

П. А. М. Дирак (8.VIII-1902—20.X-1984)

Присядь на корточки и, как ребенок, смотри, что происходит, приготовься отбросить любые укоренившиеся представления, упрямо следуя велению природы, куда и как бы она тебя ни вела, иначе ничему не научишься.

Из Томаса Хаксли

Разные бывают люди на свете. Смелые путешественники открывали материки, добирались пешком до полюса Земли. Полководцы завоевывали новые страны. Описание их бурной жизни читают поколения.

Но есть люди, труд которых не измеришь числом поверженных дивизий, километрами пути. Это люди, которые изучают природу. Труд естествоиспытателя почти всегда незаметен, и оценить его упорство и героизм нелегко. Это относится и к одному из самых замечательных людей нашего века Полю Адриену Морису Дираку.

Его внешне спокойная жизнь полна приключений не менее интересных, чем те, которые выпадают на долю искателей сокровищ. Только эти приключения скрыты от непосвященных, и лишь люди, близкие к физике, знают, сколь драматичны бывают события и сколь труден бывает путь к триумфу.

Слава пришла к нему, когда ему было 30 лет. Путь к успеху кажется простым только на первый взгляд. Для успеха одного таланта мало. Он требует большого упорства и хотя бы немного удачи. Жизнь Дирака складывалась именно так.

Дирак родился 8 августа 1902 года в английском городе Бристоле *). Странная его фамилия имеет галльско-романское происхождение. Окончание «ас» связано с латинским «асус» и особенно часто встречается в районе департамента Шарент.

В 440 км к юго-западу от Парижа есть место, носящее название Форе-де-Дирак; здесь в 10 км от города Ангулем расположена деревня Дирак. Правда, мы не знаем, имеют ли предки Дирака к ней какое-либо отношение.

Фамилия де Дирако встречается во французской хронике начала XII века. Это все, что известно историкам.

Самое раннее свидетельство о предках Дирака — запись о рождении Дидье Дирака в 1721 году. История рода Дирака связана со

*) Сведения о жизни Дирака взяты из двух авторитетных источников. Это статья Р. Далитца и Р. Пайерлса в официальном сборнике посмертных биографий членов английской Академии [1] (Royal Society of London) и четвертый том истории квантовой механики Я. Мехры и Г. Рехенберга [2]. Полезно посмотреть выпуск «Успехов физических наук» [5], посвященный квантовой механике, который содержит переводы статей, обзоры и библиографию.

Швейцарией, откуда отец Поля Дирака, Чарльз Адриен Ладислас Дирак эмигрировал в Англию, где он зарабатывал преподаванием французского языка. К 1902 году, году рождения Поля, Чарльз и его молодая жена Флоренс (урожденная Холтен) живут в своем доме в Бристоле. Кроме Поля в семье было еще двое детей — Реджинальд Чарльз Феликс (1900) *) и Беатрис Изабелла Маргерит (1906). Дети были зарегистрированы как швейцарские подданные и сменили подданство в 1919 году, когда их отец стал гражданином Британии.

Отец, родным языком которого оставался французский, настаивал на том, чтобы в его доме говорили на этом языке. Этому способствовал и замкнутый образ жизни семьи. «В наш дом никто не приходил за исключением, может быть, немногих учеников отца... У нас не было никаких гостей», — вспоминал Дирак. Даже трапезы в доме не были общими. Поль обычно разделял компанию отца. Брат и сестра оставались с матерью на кухне. Требование отца говорить только по-французски мешало общению, и молчаливость, привычка к размышлениям в одиночестве стали характерными чертами Поля.

Отец преподавал в несколько старомодном учебном заведении Merchant Venturers (MV), что-то вроде Школы торговых предпринимателей. Это было объединение начальной и высшей школ (аналог наших начальной и средней школ) и технического колледжа. Отец заботился об образовании сына. Он определил его в свое учебное заведение, что дало хорошие результаты. Дирак так рассказывал об этом времени [1, с. 141]:

«MV была великолепной школой естественных наук и современных языков. В ней не было ни латинского, ни греческого, чему я был очень рад, ибо я совсем не воспринимал древние культуры. Я был очень счастлив, что могу посещать эту школу. В MV я учился с 1914 по 1918 год, как раз во время первой мировой войны. Многие парни покинули школу ради служения нации. В результате старшие классы совсем опустели. Чтобы заполнить пробел, стали продвигать младших в той степени, в какой они могли справиться с более сложной работой. Мне это было очень выгодно: я быстро «проскочил» младшие классы и в очень раннем возрасте познакомился с основами математики, физики, химии на вполне высоком уровне. Математику я учил по книгам, которые, как правило, содержали больше, чем знал класс. Быстрое продвижение вперед способствовало дальнейшим моим успехам. Но это мешало моему участию в спортивных играх, происходивших по средам во второй половине дня. Я играл в футбол и крикет; остальные участники игр были старше и сильнее меня, и мне не сопутствовала удача... Однако в школе ценили мою преданность науке.

