по сей день влияние взаимодействий невозможно

учесть строго. Вместо этого используют тот факт, что фундаментальный заряд e мал или, точнее, что мало безразмерное число $\alpha = e^2/\hbar c \cong 1/137$ и ведут разложение по его степеням. В главном порядке по α теоретические предсказания были отличными для таких процессов, как рассеяние фотоэлектронов, рождение и исчезновение электрон-позитронных пар, и многих других. Но что касается вкладов в те же самые процессы, происходящие от более высоких порядков в разложении по степеням α , то они неизменно расходящиеся. Вопрос: как справиться с теорией, которая очень хорошо работает приблизительно, но не имеет смысла при строгом рассмотрении? Как сказал об этом Паули в 1936 году во время проводимого им семинара в Принстоне: «Успех был, скорее, на стороне Дирака, а не на стороне логики»⁷¹. Или, как это выразил Гейзенберг⁷² в письме Паули (1935 год): «В отношении квантовой электродинамики, мы все еще на той стадии, на которой были в 1922 году в отношении квантовой механики. Мы знаем, что все неверно. Но чтобы найти то направление, в котором нам следует отправиться от того, что превалирует, мы должны знать последствия превалирующего формализма гораздо лучше, чем мы их знаем». Гейзенберг, кстати, был одним из тех немногих физиков-теоретиков, которые имели достаточно мужества для исследования тех аспектов электродинамики, которые оставались в состоянии неопределенности до конца 40-х годов, когда перенормировки позволили подойти к решению этой проблемы более систематическим и успешным способом.

Первые шаги к перенормировке опять принадлежат Дираку. В августе 1933 года он писал⁷³ Бору:

Пайерс и я рассматриваем вопрос об изменении в распределении электронов с отрицательной энергией, производимом статическим электрическим полем. Мы находим, что это измененное распределение производит поле, которое служит причиной частичной нейтрализации заряда. . . Если мы пренебрежем возмущением, которое поле производит среди электронов с отрицательными энергией, меньшей $-137mc^2$, тогда нейтрализация заряда, производимая другими электронами с отрицательной энергией, мала — порядка $136/137$. . . Эффективные заряды — это те, что измеряются во всех экспериментах малой энергии; экспериментально определенное значение e должно быть эффективным зарядом на электроны, а действительное значение — чуть больше. . . Следует ожидать некоторых небольших изменений в формуле рассеяния Резерфорда, формуле Клейна–Нишины, формуле тонкой структуры Зоммерфельда, и т. д., когда в действие вступают энергии порядка mc^2 .

Перепишем это современным языком: эффективный заряд Дирака — это наш физический заряд, его действительный заряд — наш голый заряд, его нейтрализация заряда — это наша перенорм-

мировка заряда; его возмущение, которое поле производит среди электронов с отрицательной энергией, — наша поляризация вакуума⁷⁴.

Результаты, о которых Дирак говорит в письме к Бору, получили количественное оформление в его докладе⁷⁵ на седьмой Сольвеевской конференции (октябрь 1933 года). Эта работа отмечает начало позитронной теории в качестве серьезной дисциплины. Там же Дирак дает окончательное выражение поляризации вакуума⁷⁶, которое в 1935 г. было вычислено Юлингом⁷⁷ для электрона в водородоподобном атоме, что стимулировало знаменитые эксперименты по лэмбовскому сдвигу в 1946 году.

Докладом Дирака на Сольвеевской конференции в октябре 1933 года завершается восьмилетний период огромного творческого прилива, значительно раздвинувшего границы физики.

1925–33 годы являются героическим периодом жизни Дирака, в течение которого он проявил себя одним из ведущих представителей физики двадцатого века и изменил лицо этой науки. Он сам назвал эти годы своей научной карьеры «волнующей эрой»⁷⁸. Мой беглый рассказ об этом периоде далеко не полон. Например, в 1931 году Дирак впервые применил⁶⁵ общую топологию к физике, доказав, что существование изолированных магнитных зарядов (монополей Дирака) предполагает, с квантово-механической точки зрения, что электрический заряд квантуется. Он возвратился к этой теме через 20 лет⁷⁹ (он читал лекцию по этой теме⁸⁰ на конференции в Поконо, которая проходила с 31 марта по 1 апреля 1948 года). Затем он вновь вернулся к этой теме почти 30 лет спустя. Как видите, Дирак занимал активную позицию в науке в течение 50 лет, следующих за достижениями, подошедшими к своему завершению в 1933 году.

Я позднее вкратце изложу суть более поздних трудов Дирака, а сейчас мне хотелось бы несколько прокомментировать его личную жизнь в 30-е годы.

В 1933 году Дирак получил Нобелевскую премию «За открытие новых плодотворных направлений развития атомной теории и их применение», разделив награду со Шредингером. «Сначала он был готов отказаться от премии, потому что не любил привлекать к себе внимание, но когда Резерфорд сказал ему, что «его отказ привлечет к нему еще больше внимания», он принял награду»⁸². В это время он прекратил всякие контакты с отцом, и поэтому в Стокгольме, послушать Нобелевскую лекцию, пригласил только маму⁸³.

К его великому огорчению, Нобелевская премия принесла ему еще большую известность. Лондонская газета написала о нем: «робок, как газель, застенчив, как викторианская девица», и назвала его «гением, который пугается всех женщин»⁸⁴.

На самом деле, не всех.

Как говорилось ранее, в 1934–35 учебном году Дирак был в Принстоне. Той осенью к Юджину Вигнеру, профессору физики Принстонского университета, приехала погостить его сестра Маргит Вигнер Балаз (для друзей — Манси). Она жила в Будапеште. Манси и Поль встретились. «Он рассказал мне о своем трудном, я бы сказала, очень трудном детстве. Я рассказала ему о своем, я рассказала о своих пережитых проблемах, печальных воспоминаниях о неудачном браке»⁸⁵. Летом 1935 года Поль приехал к Манси в Будапешт. Манси с любовью и нежностью вспоминала о его ухаживании⁸⁵. Они поженились 2 января 1937 года. «Так был заключен весьма старомодный викторианский брак»⁸⁵. Поль сдал свои холостяцкие апартаменты в колледже Святого Иоанна. Супруги переехали в дом на Кавендиш Авеню, где я впервые с ними встретился. С ними жили двое детей от первого брака Манси — Моника и Габриель, ставший выдающимся математиком. Оба они приняли фамилию Дирак. У Поля с Манси родились две дочери — Мэри и Флоренс. «Поль держался от детей в стороне, хотя это и не было высокомерием с его стороны»⁸⁵.

