

Поль Дирак

И

физика

XX

Века





Paul Dirac

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Институт истории естествознания и техники

Поль Дирак И физика XX Века

Сборник научных трудов



Москва «Наука» 1990

Сборник посвящен памяти великого физика, одного из создателей квантовой механики и квантовой теории поля, лауреата Нобелевской премии — Поля Адриена Мориса Дирака (1902—1984). В него вошли доклады состоявшейся в 1986 г. конференции, посвященной творчеству Дирака, несколько статей иностранных авторов. Впервые публикуется обширный архивный материал — переписка Дирака с советскими физиками П. Л. Капицей, И. Е. Таммом, В. А. Фоком. Статьи сборника охватывают все важнейшие темы творчества Дирака: квантовую механику, теорию поля и элементарных частиц, космологию.

Издание предназначено для историков науки, физиков, преподавателей и студентов.

Рецензенты:

*доктор физико-математических наук Б. А. Розенфельд,
кандидат физико-математических наук Б. Е. Явелов*

Редколлегия:

*Б. В. Медведев (председатель),
Вл. П. Визгин, А. Т. Григорьян, И. Ю. Кобзарев,
А. Б. Кожевников (составитель), В. Я. Френкель*

Д $\frac{1401020000-106}{042(02)-90}$ 266-90, I полугодие

ISBN 5-02-000702-1

© Издательство «Наука», 1990

ОТ РЕДАКТОРА

Вряд ли нужно представлять читателю человека, которому посвящен настоящий сборник. «Поль Адриен Морис Дирак (1902—1984) — английский физик, один из создателей квантовой механики» — кратко сформулировано в энциклопедическом словаре. Далее идет более или менее подробный поминальный лист важнейших вкладов, внесенных им в науку:

1925 г., сразу после первой статьи Гейзенберга, — квантовая алгебра, общий способ квантования (8)¹; 1926 г. — статистика Ферми—Дирака, зависящая от времени теория возмущений (14); 1927 г. — общая схема квантовой механики в непрерывном спектре, δ -функция, теория преобразований (16); в том же году заложены основы квантовой электродинамики (мы отсчитываем от этой статьи начало квантовой теории поля): метод вторичного квантования, квантование электромагнитного поля, представление взаимодействия, оказавшееся столь плодотворным впоследствии (17). Следующий, 1928 г. ознаменовался открытием релятивистского уравнения для электрона — знаменитого уравнения Дирака (20, 21). Это открытие — целая глава в истории современной физики, оно повлекло за собой глубокие изменения ряда основных наших представлений. Прежде всего был заново открыт новый по сравнению с тензорами класс неприводимых представлений группы Лоренца — спиноры. Затем выяснилось, что для частиц, описываемых спинорным представлением, спин есть кинематическая неизбежность. Наконец, главным, пожалуй, плодом уравнения Дирака явилось предсказание им спустя три года (в 1931 г.) первой античастицы — позитрона, открытого годом позже.

Продолжаем наше перечисление. 1931 г. — магнитный монополю (33, 78); 1932 г. — метод многовременного формализма (36); 1932 г., совместно с В. А. Фоком и Б. Подольским, — релятивистски инвариантное квантование системы электронов, взаимодействующих с электромагнитным полем (37); 1933 г. — метод функционального интегрирования (38); 1934 г. — логарифмическая перенормировка заряда (42); 1939 г. — метод λ -процесса (58) — первый способ «борьбы с бесконечностями». Этот список можно было бы продолжать, но нам хочется отметить еще только начатый в 1950 г. (хотя корни его фактически лежат уже в некоторых замечаниях работы (14) 1926 г.) цикл работ (82, 84, 102) по построению гамильтоновой теории и правил квантования для систем со связями — одного из важнейших технических средств для описания современных моделей элементарных частиц.

Однако не только количеством и качеством этих работ опреде-

¹ В круглых скобках здесь и далее даются ссылки на работы Дирака. (См. библиографию в конце наст. сб.)

ляется роль Дирака в современной физике. Основным стимулом, который направлял всю 60-летнюю работу Дирака в теоретической физике, было, по-видимому, стремление к простоте и порядку. Он был глубочайше уверен в том, что природа может быть описана простым, красивым и единообразным способом. «Удовлетворительная теория,— писал он на последней странице третьего издания своих «Принципов квантовой механики» (1947),— должна допускать простое решение любой простой физической проблемы». И я думаю, что трудно переоценить то, чем мы обязаны его успехам в этом направлении. Дирак не только превратил квантовую механику из набора рецептов для решения конкретных задач в цельную логически замкнутую теорию, но он создал тот язык — и понятий, и терминов, и символики,— на котором мы изъясняемся в любом разделе квантовой теории. Хочется сказать, что если бы нам (как в детской игре) вдруг запретили пользоваться этим его языком, мы очутились бы в положении строителей вавилонской башни.

Настоящий сборник посвящен памяти Дирака, скончавшегося в 1984 г. в возрасте 82 лет. Два сборника с воспоминаниями его учеников и коллег о нем уже вышли в Англии; у нас же есть и специальная причина для того, чтобы отметить память Дирака в нашей стране,— это та роль, которую сыграл он в становлении советской теоретической физики. Когда она возникала в конце 20-х — начале 30-х годов, работы Дирака относились к тем, которые формировали передний край науки, и по ним учились все тогдашние теоретики. Специально необходимо отметить огромное значение, которое сыграл для образования теоретиков опубликованный в 1932 г. русский перевод книги Дирака «Основы квантовой механики» — первого и, пожалуй, до сих пор лучшего изложения квантовой механики как единой логически последовательной теории, удивительным образом совмещающего в себе предельную научную глубину с ясностью и доступностью учебника.

Но роль Дирака не ограничилась этим идейным влиянием. Он проявлял тогда значительный интерес к нашей стране и науке, 8 раз до войны (и еще 3 раза после нее) посетил Советский Союз, поддерживал интенсивные контакты с советскими учеными. П. Л. Капица и И. Е. Тамм были его ближайшими друзьями, каких у него, кажется, не было даже среди соотечественников. И. Е. Тамма можно даже назвать учеником Дирака. Важными были научные контакты Дирака с В. А. Фоком, Л. Д. Ландау, Я. И. Френкелем, Д. Д. Иваненко, М. П. Бронштейном. Рано получил он в нашей стране и официальное общественное признание — уже в 1931 г. он был избран иностранным членом-корреспондентом АН СССР — наша академия оказалась второй (после Английского королевского общества), удостоившей его этой чести.