Очень полезно было и то, что школа располагалась в одном здании с техническим колледжем. Занятия в колледже проходили по вечерам, после того, как кончались занятия в школе. Колледж обладал великолепными лабораториями, которые днем были откры-

*) Он покончил жизнь самоубийством в 1924 году.

ты для школы. Кроме того, некоторые сотрудники школы совмещали преподавание в школе днем с преподаванием в колледже вечером».

Одним из таких преподавателей был и отец Поля. Человек с трудным характером, не слишком любимый учениками, он был превосходным учителем. Поль вспоминал о нем: «Мой отец преподавал французский в той же школе. Он был достаточно жестким человеком и часто давал ученикам контрольную, не объявляя об этом заранее, так что они не могли к ней подготовиться. Он требовал от них готовности к любой проверке. Поэтому его популярность среди ребят была не очень велика, но зато он весьма успешно готовил их к сдаче экзаменов, чему они были рады».

В 1918 году Дирак становится студентом электротехнического факультета Бристольского университета, который помещался в том же здании, где располагалась школа. В 1921 году он закончил университет, как бы мы сказали, с отличием. Но способности его к технике не были оценены достаточно высоко и работу найти ему не удалось.

В это время он впервые познакомился с теорией относительности, курс которой читал профессор философии Брод. Поль серьезно увлекся математикой и сделал попытку поступить в университет в Кембридже. Однако он не смог получить стипендию и вернулся в Бристоль, где ему разрешили слушать лекции неофициально, без оплаты за обучение.

Среди его учителей на математическом факультете в Бристоле был математик Петер Фрезер. Неизвестный своими работами, он был настоящим педагогом, прививавшим своим ученикам понимание красоты математики и ее логической стройности, в частности, красоты геометрии и ее проективной реализации. Уроки Фрезера глубоко запали в душу Дирака.

Только через два года, получив небольшую стипендию, Дирак смог стать аспирантом (postgraduate) в Кембридже.

Кембридж, куда в 1923 году приехал Дирак, был последним этапом в рождении гения. Через полгода он напечатал свои первые две работы по статистической механике. Эти работы отражали интересы Ральфа Фаулера (его руководителя). Но уже в 1925 году появляется его работа со знаменитым релятивистским волновым уравнением, носящим теперь его имя.

Превращение не очень удачливого инженера (фирма, в которой он прошел инженерную практику, не проявила к нему интереса) в крупнейшего ученого выглядит, как чудо. Однако чудо имеет вполне рациональное объяснение. Можно сказать, что условия детства, годы учебы в Бристоле получили органическое завершение в Кембридже. Может быть, ни в одном другом месте возможности Дирака не реализовались бы с такой полнотой.

В Кембридже 20-х годов работали патриарх ядерной физики Эрнст Резерфорд, изобретательный П. Л. Капица, астрофизики А. Эддингтон и А. Милн, виртуозные математические физики Ч. Дарвин, Р. Фаулер, Д. Харди и многие другие «звезды естествознания».

В Кембридже всегда знали все, что происходит во всех лабораториях мира. Практически все физики Европы и США приезжали в Кембридж рассказать о своих работах.

Это все, что было нужно Полю Дираку.

О Дираке ходило много историй. Так, в 1957 году я вместе с С. П. Капицей сопровождал Дирака в Дубну. Как было принято, шофер часто сбрасывал газ, чтобы сэкономить бензин. После долгого молчания Дирак спросил, зачем он это делает. Я ему объяснил. Дирак заметил: «А может он не менять скорость? А то я все время об этом думаю».

В той же поездке в Дубну его спросили, какой у него любимый детектив (он сказал, что читает сейчас Агату Кристи). Ответ был такой: «Детектив не может быть любимым, он должен удивлять».

Мехра рассказывал, что ему пришлось завтракать вместе с Дираком в колледже Св. Джона. Мехра начал разговор с замечания, что сегодня очень ветрено. Дирак молча встал из-за стола и пошел к выходу. Мехра испуганно стал соображать, чем он обидел маэстро. Но Дирак подошел к двери, приоткрыл ее и спокойно вернулся к столу. Сев, он сказал: «Да».

После одной из лекций Дирака председательствующий напомнил, что остался без ответа вопрос (кто-то в аудитории был не согласен с одним из высказываний Дирака). Но Дирак ограничился репликой: «Это не был вопрос, это было утверждение».

В некотором смысле он так же относился к Природе — все должно быть логично и все должно быть красиво. Правда, красоту формул не всем дано понять, но интуиция Дирака почти никогда его не обманывала. Примеры этого можно найти в его лекциях.

Удивительно, что далекого от политики Дирака задевала нелепая волна шпиономании. Он часто посещал до войны Москву. Здесь у него были близкие друзья: И. Е. Тамм и П. Л. Капица. Он был хорошо знаком и с Я. И. Френкелем. Поездки в нашу страну были для него радостным событием. Но в 1945 году, когда Академия наук СССР праздновала свое 220-летие, Дирака не выпустили из Англии, сославшись на его участие в военных работах (начальные расчеты установок по разделению изотопов *)).