После смерти отца в 1936 году Поль написал Манси: «Я теперь чувствую себя гораздо в большей степени свободным»⁸⁵. Мать Поля стала частой гостьей на Кавендиш Авеню. Она умерла именно там в 1941 году.

Как и обещал, теперь я продолжу рассказ о поздних работах Дирака и начну с менее известных его исследований. Прежде всего, в 1933 году Дирак в сотрудничестве со своим хорошим другом Петром Капицей работал над теоретическим исследованием отражения электронов от стоячих световых волн⁸⁶. Этот эффект Капицы–Дирака не был экспериментально подтвержден до 1986 года⁸⁷.

Второе, также в 1933 году Дирак изобрел центробежный метод для разделения газовых изотопных смесей. Капица вдохновил его самому проводить эксперименты, что Дирак и сделал, хотя и не

довел до конца. Далитц дал детальный отчет⁸⁸ о том, как после 1940 года проекты по созданию атомных бомб возродили интерес к этой работе и как Дирак стал неофициальным консультантом по этому проекту. С другой стороны, война сделала его членом маленькой пожарной команды колледжа Святого Иоанна в Кембридже в то время, когда ожидался налет (согласно письму от 28 апреля 1993 года от Х. Пейзира Р. Ховису, находящемуся сейчас в архиве колледжа).

Хотя эти две темы работ Дирака интересны, их нужно рассматривать как отклонения от основных более поздних исследований Дирака, в которых он продолжил демонстрировать высокую математическую изобретательность и мастерство, но той потрясающей комбинации новшества и простоты, которая отличает его героический период, уже больше не было.

Вот несколько основных тем, которые, как мне кажется, составляют букет его идей в поздние годы. Этот список не претендует на полноту, и работы даны в случайном порядке

Развитие гамильтоновой динамики. Эта работа включает изучение релятивистской динамической эволюции систем на гиперповерхностях различного типа в классической теории⁸⁹ и квантовой механике⁹⁰. Кроме того, исследование гамильтоновых систем со связями^{91,92}, ведущее к гамильтоновой формулировке общей теории относительности⁹³. Эта работа, в свою очередь, повысила его интерес к гравитационным волнам⁹⁴. Кто дал название гравитону? Согласно «*Нью-Йорк таймс*» от 31 января 1959 года: «Профессор Дирак предложил назвать единицу гравитационных волн гравитоном».

Интерес Дирака к общей теории относительности на протяжении всей жизни выразился и в его работах по волновым уравнениям в конформном⁹⁵ пространстве, пространстве де Ситтера⁹⁶ и римановом пространстве⁹⁷. Дирак читал лекции по общей теории относительности, пока ему не исполнилось семьдесят лет⁹⁸.

Космологические вопросы. Дирак проявлял интерес к этим вопросам, еще когда работал в Геттингене⁹⁹. Он не публиковал свои работы на эту тему до 1937 года¹⁰⁰. С того времени и до конца жизни он был заинтригован возможностью того, что фундаментальные константы в природе, в действительности, не постоянны

ны, а зависят от времени на шкале, установленной космологической эпохой, промежутком времени между Большим Взрывом и настоящим¹⁰¹. Он надеялся, что соотношения между крайне большими, но приближенно соизмеримыми числами, такими как отношение временного интервала эпохи к атомным временным интервалам и отношение электрической силы к гравитационной между электроном и протоном, должны быть простыми¹⁰². Никакого определенного сдвига в этом вопросе сделано не было. Другие последовали за этими смелыми попытками больше с интересом, чем с энтузиазмом.

Эфир. Короткий период (1941–53 годы) размышлений на эту тему привел к тому, что квантовая механика была готова принять существование эфира¹⁰³.

Квантовая электродинамика. Еще один вклад, который тоже принадлежит героическому периоду. В марте 1932 года Дирак высказал предположение о «многовременном формализме», в котором каждому электрону приписывается индивидуальное время¹⁰⁴. Эта новая версия теории, эквивалентная ранним формулировкам¹⁰⁵, отмечает первый важный шаг к явно ковариантным методикам, которые будут играть такую ключевую роль с конца 40-х годов.

Через несколько лет отношение Дирака к квантовой электродинамике стало в высшей степени критичным. С одной стороны, работа, которая явилась следствием этого негативного отношения, ни в коей мере не расширила наше понимание фундаментальных вопросов. С другой стороны, эта поздняя внутренняя борьба является очень важной для понимания самого Дирака. Его радикальное изменение позиции явилось результатом его работы⁷⁵ по поляризации вакуума, в которой он столкнулся с бесконечностями, явившимися причиной кризиса в квантовой теории поля в 30-е годы.

Коренное изменение позиции Дирака полностью отразилось в короткой работе 1936 года — его первой публикации, последовавшей за его включением⁷⁵ в разработку теории позитронов. Я считаю значительным тот факт, что этой статье предшествовал период продолжительностью более года, во время которого Дирак совсем не публиковал свои работы. *A propos** было мимолетное

*Кстати (лат.). — Прим. перев.

экспериментальное сомнение по поводу справедливости теории фотон-электронного рассеяния. Реакция Дирака¹⁰⁶ была следующей: «Единственной важной частью (теоретической физики), от которой приходится отказаться, является квантовая электродинамика. . . мы можем отказаться от нее без сожалений. . . фактически, учитывая ее крайнюю сложность и запутанность, многие физики будут искренне рады увидеть ее конец».

В этом месте следует вспомнить, что истоки трудностей с бесконечностями лежат в эре классической физики. Классический электрон, рассматриваемый как материальная точка, обладает бесконечной энергией в силу связи с собственным электростатическим полем. Помня об этом, Дирак выбрал стратегию попытки модифицировать прежде всего классическую теорию, чтобы избавить ее от *ее* бесконечностей, и после этого рассматривать квантовую теорию, в надежде, что, как следствие, и там все изменится к лучшему. В это время и других интересовал такой подход к решению проблемы. Среди них — Борн, Крамерс и Вентцель. Даже сегодня еще далеко не понятно, что же лежит за бесконечностями. Но, тем не менее, есть существенные причины, по которым возвращение к классической теории является неправильным направлением решения¹⁰⁷.