В основу сборника легли доклады конференции, состоявшейся в октябре 1986 г. в Институте истории естествознания и техники АН СССР. Несколько статей прислано из-за рубежа. Во второй части сборника опубликована интереснейшая переписка Дирака с советскими физиками.

Б. В. Медведев

Я. А. Смородинский

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.

Томас Генри Хаксли

Внешне спокойная жизнь П. А. М. Дирака 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.

Труд ученого не виден для посторонних глаз, 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, 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 книг¹. В них подробно описывается роль участников великих событий. Каждый из них думал и работал по-своему. Особенно выделялся своим пониманием физики Дирак. Своеобразие Дирака и посвященные эти заметки.

Мы ограничим себя всего несколькими иллюстрациями метода мышления Дирака, так сказать, психологией его творчества, ос-

¹ Из них надо выделить три: Хунд [1], Джеммер [2] и многотомный труд Мехры и Рехенберга [3], который послужил нам важным источником. Полезно также ознакомиться с выпуском УФН [4], посвященным 50-летию квантовой механики, в котором опубликованы обзоры и переводы классических статей.

тавляя в стороне техническую сторону истории науки. За основу изложения мы взяли многочисленные его лекции и интервью, в которых он обращался к тем моментам своей жизни, когда ему открывалось решение трудной задачи.

Начнем, следуя советам кэрролловского короля, сначала.

28 июля 1925 г. Вернер Гейзенберг приехал в Кембридж и выступил с докладом «Аномалии в зеeman-эффекте» в «клубе Капицы» («Зоология термов и ботаника Зеемана» — так этот доклад записан в дневнике клуба.)

Клуб П. Л. Капицы играл в Кембридже большую роль. Он был открыт 17 октября 1922 г.; 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, «допрос» вел сам Капица; из уважения к его энтузиазму никто против этого не возражал» (Цит. по: [3. С. 75]). Заседания клуба происходили по четвергам после ужина. В 1924 г. Дирак стал членом клуба². Участие Дирака в этом клубе способствовало возникновению его дружбы с П. Л. Капицей и привело к совместным работам. Хорошо известна их статья 1933 г. «Об отражении электронов стоячей световой волной» (39). В ней не просто описан процесс обратного комптон-эффекта — рассеяния электрона светом. Главное, на что обращают внимание авторы, это возможность экспериментального наблюдения эффекта вследствие большого числа квантов N в электромагнитной волне. В силу соотношения неопределенности $\Delta N \cdot \Delta \varphi > 1$ фаза световой волны в такой системе вполне определена, и рассеяние на стоячей волне оказывается подобным рассеянию на диффракционной решетке. Этот эффект в 1987 г. был подтвержден на опыте. С Капицей Дираком была начата и экспериментальная работа по разделению изотопов во вращающемся потоке газа, прерванная почти в самом начале из-за переезда П. Л. Капицы в Москву.

Но мы отклонились от темы — доклада Гейзенберга.

В своем докладе Гейзенберг подчеркнул необходимость новой динамической теории атома. В разговоре с Фаулером, который был научным руководителем Дирака в Кембридже, Гейзенберг упомянул и о своих новых результатах. Фаулер попросил Гейзенберга прислать ему корректуру его работы, и в середине августа 1925 г. статья Гейзенберга пришла по почте в Кембридж. Фаулер поручил Дираку ее разобрать.

² Дирак вспоминает: «По правде говоря, такое время было не особенно удобным, так как после ужина я был совсем сонным. Работал я обычно по утрам: я думаю, что утро — это время, когда работоспособность мозга достигает максимума; к концу же дня я становлюсь довольно тупым, особенно после ужина, поэтому я находился не в лучшем состоянии духа для восприятия новой информации. Все же посещение собраний клуба Капицы себя оправдало» (162. С. 118).

Так, в кратком изложении представляется пролог вступления Дирака в новую механику.

Дирак отметил в идеях Гейзенберга то, что самому Гейзенбергу казалось скорее трудностью теории, чем ее достижением, — удивительный факт некоммутативности переменных³. «В то время как классически $x(t)y(t)$ всегда равно $y(t)x(t)$, в квантовой теории это в общем случае не имеет места», — писал в своей статье Гейзенберг [5]. 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» (Цит. по: [3. 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 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» [6] (первая из которых получена редакцией 27 января и опубликована 13 марта 1926 г.) было объяснено, как решать задачу о движении частиц в произвольном потенциале.

Первая работа Гейзенберга оставила открытым вопрос о том, как надо писать общие динамические уравнения новой теории. Почти все прояснилось после того, как М. Борн увидел в вычислениях Гейзенберга алгебру матриц и в совместной работе с П. Йорданом [7] написал матричное соотношение

$$pq - qp = R/(2\pi i).$$

Дирак догадался, что соответствует этому соотношению в классической механике. Идея решения пришла в сентябре 1925 г. во время обычной воскресной прогулки. Дирак вспомнил о скобках Пуассона и на следующий день: «Я посмотрел на скобки Пуассона в аналитической динамике Уиттекера и увидел, что это как раз то, что мне нужно» (162. С. 122).

Работа Дирака «Основные уравнения квантовой механики» (8) 7 ноября была представлена Фаулером в «Известия Королевского общества» и вышла из печати менее чем через месяц — 1 декабря того же года⁴.

³ Термин «коммутационные соотношения» был придуман Дираком и заменил обычный тогда термин «перестановочные соотношения». Он считал, что перестановками физики называют перестановки координат в системе многих тел.

⁴ Нельзя не отметить, что важными, если не необходимыми, условиями эффективной работы нескольких физиков, работавших в разных городах, были интенсивность взаимных общений, быстрота почты и необычайная (с нашей точки зрения) быстрота журнальных публикаций.

Этой работой было положено начало квантовой динамике, опирающейся на метод Гамильтона, естественно объединившей как квантовую теорию Гейзенберга, так и волновую механику Шрёдингера. В начале 1926 г. физики были удивлены самой возможностью двух, с первого взгляда разных теорий. Доказательство их эквивалентности дал Шрёдингер (в работе [8], полученной редакцией 18 марта и опубликованной 4 мая 1926 г.). Отметим, что близко к волновой механике подошел Ландош в почти незамеченной работе (9) (полученной редакцией еще 22 декабря 1925 г. и опубликованной 26 февраля 1926 г.), а независимо от Шрёдингера доказательство эквивалентности двух теорий дали также Паули в письме к Иордану от 12 апреля 1926 г. (опубликованном лишь в 1973 г.) и Эккарт в конце мая 1926 г. (см., напр.: [4. С. 693]).