В 1954—1955 годах его приглашают посетить Принстон (США). Госдепартамент отказывает ему во въездной визе (Дирак считал, что запрет был связан с поездками в СССР). Вспомнив, кроме того, что Черчилль подозревал в Н. Боре шпиона, мы увидим, как была распространена необоснованная подозрительность, как правительственная бюрократия могла предавать науку, а с нею и человеческую мораль.

Последние годы жизни Дирака были спокойными. В 1969 году он ушел на пенсию (Кембриджская администрация не сделала для него исключения из правил). Он уехал во Флориду, где работал в центре теоретической физики и в университете штата.

*) Поездки Дирака в СССР описаны в превосходной статье В. Я. Френкеля (Успехи физ. наук. — 1987. — Т. 153. — С. 173).

Во Флориде он сохраняет свою старую привязанность к долгим прогулкам в одиночестве (редко со своей дочерью). Но силы постепенно иссякают, прогулки сокращаются, а 20 октября 1984 года наступает конец. Похоронен Дирак вдали от Европы на кладбище в Таллахаси.

Однако вернемся к физике.

Труд ученого не всегда понятен постороннему, а многие открытия естествознания сделаны в области, далекой от практической жизни, однако их влияние на культуру, технику, на развитие человеческой истории часто оказывается значительно большим, чем это могло казаться современникам. Не будет преувеличением сказать, что научно-технические революции, о которых так много говорят, зарождались почти всегда в тиши рабочих кабинетов, и их первые результаты — протоколы опытов или страницы формул — могли волновать лишь немногих.

Дирак был одним из тех, кто создавал квантовую физику. Начало этой науки было очень абстрактным, а ее практические приложения сейчас неисчислимы. Работы Дирака представлялись самыми абстрактными, но в них оказались заложенными глубокие идеи, которые получили удивительное развитие лишь много лет спустя. Об истории квантовой механики написано много книг (см., например, [2—4]). В них подробно описана роль участников великих событий. Каждый из них думал и работал по-своему. Особенно выделялся своим пониманием физики Дирак.

Ограничимся всего несколькими иллюстрациями метода мышления Дирака, так сказать, психологией его творчества, оставляя в стороне техническую сторону истории науки. В основу изложения положены многочисленные его лекции и интервью, в которых он обращался к тем моментам своей жизни, когда ему открывалось решение трудной задачи.

Начнем, следуя советам кэрроловского короля, с начала, с события, которое оказалось для Дирака необычайной удачей.

28 июля 1925 года в Кембридж приехал Вернер Гейзенберг, который выступил с докладом «Аномалии в зеэман-эффекте» в Клубе Капицы («Зоология термов и ботаника Зеэмана» — так этот доклад записан в дневнике клуба).

Клуб Капицы играл в Кембридже большую роль. Он был открыт 17 октября 1922 года, с тех пор на его собраниях обсуждались практически все физические проблемы того времени. Известный английский физик Дж. Бернал заметил о клубе Капицы: «Он представлял собой своего рода Великое судилище по всем важным вопросам физики; люди с большими именами „вызывались“, как на суд, и подвергались суровому допросу, ответы их часто прерывались. Как правило, „допрашивал“ сам Капица; из уважения к его энтузиазму никто против этого не возражал» [2, с. 75]. Заседания клуба происходили по четвергам после ужина. В 1924 году Дирак стал членом клуба.

Участие Дирака в этом клубе привело его к дружбе с П. Л. Капицей, а позже и к совместным работам. Их работа 1933 года «Об

отражении электронов стоячей световой волной» [6] была отмечена особой красотой. О ней вспомнили лишь недавно, а ее экспериментальное подтверждение появилось лишь в 1987 году [7] (см. также [8]).

Идея работы состояла в том, что по законам квантовой механики рассеяние происходит в два этапа. Стоячую волну можно разложить на две бегущие навстречу друг другу волны с волновыми векторами k и $-k$. Электрон поглощает квант света с волновым вектором k , например. Если число квантов $N \gg 1$, то второй этап состоит в том, что электрон излучает свет с волновым вектором $-k$. Это классическое вынужденное излучение — заряд в поле излучает свет с тем же волновым вектором, которым описываются колебания электрического поля, т. е. с той же частотой и с тем направлением, с какими его это поле «раскачивает». В результате импульс электрона изменяется на $2k$. Как нетрудно видеть, это есть условие дифракции.

Менее известна начатая экспериментальная работа по разделению изотопов во вращающемся потоке газа, прерванная почти в самом начале из-за переезда П. Л. Капицы в Москву. Однако эти работы были все же случайными (но неизбежными) эпизодами в творчестве Дирака.

Главным эпизодом стал доклад Гейзенберга, с которого мы начали рассказ о семинарах Капицы.