Как бы там ни было, Дирак сделал несколько попыток переформулировать классическую теорию электрона. Его первая попытка датируется 1938 годом. «Необходима новая физическая теория, которая была бы разумна как с точки зрения классической, так и с точки зрения квантовой теории, и самый доступный нам путь — это держаться в рамках классической теории». Дирак начал с наблюдений, что классическая теория движения электрона Лоренца, строго говоря, несправедлива при высоких ускорениях, поскольку электрон Лоренца имеет конечный радиус. Вместо этого, Дирак начал с электрона с нулевым радиусом и смог найти для него строгое классическое уравнение движения, свободное от классических бесконечностей, но имеющее, тем не менее, новый дефект; — оно имеет решения, которые соответствуют ускорениям даже в отсутствие внешних полей. Он нашел не совсем приемлемую связь, которая уничтожает эти нежеланные решения, но возникла другая проблема — появились новые бесконечности в квантовой теории¹⁰⁹. Чтобы убрать эти появившиеся бесконечности, Дирак ввел¹¹⁰ то, что эквивалентно фотонам с отрицательной энергией. Он попытался убрать физические парадоксы, которые явились следствием этого нового постулата — введением индефинитной метрики в гильбертовом пространстве¹¹¹. Но это ведет к дальнейшим трудностям, с критической позиции проанализированным Паули¹¹². Эти но-

вые постулаты никогда не обсуждались в контексте позитронной теории.

После того, как Дирак не смог найти удовлетворительную квантовую версию своего точечного электрона, он больше никогда не упоминал о своей теории. К 1946 году он склонился к мнению, что бесконечности являются математическим артефактом, возникающим вследствие разложения по α , которое, в действительности, не справедливо¹¹³.

Вскоре после того, в 1947–48 годах, когда получила систематическое развитие программа перенормировок, в квантовой электродинамике наметился новый поворот. Эта методика не разрешила полностью проблему бесконечностей. Масса и заряд электрона неизменно оставались бесконечными. Но в значительной степени эти две бесконечности можно считать безобидными в том смысле, что сейчас можно было делать предсказания в произвольно высоких порядках по α для упоминавшихся ранее процессов рассеяния, рождения и уничтожения. Ранее теория хорошо работала только в ведущем порядке по α , но высшие порядки ей не подавались. В результате стало возможным сравнение квантовой электродинамики с экспериментом с гораздо большей точностью. Результат был захватывающим. Имея на то все основания, Фейнман назвал¹¹⁴ новую версию квантовой электродинамики «драгоценным камнем физики — нашей самой большой гордостью».

Дираку он был не нужен.

В 1951 году он писал: «Недавние работы Лэмба, Швингера и Фейнмана были очень успешны. . . , но теория, появившаяся в результате, безобразна и несовершенна»¹¹⁵. Он испытывал чувство глубокой антипатии к тому способу, которым манипулировались в программе перенормировок бесконечные массы и заряды. В этом же году он вновь начал поиск новой классической точки отправления. «Трудности. . . нужно приписать. . . тому, что мы работаем, исходя из неверной классической теории»¹¹⁵. Его новое предложение можно рассматривать как прямо противоположное тому, которое он высказывал в 1938 году. В этот раз он начал с классической теории, которая вообще не содержит дискретные частицы. «При формулировании понятия электронов нужно исходить из классической теории движения непрерывного потока электричества¹¹⁶, а не движения точечных зарядов. Тогда дискретные электроны можно считать квантовым явлением»¹¹⁷. После 1954 года и эта модель бесследно исчезла из его работ.

Таким образом, с начала 50-х годов Дирак следовал своим собственным путем, в одиночестве. Он принял успехи метода перенормировок. Фактически, в середине 60-х он читал лекции по аномальному магнитному моменту и вычислениям лэмбовского

сдвига¹¹⁸. Но он никогда не изменял своему мнению о том, что квантовой электродинамике нужен новый исходный пункт. В более поздние годы он будет время от времени искать новые способы переформулировать не столько классическую, сколько квантовую теорию¹¹⁹. В 1970 году он вывел последнее из уравнений Дирака, релятивистское волновое уравнение, только с положительными энергиями¹²⁰.

С сентября 1970 года по январь 1971 Дирак был приглашен в университет в Таллахасси (штат Флорида). В это время ему предложили работать там постоянно. Он принял предложение. В 1972 году он начал новую жизнь в качестве профессора во Флориде. Один из его коллег рассказывал мне:

В это время его приглашали также в Нью-Йоркский университет, в Стоуни Брук и в Майами. Он отказался от этих предложений в основном по причине того, что там он не мог совершать пешие прогулки. . . В Таллахасси он примерно с милло шел пешком на работу. . . Ему очень нравилось плавать в ближайших озерах Сильвер и Лост, иногда в море.

Время, проведенное в Таллахасси, было самым счастливым. Он действительно изменился. Когда он жил в Кембридже, то приходил в университет только на лекции и семинары, все остальное время работал дома. В Таллахасси он прилежно работал в университете на протяжении всего дня, обедал с мальчиками, спал после ленча. Жена забирала его домой ближе к вечеру. . . Мы относились к нему как к одному из мальчишек. . . , не баловали «красной дорожкой почета». Ему это нравилось¹²¹.

Работы Дирака в этот период просто плодотворны. За эти последние 12 лет своей жизни он опубликовал свыше 60 работ, большинство из которых являются обзором прошлых событий, включая небольшую книгу по общей теории относительности¹²². Я храню его письмо ко мне, которое начинается словами: «Дорогой Брэм». Он написал его мне в те самые дни⁵², благодаря за экземпляр моей книги о научной биографии Эйнштейна. На задней обложке можно найти слова благодарности за эту книгу, написанные Дираком.

Последняя работа Дирака (1984 год) «недостатки квантовой теории поля» содержит его последнее суждение на тему квантовой электродинамики: «Эти последние правила перенормировки удивительно, чрезмерно хорошо согласуются с экспериментами. Большинство физиков говорят, что, следовательно, эти работающие правила верны. Я чувствую, что причина в другом. Простое

соответствие результатов наблюдениям не доказывает, что та или иная теория верна». Работа завершается последними опубликованными научными словами Дирака:

Я провел много лет в поисках гамильтониана, чтобы внести его в теорию, и все еще не нашел его. Я буду продолжать работать так долго, как только смогу, и надеюсь, что другие последуют в этом же направлении.