В той форме теории, как ее представил в своем учебнике (30) Дирак, не возникает самой проблемы. Гейзенбергова и шрёдингерова картины в его изложении оказываются просто разными представлениями (уравнениями, написанными в разных системах координат) одних и тех же динамических законов механики некоммутирующих переменных.

Еще одно высказывание Дирака: «На этом этапе у меня было преимущество перед Гейзенбергом, потому что у меня не было его 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 это требует ход событий...» (162. С. 121). Но и сам Дирак испытал похожее чувство, торопившее его с публикацией релятивистского уравнения электрона. В этой работе он ограничился лишь первым приближением в задаче об атоме водорода. «Вы можете удивляться, — говорил он через 50 лет, — почему я сразу не перешел к рассмотрению высших приближений. Причина была в том, что я просто боялся это сделать. Я боялся, что в высоких 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, не подвергаясь риску неудачи в высшем приближении. Высшие приближения были сделаны Дарвином, который писал и рассказывал мне о своих результатах; я был рад услышать, что все согласуется с опытом» (162. С. 143). Мудрый старый ученый дает, наверно, 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 г.



П. Дирак и В. Гейзенберг, 1933 г.

На симпозиуме в Мюнхене (18–20 сентября), посвященном теме «Влияние современных научных идей на общество», выступил Дирак.

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

Дирак продолжал: «Когда Лоренц услышал об этом результате, он был совершенно выбит из колеи. Он воскликнул: „Je suis donc au bout de mon latin“⁵. Пуанкаре воспринял это как ограничение

⁵ «Я исчерпал всю свою латынь» — в письме к Пуанкаре от 8 марта 1906 г. (см.: [10]). Лоренц имел в виду, что он исчерпал ресурсы и признает поражение.

схемы преобразований. Когда же об этом услышал Эйнштейн, его реакция была совсем другая. Эйнштейн чувствовал, что его теория настолько красива математически, что она просто обязана быть правильной, и, если опыт дает другой ответ, надо подождать и посмотреть: может быть, что-то неправильно с опытом. Так что Эйнштейн не был взволнован. Он был твердо убежден в справедливости своей точки зрения и занял выжидательную позицию к эксперименту.

Через несколько лет опыт был повторен, и новые результаты оказались в пользу модели Лоренца и Эйнштейна... Позиция Эйнштейна оказалась правильной. Такая позиция была характерна для него. Она требовала большей веры в свои фундаментальные идеи, если только они основываются на ясной и красивой математике, чем в результате опыта. Экспериментаторы всегда переоценивают свои результаты и склонны делать ошибки. Нельзя позволять им слишком себя запутывать» (185а. 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, то слушателям казалось, что он не столько объясняет существующий мир, а, 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. Решающим критерием истины для него была логическая замкнутость. Так, он никогда не мог смириться с современной ему теорией релятивистских квантовых полей, основанной на методе перенормировок.

В 1973 г. Дирак прочитал в Дубне лекцию о струнной модели электрических зарядов. В ней заряды всегда выступали попарно, соединенные между собой ненаблюдаемой линией — струной. В докладе была представлена первая, еще очень несовершенная струнная теория (пока еще нерелятивистская).

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 г. к Дираку подошел Бор. Дальше цитируем самого Дирака: «Бор подошел ко мне и спросил: „Над чем сейчас работаете?“. Я ответил: „Пытаюсь получить релятивистскую теорию электрона“. Бор тогда сказал: „Но ведь Клейн уже решил эту проблему“. Я был несколько обескуражен. Я стал объяснять ему, что решение задачи Клейна, основанное на уравнении Клейна—Гордона, неудовлетворительно, так как его нельзя согласовать с моей общей физической интерпретацией квантовой механики. Однако я так и не смог объяснить что-либо Бору, так как наш разговор был прерван началом лекции и вопрос повис в воздухе» (162. С. 121).

Вопрос же был в том, что Дираку не нравилось, что уравнение Клейна—Гордона было второго порядка и не допускало вероят-

ностной интерпретации. И хотя многие думали, что вопрос решен, и то, что считалось плотностью вероятности, надо было 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 частиц без спина, а уже затем нужно будет ввести спин...» (170. С. 20 рус. пер.)

Уравнение электрона со спином $1/2$, действительно, получалось 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. «Теперь возникла серьезная трудность. В то время все знали об электроне — носителе заряда отрицательного и протоне — носителе заряда положительного, и каждый был абсолютно уверен, что, кроме электрона и протона, других элементарных частиц в природе нет. Правда, Резерфорд как-то говорил о существовании третьей частицы — нейтрона. Это предположение гипотетического нейтрона не имело особых оснований. Он просто говорил о том, как был бы полезен нейтрон для экспериментаторов в качестве идеального снаряда, чтобы стрелять в атомные ядра, так как он не возмущался бы внешними электронами. Но никто реально не верил в нейтрон. Для всех казалось очевидным, что, поскольку есть два сорта электричества, должно быть и два сорта частиц для их переноса. Никто не шел дальше» (162. 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 теорию и выдвинул ее как теорию электронов и протонов.

Оппенгеймер предложил теорию: хотя дырки имеют ту же массу, что и электрон, но в природе существуют какие-то особые причины, чтобы их нельзя было наблюдать. Оппенгеймер не мог сказать, что это за особые причины, а просто выдвинул их как нечто, требующее еще объяснений. Оппенгеймер был близок к правде! Дырки эти были частицами с той же массой, что и электрон,

но они не были никогда наблюдаемы просто потому, что экспериментаторы никогда не искали их в правильном месте.

Я вспоминаю, что, когда посещал лекции экспериментаторов в Кавендише, был случай, я не очень помню было ли это в 1926 или 1927 г., когда 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: если бы они это сделали, то это привело бы к важному открытию... Это показывает, как можно просмотреть важное открытие из-за того, что люди не уделяют достаточного внимания тому, что выглядит как курьез, не стоящий дальнейшей проверки» (162. С. 145) ⁶.

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

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

Уравнения Дирака были опубликованы 1 февраля 1928 г. — работа «Теория электрона» поступила в редакцию 2 января 1928 г. (20), вторую ее часть редакция получила через месяц — 2 февраля 1928 г., и она вышла в свет 1 марта 1928 г. (21).