В своем докладе Гейзенберг подчеркнул необходимость новой динамической теории атома. В разговоре с Фаулером Гейзенберг упомянул и о своих новых результатах. Фаулер попросил Гейзенберга прислать ему корректуру его работы, и в середине августа 1925 года статья Гейзенберга пришла по почте в Кембридж. Фаулер поручил Дираку ее разобрать. Так в кратком изложении представляется пролог, в котором Дирак вступил в новую механику.

Дирак отметил в идеях Гейзенберга то, что самому Гейзенбергу казалось скорее трудностью теории, чем ее триумфом, — удивительный факт некоммутативности переменных *). «В то время как в классической физике $x(t)y(t)$ всегда равно $y(t)x(t)$, в квантовой теории это в общем случае не имеет места», — писал в своей статье Гейзенберг [9]. Дирак в одной из своих лекций замечает: «...Я увидел, что некоммутативность в действительности есть доминирующая характеристика теории Гейзенберга, поэтому я сконцентрировал свое внимание на идее некоммутативности и на том, как надо изменить обычную динамику, которой все пользуются до сих пор, чтобы включить эту идею» [2, с. 129].

В изложении Гейзенберга новый метод выглядел ограниченным. Первая теория Гейзенберга относилась только к одномерному осциллятору (хотя и ангармоническому). Для решения следующей основной задачи — вычисления уровней атома водорода — Паули

*) Термин «коммутационные соотношения» был придуман Дираком и заменил принятый в то время термин «перестановочные соотношения». Дирак считал, что перестановками физики называют перестановки координат в системе многих тел.

придумал специальный метод (превратившийся в руках Фока в красивую теорию, основанную на четырехмерной симметрии). Только в работах Шрёдингера «Квантование как задача о собственных значениях. I—IV» [10] (первая из которых получена редакцией 27 января и опубликована 13 марта 1926 года) было объяснено, как решать задачу о движении частиц в произвольном потенциале.

Превратить теорию Гейзенберга в настоящую динамическую теорию и поставил своей задачей Дирак.

В теорию Гейзенберга входили и координаты, и импульс, но очень необычные. Это были не числа, а странные величины, которые М. Борн идентифицировал как матрицы. Они подчинялись условию, впервые написанному М. Борном и П. Йорданом [11]:

$$pq - qp = \hbar/2\pi i.$$

Ничего похожего в классической механике не было. Тем не менее такое красивое условие не могло быть лишним.

Идея решения пришла в сентябре 1925 года во время обычной воскресной прогулки. Дирак вспомнил о скобке Пуассона: «. . . Я... найдя в «Аналитической динамике» Уиттекера скобку Пуассона, обнаружил, что это как раз то, что мне нужно» [12, с. 122].

Работа Дирака «Основные уравнения квантовой механики» [13] 7 ноября была представлена Фаулером в «Известия Королевского общества» и вышла из печати менее чем через месяц — 1 декабря того же года *).

Этой работой было положено начало квантовой динамике, опирающейся на метод Гамильтона и естественно объединившей квантовую теорию Гейзенберга и волновую механику Шрёдингера. В начале 1926 года физики были удивлены самой возможностью существования двух, на первый взгляд, разных теорий. Доказательство их эквивалентности дал Шрёдингер (в работе [14], полученной редакцией 18 марта и опубликованной 4 мая 1926 года). Отметим, что близко к волновой механике подошел Ланцош в почти не замеченной работе [15] (полученной редакцией 22 декабря 1925 года и опубликованной 26 февраля 1926 года), а независимо от Шрёдингера доказательство эквивалентности двух теорий дали также Паули в письме к Йордану от 12 апреля 1926 года (опубликованном лишь в 1973 году) и Эккарт в конце мая 1926 года (см., например, [5, с. 693]).

В этой форме теории, как ее представил в своих работах Дирак, не возникает самой проблемы. Гейзенбергова и шрёдингерова картины были просто разными представлениями (уравнениями, написанными в разных системах координат) одних и тех же динамических законов механики некоммутирующих переменных.

Работа Дирака была не только обобщением уравнений Гейзенберга. В ней содержалось утверждение, что метод, развитый в

*) Нельзя не отметить, что важными, если не необходимыми условиями эффективной работы физиков из разных городов были интенсивность взаимных общений, быстрота почты и необычайная (с нашей точки зрения) скорость журнальных публикаций.

классической механике в прошлом веке Гамильтоном, приобретает общий характер.

С легкой руки Дирака гамильтонова форма квантовой механики стала общепринятой.

С самого начала Поль Дирак не только «изобретал» уравнения, но и создавал новый язык науки.