Дирак умер 20 октября 1984 года в возрасте 82 лет. Он был похоронен на Роузлоновском кладбище в Таллахасси. Это было желанием его семьи — он должен покоиться там, где оставил этот мир.

О Дираке было верно замечено, что его жизнь была, главным образом, наукой, а наука была физикой. Это отражено в том, о чем я уже рассказал: в основном — наука, и лишь краткие отступления о других сторонах его жизни. Но было бы нерадивостью с моей стороны не дополнить эти последние.

Аскетичный образ жизни Дирака, его равнодушие к комфорту или пище сравнивался с Ганди¹²⁴. Он никогда не прикасался к алкоголю и не курил. Он избегал огласки и почестей, которые, тем не менее, он получал в большом количестве¹²⁵. Что касается религии, он был склонен к атеизму, о чем он публично высказался лишь однажды¹²⁶. Как однажды сказал Паули: «Бога не существует, а Дирак — его пророк»¹²⁷. Хотя Манси Дирак писала мне: «Поль не атеист. Много раз мы вместе преклоняли колени в молитве. Мы все знаем, что он не был лицемером»¹²⁸.

На протяжении всей жизни Дирак сохранял разбросанный (не сжатый), точный и непоэтично элегантный стиль речи и письма, с минимумом слов для выражения мысли. Пример: его комментарий в отношении романа *«Преступление и наказание»*: «Он хорош, но в одной из глав автор допускает ошибку. В его описании солнце встает дважды в один и тот же день»¹²⁹. Однажды Оппенгеймер предложил Дираку несколько книг для чтения, Дирак вежливо отказался, сославшись на то, что чтение книг мешает думать¹³⁰.

После того как Дирак женился, он с большим удовольствием стал возиться в саду. С садоводческими проблемами он пытался справиться, исходя из первых принципов, что не всегда вело к хорошим результатам¹³¹.

Я расскажу о своих личных контактах с Дираком, в основном, в Принстонском Институте с осени 1946 года. В это время мы

часто завтракали вместе. За одним из завтраков мне представился случай ощутить на себе метод исчерпывающего исследования Дирака. В то время я съедал три бутерброда на завтрак, отчасти благодаря своему хорошему аппетиту, отчасти — вследствие своего голландского происхождения. Однажды Дирак стал меня расспрашивать. (Между каждым ответом и следующим за ним вопросом была пауза в полминуты.) «Вы всегда съедаете три бутерброда на завтрак?» «Да». «Вы всегда съедаете на завтрак одни и те же три бутерброда?» «Нет, я следую своему желанию каждый день». «Вы съедаете свои бутерброды в каком-то устойчивом порядке?» «Нет». Через несколько месяцев в институте ко мне подошел молодой человек по фамилии Салам и сказал: «Профессор Дирак из Кембриджа просил передать Вам привет. Он хотел бы узнать, Вы по-прежнему съедаете три бутерброда на завтрак?» Когда Дирак вернулся в институт на 1947–48 учебный год, мы вновь вернулись к совместным завтракам. И в самый первый раз после перерыва Дирак посмотрел на мою тарелку и с триумфом произнес: «А теперь Вы съедаете на завтрак лишь два бутерброда». Еще один памятный случай: разговор в институтском коридоре: Дирак: «Моя жена хотела бы знать, сможете ли Вы прийти к нам сегодня вечером на ужин?» Пайс: «Я сожалею, у меня назначена встреча». Дирак: «До свидания». Этот ответ не подразумевал никакой обиды. Ничего не было сказано типа: «Как-нибудь в другой раз». Вопрос был поставлен, ответ на него был дан, и разговор был закончен.

Перед учебным 1954–55 годом в институте все было готово к очередному приезду Дирака. Он не состоялся. Итог этим беспоконным событиям весны 1954 года был подведен в «News and Views», в колонке «*Физика сегодня*», в июле 1954 года, под двумя заголовками: «Дело Оппенгеймера; Дираку отказано в визе». Американское консульство в Лондоне сообщило Дираку о том, что ему отказано в визе согласно пункту 212А иммиграционного и натурализационного акта — знаменитый акт МакКаррана, который (цитирую «*Физику сегодня*»): «Охватывает категории нежелательного круга лиц, начиная с бродяг и заканчивая безбилетниками». Причина этого отказа так никогда и не выяснилась, но существовало мнение, что свою роль в этом сыграли его семь довоенных визитов в Россию, три из них были сделаны во время его трех путешествий по всему миру, и все они нанесли с научными целями¹³². Это событие, широко освещавшееся в прессе всего мира¹³³, заставило нескольких американских физиков написать в «*Нью-Йорк таймс*»: «Если на практике маккаррановский акт означает именно это, то нам это кажется формой культурного самоубийства»¹³⁴. Этот случай был в значительной степени обид-

ным, хотя и не самым обидным за все время действия этого акта. Этот период прошел.

В 1988 году я запросил и получил досье ФБР на Дирака. Я нашел в нем лишь одну строчку, которая, я думаю, как-то относится к этому делу: «Причина визита Дирака — обсуждение с Оппенгеймером предложения, сделанного Дираку Кембриджским университетом, о работе там профессором. Доктор Оппенгеймер, огорченный по поводу [проверки благонадежности] голосования против него, примет это Британское предложение». В остальном эти документы необычайно скучны.

Позднее Дираку предстояло провести еще два учебных года в Принстоне. Во время всех этих визитов я снова и снова спрашивал о его недовольстве квантовой электродинамикой. Он признавал успехи перенормировок, но остался при своем мнении, что остаточных бесконечностей массы и заряда «не должно быть. Они убирают их искусственно»¹²³. Этот диагноз был гораздо лучше, чем те средства устранения этого недостатка, которые он предлагал.

Еще памятный случай: его очевидная гордость по поводу изобретения обозначений векторов бра (bra) и кет (ket), объявленная в статье¹³⁵, специально написанной по этому случаю. Его ответ на мой вопрос, поставленный в начале 60-х годов, почему инвариантность отражения в пространстве и обращение времени не появляются в его книге по квантовой механике: «Потому что я в них не верил». Действительно, в 1949 году он написал: «Я не верю, что есть необходимость в инвариантности физических законов относительно этих отражений, хотя все известные сейчас точные законы природы обладают этой инвариантностью»¹³⁶.