В 1930 г. Дирак публикует первое издание «Основ квантовой механики», которые он трижды перерабатывал (30). От издания к изданию взгляд автора на логическую структуру квантовой механики изменялся, и сравнение всех четырех изданий дает весьма интересную картину эволюции его идей ⁷.

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 отнестись к этому, как к приложению чистого разума к физике» [12].

Даже Гейзенберг писал о немецком переводе книги Дирака: «По некоторым пунктам у референта сложилось впечатление, что Дирак, вероятно, представляет квантовую механику, в особенно-

⁶ История несколько странная. Вероятнее всего, речь идет о более позднем докладе Д. В. Скобельцына (см.: [11]).

⁷ На русском языке есть переводы трех изданий — первого, второго и четвертого (30) — случай, редкий в нашей издательской практике.

сти ее физическое содержание, более „символично“, чем это необходимо» [13].

Такое впечатление о методе Дирака сохранялось долго. Лишь дальнейшее развитие квантовой электродинамики, и 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 «Математически ми 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, ставшим основой языка физики XX века. Такие слова, как «наблюдаемая», «коммутации», всем известное «аш перечеркнутое» (сербская буква ħ), «дельта-функция»⁸, скобочные обозначения наблюдаемых и матричных элементов, такие операции, как обход полюсов в комплексной плоскости в фурые-образе амплитуд, δ_{\pm} -функции и даже интеграл по путям ведут свое начало 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.

Наверно, 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 красота как физики, так и математики, значение которой всегда подчеркивал Дирак.

Как и всякий человек, даже великий, Дирак мог ошибаться. «Я считаю теорию функций комплексного переменного очень красивой теорией, так как интегралы Коши обладают большой силой. Такое же ощущение возникает у меня по отношению к проективной геометрии в отличие от некоторых других ветвей математики, таких, как теория множеств и топология» (Цит. по: [3. 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 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, да-

⁸ Понятие, близкое к дельта-функции, вводил еще Кирхгоф, а потом — Хевисайд и Герц. Но об этом уже успели забыть.

вать примеры и работать с ними. Но если Вы обладаете универсальными законами и Вы 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» (цит. по: [З. С. 118]).

Мы заключим последней, несколько неожиданной цитатой: «Меня привлекала всегда красота математики: мое знакомство с проективной геометрией в большей степени стимулировало мои исследования, интерес к ней, я бы сказал, остался на всю мою жизнь. Проективная геометрия оказалась весьма полезным аппаратом для исследований, однако я никогда не ссылался на нее в моих печатных работах. Мне кажется, что я никогда даже не упомянул о ней в статьях (хотя я не совсем в этом уверен), так как я чувствовал, что большинство физиков с ней не знакомы. Когда я получал какой-нибудь результат, я переводил его на аналитический язык и превращал мои аргументы в уравнения... Это относится к моим работам по спинорам. Мы должны работать с величинами совсем нового типа: лучший инструмент для исследования дает нам проективная геометрия» (162. С. 114).

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Хунд Ф. История квантовой теории. Киев: Наук. думка, 1980. 244 с.
2. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. М.: Наука, 1985. 380 с.
3. Mehra J., Rechenberg H. The historical development of quantum theory. N. Y. etc.: Springer, 1982. Vol. 4. 322 p.
4. К 50-летию становления квантовой механики // УФН. 1977. Т. 122. С. 562–757.
5. Heisenberg W. Über die quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen // Ztschr. Phys. 1925. Bd. 33. S. 879–893.
6. Schrödinger E. Quantisierung als Eigenwertproblem // Ann. Phys. 1926. Bd. 79. S. 361–376, 484–527; Bd. 80. S. 437–490; Bd. 81. S. 109–139.
7. Born M., Jordan P. Zur Quantenmechanik // Ztschr. Phys. 1925. Bd. 34. S. 858–888.
8. Schrödinger E. Über das Verhältnis der Heisenberg–Born–Jordan–schen Quantenmechanik zu der meinen // Ann. Phys. 1926. Bd. 79. S. 734–756.
9. Lanczos K. Über eine feldmässige Darstellung der neuen Quantenmechanik // Ztschr. Phys. 1926. Bd. 35. S. 812–830.
10. Miller A. J. Albert Einstein's special theory of relativity. Reading (Mass.): Addison-Wesley publ., 1981. XXVIII+466 p.
11. Смородинский Я. А. Несколько эпизодов // УФН. 1987. Т. 153. С. 187–190.
12. Modern conceptions of the quantum theory // Nature. 1931. Vol. 127. P. 699–700.
13. Heisenberg W. Buchbesprechung: «The principles of quantum theory» von P. A. M. Dirac // Metallwirtschaft. 1930. Jg. 9. S. 988.

ОСНОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ И КВАНТОВАЯ АЛГЕБРА — ИЗ РАННИХ РАБОТ ДИРАКА ПО КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

В 1962 г. во время встречи нобелевских лауреатов в Линдау автор этих строк впервые имел возможность участвовать (среди группы студентов) в дискуссии с Дираком. При обсуждении новых возможных подходов в теории элементарных частиц Дирак предложил использовать неассоциативные алгебры. Его упор на алгебраические методы вполне, казалось, согласовывался с обычным представлением о Дираке, возникающим, например, от его главной книги «Принципы квантовой механики». До этого я изучал эту книгу, она была одним из основных моих учебников по квантовой механике. В ней вся теория была представлена как прекрасное применение алгебраических методов. Много позже я узнал, что Дирак не считал себя сторонником алгебраического метода и, наоборот, утверждал: «Я, безусловно, отдавал предпочтение геометрии и был всегда верен этому» (162. С. 113). Это предпочтение возникло еще во время его обучения в Бристоле и Кембридже и ясно проявляется уже в первых исследованиях Дирака по квантовой механике. Мы рассмотрим, в частности, роль, которую сыграли для них основания геометрии, ранее сформулированные Давидом Гильбертом и Генри Фредериком Бейкером (Henry Frederick Baker).

Обучение в Бристоле и Кембридже

Дирак изучал электротехнику в Бристольском университете с 1918 по 1921 г., к этому после добавился еще двухлетний курс прикладной математики в том же университете. «Во время этого математического образования больше всего повлиял на меня Фрезер ...он был прекрасным учителем, способным внушить своим студентам чувство действительного восхищения фундаментальными идеями математики», — вспоминал Дирак (162. С. 113).