Еще одно высказывание Дирака: «На этом этапе у меня было преимущество перед Гейзенбергом, потому что у меня не было страхов. Я не боялся того, что теория Гейзенберга потерпит крах. Ее крах не поразил бы меня в той мере, в какой он поразил бы Гейзенберга... Я думаю, что, как общее правило, автор новой идеи оказывается далеко не лучшей кандидатурой для развития этой идеи: страх, что случится нечто плохое, оказывается слишком сильным, и это мешает ему посмотреть на новый метод с независимой, сторонней точки зрения, как этого требует ход событий...». Но и сам Дирак испытал похожее чувство, торопившее его с публикацией релятивистского уравнения электрона. В этой работе он ограничивался лишь первым приближением в задаче об атоме водорода. «Вы спросите,— говорил он через 50 лет,— почему я сразу не перешел к рассмотрению высших приближений? Причина была в том, что я просто боялся. Я боялся, что в высших приближениях результат окажется не вполне правильным, и был столь счастлив, что теория верна хотя бы в первом приближении, что хотел закрепить успех публикацией в том виде, в каком работа была сделана, не подвергаясь риску неудачи в высших приближениях. Высшие приближения были сделаны Дарвином, который писал и рассказывал мне о своих результатах. Я был рад услышать, что они согласуются с опытом» [12, с. 143]. Мудрый старый ученый дает, наверное, правильное объяснение поступкам ученого молодого.

Взгляды и убеждения ученого лучше проявляются не в его высказываниях о самом себе, а тогда, когда он отдает должное другому. У Дирака есть замечательное выступление на одном из многочисленных симпозиумов, посвященных 100-летию со дня рождения Эйнштейна, которые проходили по всему миру осенью 1979 года. На симпозиуме в Мюнхене (18—20 сентября), посвященном теме «Влияние современных научных идей на общество», выступил Дирак [16].

Он, в частности, рассказал, что в 1906 году немецкий физик Кауфман сообщил о своих результатах по измерению зависимости массы электрона от скорости. Обсуждались две модели — релятивистская модель Лоренца — Эйнштейна (модель электрона, претерпевшего продольное сжатие при движении) и модель Абрагама, в которой электрон представлялся твердым шариком. Кауфман объяснил, что его опыты подтверждают модель Абрагама.

Дирак продолжал:

«Это известие сразило Лоренца наповал. „Вся моя работа пошла насмарку“, — заявил он *). Пуанкаре воспринял результат Кауф

* «Je suis d'op au bout de mon latin» (в письме к Пуанкаре от 8 марта 1906 года, см. [17, с. 137]).

мана как просто накладывающий некоторые ограничения на его схему преобразований. Эйнштейн отреагировал на вывод Кауфмана совершенно иначе.

Эйнштейн считал, что его четырехмерная симметрия настолько красива математически, что она просто должна быть правильной, а если эксперимент этого не подтверждает, то нужно лишь подождать, не обнаружатся ли какие-нибудь неполадки в экспериментах. В общем, Эйнштейн не особенно волновался. Он был внутренне убежден в правильности своей точки зрения, а по отношению к эксперименту занял позицию поживем — увидим.

Через несколько лет эксперименты были повторены, и результаты подтвердили модель Лоренца — Эйнштейна и противоречили модели Абрагама... Так что реакция Эйнштейна оказалась правильной. Для него такое отношение было весьма характерным. Оно связано с большим доверием к фундаментальным идеям, если они опираются на безупречно красивый математический аппарат, чем к экспериментальным результатам. Экспериментаторы всегда переоценивают точность своих данных и склонны совершать ошибки, поэтому не стоит сразу реагировать на их сообщения» [16, с. 15].

В этом рассказе Дирака — его научное и жизненное кредо, которое он в разной форме не уставал повторять. Когда Дирак рассказывал о своих работах, слушателям казалось, что он не столько объясняет существующий мир, сколько, как творец, создает свой собственный, красивый, математически строгий. Лишь в конце он возвращается к реальности. Сравнивая свой мир с миром реальным, Дирак порою сталкивался с такими неожиданностями, которые другие сочли бы за сокрушительный удар по теории. Но именно это и не было свойственно Дираку.

Наиболее примечательной историей, в которой характер Дирака проявился во всей своей силе, была история открытия уравнения, носящего его имя.

На Сольвеевском конгрессе в октябре 1927 года к Дираку подошел Бор. Дальше цитируем самого Дирака: «Ко мне подошел Бор и спросил: „Над чем сейчас работаете?“ Я ответил: „Пытаюсь построить релятивистскую теорию электрона“. Бор тогда сказал: „Но ведь Клейн уже решил эту задачу“. Я был несколько обескуражен и стал объяснять ему, что решение Клейна, основанное на уравнении Клейна — Гордона, неудовлетворительно, так как его нельзя согласовать с моей общей физической интерпретацией квантовой механики. Мне, однако, почти ничего не удалось объяснить, потому что наш разговор был прерван началом лекции, и вопрос повис в воздухе» [12, с. 141].

Дираку не нравилось, что уравнение Клейна — Гордона было второго порядка и не допускало вероятностной интерпретации. И хотя многие думали, что вопрос решен, и то, что считалось плотностью вероятности, надо интерпретировать как плотность заряда, Дирак был недоволен и стремился получить уравнения для одного электрона, а не для системы частиц с разными зарядами. Он добился своего, но решение его удивило. «Я обнаружил из этого уравнения,

что электрон обладает спином, равным $1/2$, и магнитным моментом и что значения спина и магнитного момента согласуются с экспериментальными. Полученный результат был совершенно неожиданным... Я считал, что простейшее решение получится для частицы без спина, а уже затем нужно будет ввести спин...» [18, с. 20].