Из этих обсуждений я гораздо больше узнал о том, как Дирак играет с уравнениями. В общем, это можно выразить так: сначала поиграй с красивой математикой ради математики, а затем посмотри, не ведет ли это к новой физике.

На протяжении всей жизни это отношение проявлялось в его трудах. В возрасте 28 лет:

Сейчас в теоретической физике существуют фундаментальные задачи. . . , решение которых. . . , предположительно, потребует более коренного пересмотра наших фундаментальных понятий, чем любое прежнее изменение позиции. Вполне возможно, эти перемены будут такими большими, что человеческий ум не в силах будет зародить необходимые новые идеи, пытаясь непосредственно сформулировать экспериментальные данные на математическом языке. В будущем теоретику, следовательно, придется следовать более прямым путем. Самый эффективный метод продвижения вперед сегодня — это опираться на все ресурсы чистой математики в попытке усовершенствовать и обобщить математический формализм, об-

разующий существующую основу теоретической физики. И после каждого успеха при движении в этом направлении пытаться интерпретировать новые математические свойства языком физических сущностей⁶⁵.

Это как раз то, что происходит сегодня. В возрасте 36 лет: «Чем дальше, тем очевиднее становится тот факт, что те принципы, которые находит интересными математик, оказываются как раз теми, которые выбраны Природой»³⁴. В 60 лет: «Я думаю, это моя характерная черта — мне нравится играть с уравнениями, просто выскивая красивые, с математической точки зрения, соотношения, которые, возможно, вообще не имеют никакого физического смысла. Иногда, впрочем, смысл есть»². В 78 лет:

Большая часть моей исследовательской работы в физике состоит не в намерении разрешить какую-то определенную проблему, а просто в рассмотрении используемых физиками математических величин и в попытках сложить их вместе каким-то интересным способом, независимо от того, какое применение может иметь эта работа. Это просто поиск красивой математики. Позднее может оказаться, что эта работа будет иметь какое-то применение. Тогда это удача⁴⁰.

В этой последней работе он приводит три примера того, как он играл: уравнение Дирака, монополь Дирака и его последнее уравнение. Его мнение в 69 лет: «Мои собственные вклады с [тех] ранних дней не имеют такого большого значения»¹³⁷.

Какую математику Дирак считал красивой? «Исследователь, в своих попытках выразить фундаментальные законы Природы в математической форме, должен стремиться, главным образом, к математической красоте. Он должен рассматривать простоту как подчиняющуюся красоте. . . Часто требования простоты и красоты одни и те же, но там, где интересы сталкиваются, последней должно отдаваться предпочтение»³⁴. Конечно же, тщетно спорить по поводу таких субъективных вопросов, как различия между красотой и простотой.

Дирак был очень замкнутым человеком, который не часто делился своими воспоминаниями о других людях или прошлых событиях. Лишь изредка он высказывался о себе. В нескольких случаях он, тем не менее, выразил свои эмоции в работах. Для меня является удивительным тот факт, что он назвал теорию преобразований «моя возлюбленная»⁷. В равной степени редкими являются и его высказывания, отражающие тревогу. Когда, в возрасте 60 лет, ему задали вопрос о том, какие чувства он испытывал, открыв уравнение Дирака, он ответил: «Прежде всего, сильное беспокойство по поводу того, будет оно правильным или нет. . . Это преобладающее чувство. Это, скорее, нервное возбуждение. . .»². В возрасте 67 лет: «Рядом с надеждами часто идут страхи, и в на-

учном исследовании страхи, чаще всего, берут верх»¹³⁸. В возрасте 69 лет: «Я думаю, это общее правило, что тот, кому принадлежит новая идея, — не самый подходящий человек для ее развития, потому что в нем слишком силен страх сделать что-то неправильно. . . »¹³⁷.

В качестве последнего примера высказывания Дирака о самом себе я приведу цитату из письма³⁹, написанного мне моим коллегой: «Я разговаривал с ним за полтора года до его смерти. . . Я просил его приехать в университет Флориды и прочитать лекцию, и он сказал: «Нет! Мне не о чем сказать. Моя жизнь была неудачей. . . » И затем он продолжил говорить со мной о бесконечностях [в квантовой электродинамике!!]» Для великих людей типично такое отношение, по их собственному мнению, неудача перевешивает успех.

Далее мне бы хотелось рассказать еще две истории, чтобы добавить еще несколько штрихов к портрету Дирака.

Однажды Нильс Бор пришел ко мне в кабинет в Принстоне, и, покачивая головой, рассказал мне о только что состоявшемся разговоре с Дираком. Это было в начале 50-х годов, во времена холодной войны. Бор в разговоре с Дираком выразил свое возмущение по поводу тех оскорблений, которыми американская пресса осыпала русских. Дирак ответил, что через несколько недель это закончится. Бор поинтересовался, почему. «Потому что, — сказал Дирак, — к тому времени журналисты исчерпают весь запас бранных выражений английского языка, после чего им придется остановиться».

Другая история не о Дираке, но я не раз слышал, как он с удовольствием рассказывал ее. В маленькой деревеньке вновь назначенный священник отправился по домам своих прихожан. В одном скромном домике его встретила хозяйка, вокруг которой ревели много детей. Священник спросил, сколько у них с мужем детей. «Десять», — ответила женщина, — «пять пар близнецов». Изумившись, священник спросил: «Вы хотите сказать, что у вас всегда получались близнецы?» На что женщина честно ответила: «Нет, Отец, иногда не получалось ничего». Такая точность пришлась по душе Дираку.

Моя последняя история о Дираке касается письма нашего общего друга¹⁴⁰, в котором речь идет о моей первой встрече с Дираком

в январе 1946 года. Во время этой встречи Дирак живо интересовался моим военным опытом. В письме, о котором идет речь, наш общий друг пишет мне:

Это было за две недели до его смерти. . . Мы с Маргит сидели у его постели. Он был бледен, истощен и необычайно разговорчив. . . Он рассказывал, что незадолго до окончания войны ты был захвачен в плен немцами и тебя должны были расстрелять. . . Необычное в этой ситуации было то, что он полностью повторил эту историю четыре раза подряд. Наконец, Маргит смогла «пробиться» к нему, и он перестал ее рассказывать. . . Когда-нибудь ты можешь рассказать мне об этом.