Питер Фрезер (Peter Fraser, 1880—1958) окончил Кембридж перед тем, как начать работать в колледже Бристольского университета в 1906 г. Он был студентом Генри Бейкера, и «его интересы охватывали всю современную ему чистую математику, но его подходы были всегда более геометрическими, чем алгебраическими» [1]. Дирак вспоминал: «У Фрезера я научился двум вещам. Во-первых, строгой математике. До того я использовал только не-



Ранний портрет Дирака

строгую математику, которая удовлетворяла инженеров... Они не заботились о точном определении предела, о том, как долго суммировать ряды, и о других подобных вещах. Фрезер учил, что для обращения с этими предметами иногда необходимы строгие логические идеи». И дальше: «Вторая вещь, которой я научился у Фрезера, была проективная геометрия. Она оказала на меня глубокое влияние благодаря присущей ей математической красоте... Проективная геометрия всегда работает с плоским пространством...; она обеспечивает вас методами, такими, как метод взаимно-однозначных соответствий, которые, как по волшебству, получают результаты; теоремы евклидовой геометрии,

над которыми вы долго мучились, выводятся наипростейшими способами, если использовать рассуждения проективной геометрии» (162. С. 113—114).

Дирак продолжал интересоваться проективной геометрией и после того, как в конце 1923 г. стал аспирантом (research student) Кембриджского университета, специализирующимся в теоретической физике под руководством Ральфа Говарда Фаулера (Ralph Howard Fowler). В частности, он регулярно посещал чаепития в доме профессора Бейкера, происходившие по субботним вечерам. После каждого из таких чаепитий кто-то делал сообщение о геометрической задаче. «Это всегда была геометрия плоского пространства. И она всегда рассматривалась с помощью методов проективной геометрии», — писал позже Дирак, добавляя: «Мы все считали тогда, что проективная геометрия — это единственный вид геометрии, которым стоит заниматься... Изучая фигуры в пространствах высших размерностей, можно было часто получать простые доказательства результатов для обычного трехмерного евклидова пространства, выводить эти результаты другими методами было бы очень утомительно». Сам Дирак тоже «работал с проективной геометрией... и сделал одно из сообщений на таком чаепитии. Это была первая лекция в моей жизни, и, конечно, я ее хорошо запомнил. В ней шла речь о новом методе решения проективных задач» (162. С. 115—116).

Эта область деятельности кажется очень отдаленной для изучающего теоретическую физику. Однако Дирак утверждал, что «это не так», потому что: «Если вы хотите описать соотношения

в пространстве Минковского, соотношения между векторами и тензорами, то часто лучшим способом для этого является использование понятий проективной геометрии. Я постоянно использовал идеи проективной геометрии в своих исследованиях... но не упоминал о них в опубликованных работах... потому что чувствовал, что многие физики не знакомы с ними. Получив какой-нибудь результат, я переводил его на аналитический язык и все рассуждения записывал с помощью уравнений. Это были рассуждения, понятные любому физику» (162. С. 114).

Основные уравнения квантовой механики

Влияние проективной геометрии и вообще геометрических методов не так-то легко обнаружить в ранних работах Дирака кембриджского периода, когда он занимался вопросами статистической механики, теории относительности и квантовой теории. Однако во второй половине 1925 г. он натолкнулся на новую квантовую механику, предложенную в пионерской работе Вернера Гейзенберга [2]. Независимо и практически одновременно с Максом Борном и Паскуалем Йорданом из Геттингена Дирак в Кембридже в серии из пяти статей, опубликованных с декабря 1925 г. до середины лета 1926 г., разработал полную и наиболее общую математическую схему квантовой механики (8—11, 13). И в этих работах действительно можно ясно увидеть подтверждение приведенным высказываниям Дирака о том, что геометрия вела его ко многим важным и оригинальным результатам.

Первый косвенный намек на геометрический аргумент можно найти в первой статье из серии, посланной в печать в начале ноября 1925 г., «Основные уравнения квантовой механики» (8). Поняв, что некоммутативность произведения квантовомеханических переменных была решающим шагом гейзенберговской теории, Дирак обнаружил «совершенно неожиданно» соответствие между квантовомеханическим коммутатором двух динамических переменных u и v и классической скобкой Пуассона:

$$uv - vu \leftrightarrow \frac{ih}{2\pi} \sum_r \left(\frac{\partial u}{\partial q_r} \frac{\partial v}{\partial p_r} - \frac{\partial u}{\partial p_r} \frac{\partial v}{\partial q_r} \right),$$

где p_r и q_r образуют канонический набор переменных импульсов и координат рассматриваемой системы. Это результат сразу позволяет объяснить гейзенберговские квантовые условия, которые можно переписать в виде

$$pq - qp = -ih / (2\pi).$$

Решая важнейшую проблему о значении производной одной динамической переменной x по другой v , Дирак пришел к выражению

$$dx/dv = xa - ax,$$

где a тоже является динамической переменной. В частном случае

производной по времени эта переменная, по существу, оказывается энергией системы.

Хотя последнее уравнение выглядит (и действительно является) прекрасным уравнением с алгебраической структурой, путь, которым автор пришел к нему, был явно проложен геометрическим размышлением. Дирак, в частности, описывал переменные как геометрические объекты, рассматривая линейное преобразование пространства. Применяя правила дифференцирования к суммам и произведениям некоммутирующих переменных, он показал, что преобразование может быть упрощено к виду, представленному правой частью уравнения. Это уравнение вместе с соответствием коммутатор—скобка Пуассона позволило Дираку установить в квантовой механике «алгебраические законы, управляющие динамическими переменными» (9. С. 561), или «квантовую алгебру» (13. С. 412), т. е. полную и математически непротиворечивую формулировку квантовой механики в терминах уравнений, использующих выражения из линейной алгебры.

В статьях Дирака можно найти несколько раз формулировку фундаментальных алгебраических законов квантовой механики (9. § 1, § 3). Это представление было настолько систематическим и новым для физиков того времени, что основание квантовой алгебры считалось даже основным вкладом Дирака в квантовую механику¹. Но изучая образ действия Дирака в деталях, можно обнаружить, однако, что он близко следовал образцу Генри Бейкера, особенно книге последнего «Принципы геометрии» [4]. Дирак практически скопировал нужные ему утверждения из этой книги приблизительно в том же порядке, в каком математик написал их. Также в том, что касается геометрической интерпретации формализма, он в двух местах использовал Бейкера. С одной стороны, он заключил из этой книги, что можно построить математически непротиворечивую теорию с некоммутирующими переменными, с другой — вывел геометрическую интерпретацию того, что он назвал « q -числами», т. е. особых объектов, описывающих квантово-механические переменные (которые подчиняются всем законам для обычных чисел — c -чисел» в обозначении Дирака, кроме коммутативного закона умножения) (9. С. 562).