Уравнение электрона со спином $1/2$, действительно, получилось из требования, что оно должно содержать первую, а не вторую производную по времени. За выигрыш надо было платить.

Для того чтобы разбить сумму четырех квадратов на два линейных множителя, необходимо было ввести матрицы с четырьмя строками и четырьмя столбцами. Двумерных частиц Паули, хорошо описывающих спин в нерелятивистском случае, явно не хватало. Электрон в теории имел лишнюю степень свободы — свободы, как оказалось, перехода в состояние с отрицательной энергией. Это выглядело настолько дико, что впору было отказаться от всего сделанного. Но Дирак придумал другой выход — он поверил в реальность состояний с отрицательной энергией и, воспользовавшись принципом Паули, заполнил все такие состояния электронами, объяснив, что только вакантные места — «дырки» — могут наблюдаться на опыте. «...Здесь скрывалась серьезная трудность. В то время были известны электроны, несущие отрицательный заряд, и протоны, несущие положительный заряд, и все были абсолютно уверены, что кроме электрона и протона других элементарных частиц в Природе нет. Правда, Резерфорд иногда рассматривал возможность существования третьей частицы — нейтрона. Но это предположение гипотетического нейтрона не имело никаких оснований. Резерфорд просто говорил о том, как был бы полезен нейтрон для экспериментаторов в качестве идеального снаряда для стрельбы по атомным ядрам: полет нейтрона не возмущался бы внешними электронами. Но никто не верил в реальность нейтрона. Всем казалось очевидным, что поскольку есть два сорта электрических зарядов, должна быть и два сорта частиц для их переноса. Никто не шел дальше» [12, с. 144].

Реальный ход событий известен. Паули и Вейль показали, что масса дырки должна совпадать с массой электрона и, значит, дырка не может быть протоном. Ситуация была критическая.

Дирак продолжал:

«Однако я не намеревался отвергать эту теорию и выдвинул ее как теорию электронов и протонов. Разумеется, очень скоро на меня начались нападки по поводу того, что масса дырки отличается от массы исходного электрона. Думаю, что наиболее определенно высказался Вейль. Он указал, что математические дырки должны иметь ту же массу, что и электроны; эта точка зрения стала общепринятой.

Оппенгеймер предложил такую теорию, в которой дырки имеют ту же массу, что и электроны, но в Природе существуют какие-то особые причины, по которым дырки нельзя было наблюдать. Он не мог назвать эти особые причины, а сказал о них как о чем-то, что необходимо объяснить в будущем. Оппенгеймер был очень близок к

истине. Дырки эти были частицами той же массы, что и электрон, а не наблюдали их просто потому, что экспериментаторы не искали их в правильном месте.

Я вспоминаю, что когда посещал лекции экспериментаторов и Кавендишской лаборатории, был такой случай (не помню точно — случилось это в 1926 или в 1927 году): в разговоре после лекции лектор отметил удивительный факт, с которым он столкнулся в своих опытах. Он имел дело со следами частиц в камере Вильсона. В присутствии магнитного поля все следы были искривлены. Ясно, что если известен заряд частицы, то известно, в какую сторону она двигалась. Замечание состояло в том, что часто наблюдались треки, которые вели в источник. Предполагалось, что частицы эти — электроны, а тогда искривление следа указывало, что они летят в источник.

Все это было замечено мимоходом. Никто не думал исследовать явление подробно, а если бы кто-то это сделал, то пришел бы к важному открытию. Это показывает, как можно просмотреть важное открытие из-за того, что люди не придаю достаточно значимости тому, что выглядит как курьез, не стоящий дальнейшей проверки» [12, с. 145]. По-видимому, эта история легендарна. Случай, о котором вспоминает Дирак, относится скорее к 1934 году, когда в Кембридже читал лекцию академик Д. В. Скобельцын. Дело в том, что до Скобельцына никто не ставил опытов с камерой Вильсона в магнитном поле и не мог наблюдать треков позитронов.

Можно добавить и обратное. Когда экспериментатор верит в правильность своих опытов, непонятное иногда превращается в открытие. Излучение Вавилова — Черенкова и эффект Мёссбауэра — примеры таких открытий.

Через несколько лет Блэккетт наблюдал положительно заряженные частицы, но задержал публикацию, считая нужным продолжить опыты. Более смелым был Андерсон. Он опубликовал свои результаты (очень похожие на результаты Блэккетта) и получил Нобелевскую премию. История поучительная!

Уравнения Дирака были опубликованы 1 февраля 1928 года (работа «Теория электрона» поступила в редакцию 2 января 1928 года [19], вторую ее часть редакция получила через месяц — 2 февраля 1928 года, и она вышла в свет 1 марта 1928 года [20]).