Когда я оглядываюсь на те почти 40 лет, что я знал Дирака, я нахожу, что все воспоминания о нем самые добрые. Я разделяю мнение Нильса Бора: «Из всех физиков у Дирака самая чистая душа»¹⁴¹. В чем-то, но лишь в немногом, он напоминает мне Эйнштейна: один из величайших физиков века, всегда самостоятелен в выборе пути, без своей собственной школы; считает, что физической теории необходимы красота и простота, в последние годы привязан к математике больше, чем необходимо для развития физики, продолжает чисто исследовательскую деятельность почти до самой смерти. В других отношениях, я никогда не знал никого, кто напоминал бы его.

Библиография и примечания

(Ниже D. обозначает П. А. М. Дирак.)

1. Обращение к Королевскому Обществу, Лондон, 13 ноября 1995 года, по случаю торжественного открытия мемориальной таблички Дираку в Вестминстерском Аббатстве. Часть этой статьи взято из моих ранних произведений о Дираке, которые можно найти в *Aspects of Quantum Theory* (A. Salam and E. P. Wigner, Eds), p. 79, Cambridge University Press, 1972; in *Inward Bound*, Oxford University Press, 1986; and in *Reminiscences about a Great Physicist* (B. Kursunoglu and E. P. Wigner, Eds), p. 93, Cambridge University Press, 1987. Другими основными источниками мне служили прекрасные произведения R. H. Dalitz and R. Peierls, *Biogr. Mem. Fell. Roy. Soc.* 32, 139, 1986; and by H. S. Kragh, *Dirac*, Cambridge University Press, 1990.
2. T. Kuhn, interview with D., May 7, 1963, Niels Bohr Archive, Copenhagen.
3. D.. A little «prehistory». *The Old Cathamian*, n. 9. 1980.

4. D., in *History of Twentieth Century Physics* (C. Weiner, Ed.), p. 109, Academic Press, New York, 1977.
5. D., interview in *Florida State University Bulletin*, Vol. 3, February 1978.
6. For an account of D.'s Cambridge days, see R. J. Eden and J. C. Polkinghorne, in *Aspects of Quantum Theory*, ref. 1, p. 1.
7. D., Report KFKI-1977-62, *Hung. Ac. of Sc.*
8. D., *Proc. Roy. Soc.* **A109**, 642, 1925.
9. M. Born, *My Life*, p. 226, Scribner, New York, 1978.
10. *Reminiscences about I. E. Tamm* (E. Feinberg, Ed.), Nauka, Moscow, 1987.
11. Cf. D., *Proc. Camb. Phil. Soc.* **23**, 412, 1926.
12. D., *Proc. Roy. Soc.* **A112**, 661, 1926. Относительно более подробных деталей о ранних годах Дирака и его вкладе в квантовую механику в течение 1925–26 гг. см. J. Mehra and H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, Vol. 4, part 1, Springer, New York, 1982.
13. W. Heisenberg, *Zeitschr. f. Physik* **38**, 411, 1926.
14. W. Heisenberg, *Zeitschr. f. Physik* **39**, 499, 1926.
15. E. Fermi, *Rend. Lincei* **3**, 145, 1926; *Zeitschr. f. Physik* **36**, 902, 1926; reprinted in *Enrico Fermi, Collected Works*, Vol. 1, pp. 181, 186, University of Chicago Press, 1962. In ref. 4, pp. 133, 134, Дирак был очарован временной последовательностью появления своих и этих работ Ферми.
16. О истории квантовой статистики во времена старой квантовой теории см. *Inward Bound*, ref. 1, chapter 13, section (d).
17. D., *Proc. Roy. Soc.* **A113**, 621, 1927.
18. Строгое рассмотрение ведет к теории распределений (обобщенных функций); ср. I. Halperin and L. Schwartz, *Introduction to the Theory of Distributions*, Toronto University Press, 1952.
19. D., *Proc. Roy. Soc.* **A114**, 243, 1927.
20. D., *Proc. Roy. Soc.* **A114**, 710, 1927.
21. Эта так называемая квазиклассическая процедура (детально обсужденная в W. Pauli, *Handbuch der Physik*, Vol. 24/1, sections 15, 16, Springer, Berlin, 1933) дает хорошее приближение, но не строгий анализ индуцированных процессов; должным образом не учитываются радиационные поправки.
22. A. Einstein, *Phys. Zeitschr.* **18**, 121, 1917. See further A. Pais *Subtle is the Lord*, chapter 21, section (d), Oxford University Press, New York, 1982.

23. Дирак заметил¹⁹, что он пропустил множитель 2 в этом коэффициенте, поскольку он должным образом еще не рассматривал поляризацию.
24. Independently of Schrödinger, *Ann. der Phys.* **81**, 109, 1926.
25. Гораздо более глубокий анализ двух фундаментальных работ Дирака по квантовой электродинамике дан в R. Jost, in *Aspects of Quantum Theory*, ref. 1, p. 61.
26. Ref. 20, p. 719.
27. D., *Proc. Roy. Soc.* **A111**, 405, 1926; *Proc. Camb. Phil. Soc.* 23, 500, 1926.
28. L. Infeld, *Quest*, p. 203, 2nd ed., Chelsea, New York, 1980.
29. См. в особенности мнение о Дираке студентов-исследователей, описанное в Dalitz and Peierls, ref. 1, pp. 155-7.
30. H. B. G. Casimir, *Haphazard Reality*, p. 72, Harper and Row, New York, 1983.
31. R. Eden and J. Polkinghorne, in *Tributes to Paul Dime* (J. C. Taylor, Ed), p. 5, Hilger, Bristol, 1987.
32. N. F. Mott, interviewed by T. S. Kuhn, March 1962, Niels Bohr Archive, Copenhagen.
33. A. Einstein, in *James Clerk Maxwell*, p. 66, New York, 1931.
34. D., *Proc. Roy. Soc. Edinburgh* **59**, 122, 1939.
35. D., *Sci. Am.* **208**, 45, May 1963.
36. D. in *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives* (G. Holton and Y. Elkana, Eds), p. 79, Princeton University Press, 1982.
37. O. Klein, *Zeitschr. f. Physik* **37**, 895, 1926; E. Schrödinger, *Ann. der Phys.* **81**, 109, 1926; V. Fock, *Zeitschr. f. Physik* **38**, 242, 1926; Th. de Donder and H. van den Dungen, *Comptes Rendues* **183**, 22, 1926; J. Kudar, *Ann. der Phys.* **81**, 632, 1926; W. Gordon, *Zeitschr. f. Physik* **40**, 117, 1926.
38. W. Pauli, *Zeitschr. f. Physik* **43**, 601, 1927.
39. Им было найдено четырехмерное обобщение $\sigma \cdot \mathbf{p}$. Позднее он немного поиграл с волновыми уравнениями для высших спинов; D., *Proc. Roy. Soc.* A155, 447, 1936.
40. D., *Int. J. Theor. Phys.* **21**, 603, 1982.
41. D., *Proc. Roy. Soc.* **A117**, 610, 1928.
42. D., *Proc. Roy. Soc.* **A118**, 351, 1928.
43. Ref. 2, interview May 14, 1963.
44. Позднее [Pauli and Weisskopf (*Helv. Phys. Acta* **7**, 709, 1934)] было показано, что скалярное волновое уравнение поддается рассмотрению совместно с теорией преобразований.