Основания геометрии: Гильберт и Бейкер

Генри Фредерик Бейкер (1866—1956), которому Дирак был обязан этим знанием, занимал с 1914 г. лоундиановскую (Lowndean) кафедру профессора астрономии и геометрии Кембриджского университета. Он еще посещал лекции алгебраиста Артура Кэли (Arthur Cayley) и его последователя Эндрю Рассела Форсайта

¹ См., например, утверждение Макса Джеммера: «Он [Дирак] получил этот результат, переделав механику Гейзенберга в алгебраический алгоритм, на основе которого он надеялся вывести все формулы квантовой теории без явного использования гейзенбергова умножения (матриц) [3. С. 229.]

(Andrew Russel Forsyth), но потом попал под влияние континентальных математиков, особенно итальянских геометров и Феликса Клейна из Геттингена (Бейкер дважды был там в 1890-х годах). Книга другого геттингенского математика — Давида Гильберта «Основания геометрии» [5], написанная незадолго до рубежа столетий, стала исключительно важной для содержания бейкеровских «Принципов геометрии». Продолжив исследования Морица Паша (Moritz Pasch) [6] и Х. Винера (H. Wiener) [7], Гильберт построил в своих «Основаниях» аксиоматическую формулировку геометрии. В его методах видное место получила проективная геометрия, использованная Пашем и Винером, и особенно две фундаментальные теоремы Жирара Дезарга (Gérard Desargues) и Паппа (Pappus). Генри Бейкер тоже обсуждает эти две теоремы в вводной первой главе: теорему Дезарга в первом параграфе «Теоремы инцидентности» и теорему Паппа во втором параграфе «Соответствие точек двух прямых». В третьем параграфе этой же главы, где он вводит алгебраические символы для описания геометрических отношений, он специально отмечает, «что введение теоремы Паппа соответствует определенному дополнительному ограничивающему закону для комбинации символов, а именно, что их произведение коммутативно», а также «что геометрический результат есть следствие одних только теорем инцидентности, когда его представление и вывод с помощью символов не требуют этого свойства коммутативности» [4. С. 69]².

Далее, Гильберт показал в шестой главе своих «Оснований», озаглавленной «Теорема Паскаля», что теорема, представляющая собой чуть более специальный случай теоремы Паппа, может выполняться только в геометрии, удовлетворяющей так называемой аксиоме Архимеда. Последняя, в частности, требует, чтобы для двух данных расстояний в пространстве всегда существовало целое кратное меньшего из них, превосходящее большее расстояние. Пространства, в которых аксиома Архимеда не выполняется, не позволяют ввести меру расстояний: в них нельзя определить бесконечно малые углы, следовательно, в них всегда для данной прямой линии существует бесконечно много различных прямых линий, не пересекающих ее. Геометрия таких пространств явно неевклидова.

Квантовая алгебра или квантовая геометрия?

Обо всех этих результатах Дирак узнал из книги Бейкера. Например, тесную связь теоремы Паппа и аксиомы Архимеда он нашел в третьем параграфе третьей главы. Вооруженный этим знанием, он занялся математическими проблемами, поставленными

² Бейкер так формулирует теорему Паппа на плоскости: «Если L, M, N — любые три точки прямой и L', M', N' — любые три точки другой прямой, пересекающей первую, тогда три точки пересечения пар прямых $(MN', M'N), (NL', N'L), (LM', L'M)$ лежат на одной прямой» [4. С. 47].

квантовой механикой или алгеброй q -чисел. Он использовал для этой цели и геометрические рассуждения, и алгебраический символизм кембриджского математика³. Так он, в частности, отмечал в своей второй статье по квантовой механике: «В настоящее время нельзя описать, на что похоже q -число. Нельзя говорить, что одно q -число больше другого» (9. С. 562). Этим утверждением он выразил тот факт, что q -числа — это объекты в пространстве, где не удовлетворяется аксиома Архимеда. Для целей физики, однако, нужны другие, обычные коммутирующие числа — c -числа в обозначениях Дирака — для того чтобы сравнивать теоретические результаты с данными эксперимента. Так, в случае многократно-периодической квантовой системы соответствующие переменные, или q -числа, можно было бы представить набором гармонических компонент $X_{nm} \exp [2\pi i \nu_{nm} t]$, где X_{nm} и ν_{nm} — c -числа, обозначающие амплитуды и частоты перехода. Дираку удалось применить свою схему, кроме случаев многократно-периодических систем — атома водорода (9) и многоэлектронного атома (10), также и к непериодическому случаю комптоновского рассеяния (11). Решая эти проблемы, он аккуратно и виртуозно применял алгебраический формализм.

В последней статье серии, озаглавленной «О квантовой алгебре» и представленной в печать Ральфом Фаулером в июле 1926 г., Дирак явно обратился к геометрическому рассмотрению (13). Так, он использовал геометрическую аксиому: «Каждое квантовое число можно представить точкой в пространстве бесконечной размерности таким способом, что условие, чтобы q -число коммутировало с определенными q -числами, соответствовало бы тому, чтобы они лежали в определенном плоском пространстве» (13. С. 418). Из этой аксиомы вытекают два следствия: 1) вообще, q -число можно представить точкой в бесконечном пространстве неевклидовой (или неархимедовой) структуры; 2) однако определенные подмножества q -чисел (а именно состоящие из коммутирующих q -чисел) лежат в определенных плоских подпространствах, удовлетворяющих аксиоме Архимеда. В качестве математического следствия эта аксиома включает, в частности, то, что могут быть константами только те функции q -чисел, дифференциальные коэффициенты которых равны нулю. Таким образом, устанавливается последовательное интегрирование уравнений движения в квантовой динамике — действительно важное условие для физической теории.

Комбинированное применение геометрической интуиции и алгебраического символизма привело Дирака к его собственной формулировке версии последовательной квантовой механики, формулировке, которую он получил независимо и на несколько месяцев раньше, чем Эрвин Шрёдингер предложил операторное описа-

³ Бейкер обосновывал введение последнего представления, утверждая: «Пока принят взгляд, что все геометрические выводы должны быть в конце концов синтетическими, справедливо также, что отбрасывание алгебраического символизма было бы аналогично запрещению физики проверять свою теорию экспериментом» [4. С. 1].