В 1930 году Дирак публикует первое издание «Основ квантовой механики», которые он трижды перерабатывал [21]. От издания к изданию взгляд автора на логическую структуру квантовой механики изменялся, и сравнение всех четырех изданий дает весьма интересную картину эволюции его идей *).

Первое издание было встречено настороженно, новый язык автора был необычен, а строгость многим представлялась излишней. Рецензент писал, что автор «требуется от нас отбросить в сторону привычные идеи о связанных с природой явлениях. Мы можем

*) На русском языке есть переводы трех изданий — первого, второго и четвертого [22] — редкий в нашей издательской практике случай.

отнестись к этому, как к приложению чистого разума к физик [23].

Даже Гейзенберг писал о немецком переводе книги Дирака: «По некоторым пунктам у референта сложилось впечатление, что Дирак, вероятно, представляет квантовую механику, в особенности ее физическое содержание, более „символично“, чем это необходимо» [24].

Такое впечатление о методе Дирака сохранялось долго. Лишь дальнейшее развитие квантовой электродинамики, в особенности новых направлений, таких, как квантовая хромодинамика и суперсимметрия, показало неизбежность веры в силу метода гамильтоновой механики, использованной Дираком не только в описанных работах, но и в развитии квантовой статистики и в теориях релятивистских квантовых полей. Книга же Дирака вошла в библиотеку физической классики и стала в ряд с «Математическими основами» Ньютона и «Трактатом об электричестве и магнетизме» Максвелла, отличаясь от них большей близостью к современному читателю. Особенность книги Дирака состоит в том, что она написана на новом языке, ставшем основой языка физики XX века. Такие слова, как наблюдаемая, коммутация, всем известное «аш перечеркнутое» (сербская буква \hbar), δ -функция $*$), скобочные обозначения наблюдаемых и матричных элементов, такие операции, как обход полюсов в комплексной плоскости в фурье-образе амплитуд, δ_{\pm} -функции и даже функциональный интеграл, пришли к нам от Дирака.

Развитие нового языка (особенно в работах Фейнмана, Дайсона) придало журналам и книгам нашего времени то своеобразие, которое отличает их от книг и журналов прошлого века. Здесь можно усмотреть аналогию с искусством, язык которого всегда отражает изменения в человеческом восприятии, в свою очередь преобразая это восприятие.

Наверное, главное, что произошло после Дирака с языком физики, это внедрение в него диаграмм, графов, которые, подобно иероглифам, определяют не слова, а понятия, общие для порой далеких друг от друга явлений. В этом проявляется физическая и математическая красота, значение которой всегда подчеркивал Дирак.

Как всякий человек, даже великий, Дирак мог ошибаться. «Я считаю теорию функций комплексного переменного очень красивой теорией, так как интегралы Коши обладают большой силой. Такое ощущение возникает у меня по отношению к проективной геометрии, в отличие от некоторых других ветвей математики, таких, как теория множеств и топология» [2, с. 118].

Такая оценка сейчас кажется наивной. Топология в теории гелия, канторовы множества в нелинейных системах свидетельствуют о силе и красоте этих наук. Оценка красоты математики не лишена субъективности и подвержена влиянию времени. И в этом

*) Понятие, близкое δ -функции, ввели еще Кирхгоф, а потом Хевисайд и Герц. Но об этом все уже успели забыть.

наука сродни искусству. В данном смысле мышление Дирака сродни мышлению художника и поэта. Но все же послушаем, что говорил Дирак позже: «Красивая теория обладает универсальностью и достаточной силой, чтобы предсказывать, интерпретировать, давать примеры и работать с ними. Но если Вы обладаете универсальными законами и можете их применять, Вам не надо больше обращаться к принципу красоты, потому что при изложении проблем практических приходится принимать во внимание много деталей и все равно все страшно перепутывается» [2, с. 118] (см. также [25]).

Хотелось бы закончить послесловие несколько неожиданной цитатой: «...Я всегда стремился к красоте в математике, а знакомство с проективной геометрией еще больше воодушевило меня, и я остался верен ей на всю жизнь... Проективная геометрия представляла собой необыкновенно полезный аппарат для исследований, но я ничего не писал о ней. Мне кажется, что я никогда даже не упомянул о ней в статьях (хотя я не совсем в этом уверен), ибо понимал, что большинство физиков плохо ее знают. Получив какой-нибудь результат, я переводил его на аналитический язык и превращал свои аргументы в уравнения. Такое доказательство мог понять любой физик, не получивший специальной подготовки... Все сказанное относится и к моим работам о спинорах. Мы должны были работать с величинами совсем нового типа, но и здесь лучший инструмент для исследования дает нам проективная геометрия» [12, с. 114].

Еще несколько лет назад эти слова поставили бы физиков в тупик (они были произнесены в 1972 году). Появление твисторного исчисления и проективных пространств в теории поля еще раз подтвердило пророческий дар Дирака.