45. W. Heisenberg, interviewed by T. Kuhn, July 12, 1963, Niels Bohr Library, American Institute of Physics, New York.
46. D. *Phys. Zeitschr.* **29**, 561, 712, 1928.
47. W. Heisenberg, письмо к W. Pauli, May 3, 1928; reprinted in *Wolfgang Pauli, Scientific Correspondence*, Vol. 1, p. 443, Springer, New York, 1979; ниже обозначается как PC.
48. Ref. 46, p. 562, footnote 2.
49. W. Heisenberg, письмо к W. Pauli, July 31, 1928; PC, Vol. 1, p. 466.
50. D., письмо к O. Klein, July 24, 1928, copy in Niels Bohr Library.
51. S. F. Tuan, *Dirac and Heisenberg in Hawaii*, неопубликовано.
52. D., письмо к A. Pais, October 21, 1982.
53. W. Heisenberg, in *The Physicist's Conception of Nature* (J. Mehra, Ed.), p. 816, Reidel, Dordrecht, 1973.
54. H. Weyl, *Zeitschr. f. Physik* **56**, 330, 1929.
55. Другие существенные разработки, тем временем имевшие место, включают вывод формулы Клейна–Нишины для комптоновского рассеяния и парадокс Клейна. См. далее *Inward Bound*, ref. 1, chapter 15, section (f).
56. D., *Proc. Roy. Soc.* **A126**, 360, 1929; also *Nature* **126**, 605, 1930.
57. D., ref. 4, p. 144.
58. See *Inward Bound*, ref. 1, chapter 14.
59. D., письмо к N. Bohr, November 26, 1929, copy in Niels Bohr Library.
60. D., *Proc. Camb. Phil. Soc.* **26**, 361, 1930.
61. *The New York Times*, September 9, 1930.
62. J. R. Oppenheimer, *Phys. Rev.* **35**, 562, 1930.
63. I. Tamm, *Zeitschr. f. Physik* **62**, 545, 1930.
64. H. Weyl, *The Theory of Groups and Quantum Mechanics*, pp. 263–4 and preface, Dover, New York.
65. D., *Proc. Roy. Soc.* **A133**, 60, 1931.
66. C. D. Anderson, *Science* **76**, 238, 1932.
67. C. D. Anderson, *Phys. Rev.* **43**, 491, 1933.
68. W. Pauli, письмо к D., May 1, 1933; PC, Vol. 2, p. 159.
69. W. Pauli, письмо к W. Heisenberg, June 16, 1933; PC, Vol. 2, p. 169.
70. Cf. *Inward Bound*. ref. 1. chapter 16. section (d).

71. *The Theory of the Positron and Related Topics*, report of a seminar conducted by W. Pauli, notes by B. Hoffmann, Institute for Advanced Study, Princeton, 1935-36, mimeographed notes.
72. W. Heisenberg, письмо к W. Pauli; PC, Vol. 2, p. 386.
73. D., письмо к N. Bohr, August 10, 1933, copy in Niels Bohr Library.
74. Существование поляризации вакуума независимо было установлено в работе W. H. Furry and J. R. Oppenheimer, *Phys. Rev.* **45**, 245, 343, 1934.
75. D., in *Rapports du Septième Conseil de Physique*, p. 203, Gauthier-Villars, Paris, 1934; cf. also D., *Proc. Camb. Phil. Soc.* **30**, 150, 1934.
76. Численная ошибка в коэффициенте последнего слагаемого была исправлена в W. Heisenberg, *Zeitschr. f. Physik* **90**, 209, 1934.
77. E. Uehling, *Phys. Rev.* **48**, 55, 1935.
78. Ref. 4, p. 140.
79. D., *Phys. Rev.* **74**, 817, 1948.
80. D., in dittoed notes of the Pocono conference, p. 72, unpublished.
81. D., in *New Pathways in Science* (A. Perlmutter, Ed.), Vol. 1, Plenum Press, New York, 1976; see further E. Amaldi and N. Cabibbo, in *Aspects of Quantum Theory*, ref. 1, p. 183.
82. Dalitz and Peierls, ref. 1, p. 150.
83. D., 'Theory of electrons and positrons,' in *Nobel Lectures in Physics, 1922-1941*, p. 320, Elsevier, Amsterdam, 1965.
84. *Sunday Dispatch*, November 19, 1933.
85. Margit Dirac, in Kursunoglu and Wigner, ref. 1, p. 3.
86. D., and P. Kapitza, *Proc. Camb. Phil. Soc.* **29**, 297, 1933.
87. P. Gould et al., *Phys. Rev. Lett.* **56**, 827, 1986.
88. R. H. Dalitz, in *Reminiscences about a Great Physicist*, ref. 1, p. 69; also Dalitz and Peierls, ref. 1, p. 152.
89. D., *Rev. Mod. Phys.* **21**, 392, 1949.
90. D., *Phys. Rev.* **73**, 1092, 1948; *Proceedings of the Second Canadian Mathematical Congress 1949*, p. 10, University of Toronto Press, 1951.
91. D., *Can. J. Math.* **2**, 129, 1950; **3**, 1, 1951; *Proc. Roy. Soc.* **A246**, 326, 1958; *Proc. Roy. Irish Acad.* **A63**, 49, 1964.
92. See also F. Rohrlich, in *High Energy Physics* (B. Kursunoglu and A. Perlmutter. Eds). n. 17. Plenum Press. New York. 1985.