ние в волновой механике [8]. Его творчество вдохновлялось в большой степени утверждением, сделанным Генри Бейкером в его «Принципах геометрии»: «Кажется, что геометрия в собственном смысле необходимо должна основываться на анализе нашей интуиции или опыта относительно геометрических отношений... Непохоже, чтобы чисто аналитическая геометрия могла выразить какие-то геометрические идеи; должно быть постоянное обращение к геометрическим понятиям, чтобы придать ей смысл. ...И точка зрения, выраженная в настоящей книге, такова, что пока было бы глупо не использовать алгебраические символы для целей открытия, предметом геометрической теории является достижение такой исчерпывающей системы понятий, чтобы любой геометрический результат мог быть прояснен из чисто геометрических оснований» [4. С. 70]. Дирак принял это геометрическое кредо уже во время своих докембриджских занятий у ученика Бейкера — Фрезера. Оно привело к геометрическому основанию его квантовой алгебры, которую, возможно, следовало бы более точно назвать «квантовой геометрией».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hodge W. V.* Peter Fraser // J. London. Math. Soc. 1959. Vol. 34. P. 111–112.
2. *Heisenberg W.* Über die quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen // Ztschr. Phys. 1925. Bd. 33. S. 879–893.
3. *Jammer M.* The conceptual development of quantum mechanics. N. Y. etc.: McGraw-Hill, 1966. XII+395 p.
4. *Baker H. F.* Principles of geometry. Cambridge: Univ. press, 1922. Vol. 1: Foundations. 182 p.
5. *Hilbert D.* Grundlagen der Geometrie. Leipzig, 1899. 92 S.
6. *Pasch M.* Vorlesungen über neuere Geometrie. Leipzig: Teubner, 1882. IV+201 S.
7. *Wiener H.* Grundlagen und Aufbau der Geometrie // Jber. Dt. Math. Ver. 1892. Jg. 1. S. 45–48.
8. *Schrödinger E.* Quantizierung als Eigenwertproblem // Ann. Phys. 1926. Bd. 79. S. 361–376.

И. Ю. Кобзарев

К ИСТОРИИ ПОЗИТРОНА

Введение

Современная теория электронов и фотонов описана во многих учебниках. В этой теории «электроны» (в действительности электроны и позитроны) описываются уравнением Дирака, фотоны (а точнее, электромагнитное поле, имеющее на одну степень свободы больше; эта степень свободы соответствует кулоновскому полю и, разумеется, не соответствует фотонам) — уравнениями Максвелла. Как электромагнитное поле, так и поле электронов

рассматриваются в рамках метода вторичного квантования — поле «электронов» квантуется в соответствии со статистикой Ферми, электромагнитное — в соответствии со статистикой Бозе. При этом оказывается, что спинорному полю, описываемому уравнением Дирака, соответствует, кроме электрона в собственном смысле (частицы с массой m и зарядом $-e$), также и частица с массой m и зарядом $+e$, обычно называемая позитроном.

Таким образом, теория электронов Дирака — это в действительности теория двух частиц, в которой частицу (с зарядом $-e$) называют электроном, а так называемую античастицу (с противоположным зарядом $+e$) называют позитроном. Асимметрия обозначений связана с историей — вначале были известны только электроны, и они и дали имя теории, описывающей в действительности электроны и позитроны. Были предложения сделать электрон видовым именем для обеих частиц, частицу с зарядом $-e$ назвать негатомом, а $+e$ — позитомом, но это не привилось.

Сейчас известно, что существование античастиц не специфично для уравнения Дирака — оно в действительности есть следствие лоренц-инвариантности. Любой частице с массой m и «зарядом» любого типа (барионным, электрическим, странностью) соответствует античастица с той же массой m и противоположным зарядом. С другой стороны, любое уравнение, в том числе уравнение Дирака, может описывать истинно нейтральные частицы, для которых античастиц не существует. Когда, однако, Дирак предложил свое уравнение, то он заранее предполагал, что оно описывает заряженную частицу — электрон; и таким образом, теория с неизбежностью должна была привести к предсказанию позитрона. Тем не менее путь к этому предсказанию оказался извилистым, и, хотя наиболее смелая идея, приведшая к предсказанию позитрона, — введение «моря» — принадлежала Дираку, критические замечания и предложения других теоретиков сыграли весьма существенную роль. Ниже я попытаюсь с возможно большей полнотой описать ход событий. Работы описываются в хронологическом порядке и обозначаются по фамилиям авторов и датам их поступления в печать. Вспомогательные ссылки указываются стандартным способом.

Дирак, 2 января 1928 г. (20)

Эта статья вышла 1 февраля 1928 г. Ее основное содержание — вывод уравнения, получившего потом имя Дирака. Уравнение получено как для свободного электрона, так и для электрона во внешнем поле. В дальнейшем в работе исследуются свойства электрона в произвольном электромагнитном поле и в центрально-симметричном электрическом поле. В статье сделан вывод, что электрон, описываемый полученным уравнением, должен обладать магнитным моментом $eh/2mc$, однако полного анализа свойств уравнения во внешних полях Дираку сделать не удалось.

Следующая статья Дирака от 2 февраля 1928 года (21), вышедшая 1 марта 1928 г., посвящена в основном теории эффекта Зеема-

на. Исследование свойств уравнения Дирака явилось предметом обширной серии работ, проследить которую я здесь не буду. Упомяну только, что точное решение уравнения Дирака для атома водорода и соответственно релятивистская формула для спектра были получены очень быстро Дарвином и Гордоном (см. ниже). Нас здесь будет интересовать другое.

Работа Дирака от 2 января начинается с анализа недостатков релятивистского уравнения для одной частицы, которое в нашей литературе принято называть уравнением Клейна—Гордона—Фока, а на западе — уравнением Клейна—Гордона¹. Дирак указывает на два недостатка уравнения КГФ. Первая трудность — невозможность в силу наличия второй производной по $\partial/\partial t$ использовать теорию преобразований Дирака—Йордана (16), [4]. Заметим, что эта трудность была снята, только когда Паули и Вайскопф применили вторичное квантование к КГФ-теории, где уравнение для волновой функции в пространстве чисел заполнения линейно. Тогда обычная КМ (квантовомеханическая) интерпретация Йордана—Дирака для вероятности могла быть впервые пущена в ход. Заметим также, что обычно поиски линейного уравнения для ψ считаются едва ли не единственным стимулом создания конструкции Дирака.