Читая Дирака, покоряешься силе познания человека, ощущаешь красоту физического мира, страстным певцом которой был необыкновенный человек Поль Адриен Морис Дирак.

Я. А. Смородинский

Список литературы

1. *Dalitz R. H., Peierls R.* Paul Adrien Morice Dirac, 8 August 1902 — 20 October 1984 // *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society.* — London: Roy. Soc., 1986. — V. 32. — P. 139—185.
2. *Mechra J., Rechenberg H.* The Historical Development of Quantum Theory. New York; Berlin; Heidelberg: Springer — Verlag, 1982. — V. 4 (см. рецензию *Я. А. Смородинского*: *Успехи физ. наук.* — 1989. — Т. 158, вып. 4. — С. 745—747).
3. *Хунд Ф.* История квантовой теории: Пер. с нем. — Киев: Наукова думка, 1980.
4. *Джеммер М.* Эволюция понятий квантовой механики: Пер. с англ. — М.: Наука, 1985.
5. *Успехи физ. наук.* — 1977. — Т. 122, вып. 4.

6. *Kapitza P. L., Dirac P. A. M.* The Reflection of Electrons from Standing Light Waves // Proc. Cambr. Phil. Soc.—1933.— V. 29.— P. 297—300 (перевод в «Успехах физ. наук».—1987.— Т. 153, вып. 1.— С. 105).
7. *Bucksbaum P. A., Bashkansky M., McIlrath T. J. e. a.* // Phys. Rev. Lett.—1987.— V. 58.— P. 349—352.
8. *Сморodinский Я. А.* Несколько эпизодов // Успехи физ. наук.—1987.— Т. 153, вып. 1.— С. 187—190.
9. *Heisenberg W.* Über die quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen // Z. Phys.—1925.— Bd 33.— S. 879—893 (перевод в [5].— С. 574—585).
10. *Schrödinger E.* Quantisierung als Eigenwertproblem // Ann. Phys. (4) — 1926.— Bd 79.— S. 361—376, 489—522; Bd 80.— S. 437—490; Bd 81.— S. 109—139 (перевод в кн. *Шрёдингер Э.* Собрание научных трудов.— М.: Наука (1974).
11. *Born M., Jordan P.* Zur Quantenmechanik // Z. Phys.—1925.— Bd 34.— S. 858—888 (перевод в [5].— С. 586—611).
12. *Dirac P. A. M.* Recollections of an Exiting Era // Proc. of the International School of Physics «Enrico Fermi» Course L VII.— New York: North Holland, 1977.— P. 109—146 (перевод в настоящей книге, с. 7—45).
13. *Dirac P. A. M.* The Fundamental Equations of Quantum Mechanics // Proc. Roy. Soc. Ser. A.—1925.— V. 109.— P. 642—653 (перевод в кн.: *Дирак П. А. М.* К созданию квантовой теории поля: Основные статьи 1925—1958 годов; Пер. с англ. и фр.— М.: Наука, 1990.— С. 25—38).
14. *Schrödinger E.* Über das Verhältnis der Heisenberg — Born — Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen // Ann. Phys. (4).—1926.— Bd 79.— S. 734—756 (перевод, как в [10]).
15. *Lanczos L.* Über einen feldmassige Darstellung der neuen Quantenmechanik // Z. Phys.—1926.— Bd 35.— S. 812—830.
16. *The Impact of Modern Scientific Ideas on Society.*— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1981.— P. 13—23.
17. *Miller A. J.* Albert Einstein's Special Theory of Relativity.— Reading, Mass.: Addison-Wesley Publ., 1981.
18. *Dirac P. A. M.* Directions in Physics.— New York: J. Wiley and Sons, 1978 (перевод: *Дирак П. А. М.* Пути физики.— М.: Энергоатомиздат, 1983).
19. *Dirac P. A. M.* The Quantum Theory of the Electron // Proc. Roy. Soc. Ser. A.—1928.— V. 117.— P. 610—624.
20. *Dirac P. A. M.* The Quantum Theory of the Electron Pt II // Ibid.— V. 118.— P. 351—361.
21. *Dirac P. A. M.* The Principles of Quantum Mechanics.— Oxford: Clarendon Press, 1930; 2nd ed.—1935; 3rd ed.—1947; 4rd ed.—1958.
22. *Дирак П. А. М.* Основы квантовой механики; Пер. с англ.— М.; Л.: ГТТИ, 1932 (перевод 2-го изд.— М.; Л.: ОНТИ, 1937; Принципы квантовой механики; Пер. с 4-го англ. изд.— М.: Физматгиз, 1960; 2-е изд.— Наука, 1979).
23. *Nature.*—1931.— V. 127.— P. 1931.
24. *Heisenberg W.* // Metallwirtschaft, 28 Nov. 1930.— N 48.— P. 988.
25. *Визгин В. П.* П. А. М. Дирак и проблемы взаимодействия физики и математики // Исследования по истории физики и механики. 1988.— М.: Наука, 1988.— С. 88—105.