93. D., *Proc. Roy. Soc.* **A246**, 333, 1958; *Phys. Rev.* **114**, 924, 1959; а также *Recent Developments in General Relativity*, p. 191, Pergamon Press, London, 1962. См. далее D., *Proc. Roy. Soc.* **A270**, 354, 1962; *Gen. Rel. and Grav.* **5**, 741, 1974.
94. D., *Phys. Rev. Lett.* **2**, 368, 1959; *Proceedings of the Royaumont Conference 1959*, p. 385, Editions du CNRS, Paris, 1962; *Phys. Bl.* **16**, 364, 1960.
95. D., *Ann. of Math.* **37**, 429, 1935.
96. D., *Ann. of Math.* **36**, 657, 1935.
97. D., in *Max Planck Festschrift 1958*, p. 339, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1958.
98. D., *General Theory of Relativity*, Wiley, New York, 1975.
99. Ref. 4, p. 149.
100. D., *Nature* **139**, 323, 1001, 1937; also *ibid.*, 192, 441, 1961.
101. D., Report CTS-T. Phys. 69-1, Center for Theoretical Studies, Coral Gables, Florida, 1969; *Comm. Pontif. Acad. of Sci* **2**, No. 46, 1973; 3, No. 6, 1975); *Proc. Roy. Soc.* **A338**, 446, 1974; *Nature* **254**, 273, 1975; in *Theories and Experiments in High Energy Physics* (B. Kursunoglu *et al.*, Eds), p. 443, Plenum Press, New York, 1975); *New Frontiers in High Energy Physics* (A. Perlmutter and L. Scott, Eds), p. 1, Plenum Press, New York, 1978; *Proc. Roy. Soc.* **A365**, 19, 1979.
102. См. далее F.J. Dyson, in *Aspects of Quantum Theory*, ref. 1, p. 213.
103. D., *Nature* **168**, 906, 1951; 169, 146, 1952; *Physica* **19**, 888, 1953; *Sci. Monthly* **78**, 142, 1954.
104. D., *Proc. Roy. Soc.* **A136**, 453, 1932.
105. Cf. e.g. D., V. Fock and B. Podolsky, *Phys. Zeitschr. der Sowjetunion* **2**, 468, 1932.
106. D., *Nature* **137**, 298, 1936.
107. *Inward Bound*, ref. 1, chapter 16, section (c); chapter 18, section (a).
108. D., *Proc. Roy. Soc.* **A167**, 148, 1938; see also ref. 92.
109. D., *Ann Inst. H. Poincaré* **9**, 13, 1939.
110. D., *Comm. Dublin Inst. Adv. Studies* **A1**, 1943.
111. D., *Proc. Roy. Soc.* **A180**, 1, 1942.
112. D., *Rev. Mod. Phys.* **15**, 175, 1943.
113. D., *Comm. Dublin Inst. Adv. Studies*, **A3**, 1946; *Proceedings of the International Conference on Fundamental Particles and Low Temperatures*, Cambridge, June 1946, p. 10, Taylor and Francis, London, 1946; *Proceedings of the 8th Solvay Conference 1948* (R. Stoops, Ed.), n. 282. Coudenberg. Brussels. 1950.

114. R. P. Feynman, *Quantum Electrodynamics, the Strange Story of Light and Matter*, Princeton University Press, 1985.
115. D., *Proc. Roy. Soc.* **A209**, 251, 1951.
116. См. также D., in *Deeper Pathways in High Energy Physics* (B. Kursunoglu et al., Eds), Plenum Press, New York, 1977.
117. См. далее D., *Proc. Roy. Soc.* **A212**, 330, 1952; 223, 438, 1954; а также D., *Proc. Roy. Soc.* **A257**, 32, 1960; 268, 57, 1962.
118. D., *Lectures on Quantum Field Theory*, Belfer School of Science, Yeshiva University, New York, 1966.
119. Ср. D., *Nuov. Cim. Suppl.* **6**, 322, 1957; *Nature* **203**, 115, 1964; 204, 771, 1964; *Phys. Rev.* **139B**, 684, 1965.
120. D., *Proc. Roy. Soc.* **A322**, 435, 1971; **328**, 1, 1972; and in *Fundamental Interactions in Physics and Astrophysics* (G. Iverson, Ed.), p. 354, Plenum Press, New York, 1973.
121. Интервью с профессором Джо Ланутти, January 30, 1986.
122. D., *General Theory of Relativity*, ref. 98.
123. D., in *Proceedings of Loyola University Symposium*, New Orleans, 1984; reprinted in *Reminiscences about a Great Physicist*, ref. 1, p. 194.
124. N. F. Mott, *A life in Science*, p. 42, Taylor and Francis, London, 1986.
125. Список см. в *Dirac*, ref. 1, p. 356, note 20.
126. D., *Chem. Zeitung* **95**, 880, 1971.
127. Цитируется по Heisenberg in *Schritte und Grenzen*, Piper, Munich, 1971.
128. Mançi Dirac, письмо к A. Pais, November 25, 1995.
129. G. Gamow, *Thirty Years that Shook Physics*, p. 121, Doubleday, New York, 1966.
130. L. Alvarez, *Adventures of a Physicist*, p. 87, Basic Books, New York, 1987.
131. R. Peierls, in ref. 31, p. 36.
132. *Washington Poland Times Herald*, September 24, 1954.
133. E.g. *The New York Times*, May 27, June 11, 1954; *New York Herald Tribune*, May 28, 1954; *The Times* (London), June 18, 1955; *The Financial Times* (London), August 6, 1954.
134. *The New York Times*, June 3, 1954.
135. D., *Proc. Camb. Phil. Soc.* **35**, 416, 1939.
136. Ref. 89. n. 393.

137. D., *The Development of Quantum Theory*, Gordon and Breach, New York, 1971.
138. D., *Eureka* No. 32,2-4, October 1969.
139. P. Ramon, письмо к А. Pais, February 22, 1996.
140. J. Lannutti, письмо к А. Pais, May 19, 1986.
141. Цитируется по R. Peierls in ref. 130.