Из его ссылок, однако, видно, что столь же важным стимулом было то, что перед его умственным взором все время находилось уравнение Паули [5], и, таким образом, стимулом не менее важным было уже навязанное опытом и квантовой механикой введение спина и матриц спина. Отсюда «игра» с матрицами σ , приводящая к матрицам α , β . Так или иначе, Дирак пришел к своему уравнению с линейной по $\partial/\partial t$ производной $\partial\psi/\partial t$ и, таким образом, снял первую трудность, хотя мы теперь знаем, что был второй путь — вторичное квантование КГФ. Но в то время, к счастью, он был совершенно чужд Дираку, хотя объективно ученый стал одним из изобретателей вторичного квантования [6].

Дирак пишет в обсуждаемой статье, что уравнение КГ приводит ко второй трудности — появляются решения с отрицательной энергией W ($W < 0$), и в квантовой теории «в общем случае возмущение вызовет переходы из состояний, для которых W положительно, в состояния, для которых W отрицательно. Такое возмущение будет выглядеть на опыте как внезапное изменение заряда электрона от $-e$ к $+e$, а такое явление не наблюдалось. Истинное релятивистское волновое уравнение должно быть таким, что его решения распадаются на два некоммутирующих набора, относящихся соответственно к заряду $-e$ и к заряду $+e$ ».

Таким образом, Дирак считал, что истинного уравнения он еще не нашел, и о вечной жизни, которая предстояла его уравнению, не догадывался. Это явно сформулировано в следующем

¹ Это уравнение содержится уже в статье Э. Шрёдингера [1]. Мы не будем заниматься здесь его историей. Дирак цитирует статьи Гордона [2] и Клейна [3].

абзаце: «В данной статье мы будем заниматься только устранением первой из этих трудностей. Возникающая теория является поэтому только приближенной, но она кажется достаточно хорошей для того, чтобы объяснить все явления удвоения без произвольных допущений». Последние слова означают, по-видимому, что Дирак считал (справедливо), что он получает «без гипотез» все спиновые эффекты (у электрона два спиновых состояния, отсюда «удвоение» — «duplexity»).

Первые реакции на статьи Дирака

Первой и очевидной задачей, возникшей после публикации статей Дирака от 2 января и 2 февраля 1928 г., было нахождение точных решений для атома водорода. Решение, по существу, требовало не преодоления каких-либо принципиальных трудностей, но создания новых технических средств и было дано очень быстро независимо Дарвином [7] в статье от 6 марта, вышедшей 2 апреля 1928 г., а также Гордоном [8]. Статьи содержали полную теорию спектра водорода.

Первым выходом за пределы тематики, непосредственно связанной со статьями Дирака, было появление в конце 1928 г. статей Клейна и Нишины [9, 10], в которых было рассчитано сечение комптоновского рассеяния на электроне. Нужно заметить, что техника вычислений в этих работах была такова, что в отличие от метода, стандартного в 30-е годы, рассчитывать переходы в состоянии с отрицательной энергией явно не приходилось.

Специально вопросу о переходе в состояния с отрицательной энергией была посвящена работа Клейна от 24 декабря 1928 г. [11], вышедшая 12 февраля 1929 г. и последовавшая за ней работа Ф. Заутера [12]. В этой работе Клейн рассмотрел, используя уравнение Дирака, волну электронов, движущуюся свободно в трехмерном пространстве параллельно оси x от $-\infty$. Полупространство $x < 0$ свободно, в области $x > 0$ действует электрическое поле, соответствующее потенциальной энергии электрона P , так что (в современных обозначениях $\hbar = c = 1$) $k^2 = (E - P)^2 - m^2$, где k , E , m — импульс, энергия и масса электрона. Клейн получил, что, начиная с $P = E + m$, в полупространстве $x > 0$ возникают плоские волны с отрицательной кинетической энергией.

Так как случай, рассмотренный Клейном, был сильно вырожденным — ступенчатый постоянный потенциал, то оставалось несмысленным, насколько полученный им результат зависел от выбранных условий. Вопрос был исследован Ф. Заутером в статье от 21 апреля 1931 г. [12], вышедшей 13 июня 1931 г., уже после того, как была сформулирована гипотеза позитрона; было показано, что если ступеньку потенциала размазать, то переходы становятся экспоненциально малыми; был также дан предельный переход к случаю, рассмотренному Клейном. Тем не менее, это направление исследований не было бесплодным — задачу Клейна—Заутера можно незначительной переформулировкой трансформировать в задачу

о рождении пары $e^+ e^-$ в электрическом поле, и таким образом, именно работы Клейна и Заутера положили начало исследованию этого вопроса.

Г. Вейль, 8 мая 1929 г.
**Не описывает ли уравнение Дирака
и электрон и позитрон?**

Статья Вейля [13], вышедшая 19 июня 1929 г., известна в основном как одна из работ, где была указана калибровочная инвариантность теории электронов и фотонов, найден вид уравнения Дирака в гравитационном поле и рассмотрено двухкомпонентное уравнение Дирака. Для нас существенно то, что обсуждая четырехкомпонентность уравнения Дирака Вейль высказал надежду, что с помощью одного спинора удастся описать электрон, а с помощью второго — протон [13. С. 332]. При этом Вейль предполагал, что возникнут два независимых закона сохранения заряда и соответственно два калибровочных преобразования. Двухкомпонентности уравнений противоречило требование P -инвариантности (что было отмечено Вейлем). Вейль писал также, что они противоречат T -инвариантности, но считал это обнадеживающим («Es ist eine der hoffnungsvollsten Seiten den ψ -Theorie (двухкомпонентной теории), daß sie der Wesenverschiedenheit von Vergangenheit und Zukunft Rechnung tragen kann)². Вейль также понимал, что двухкомпонентное уравнение несовместимо с наличием у частиц массы, но считал, что масса может возникнуть «сама» за счет взаимодействия с гравитационным полем (С. 354). В этой форме, о которой думал Вейль, его идея описать электроны и протоны никогда не была реализована, но она оказала стимулирующее воздействие на Дирака.

П. А. М. Дирак, 6 декабря 1929 г.
Море Дирака

Эта статья (26), вышедшая 1 января 1930 г., невелика по объему и не содержит никаких вычислений. Дирак начинает ее с повторного обсуждения трудности с отрицательными энергиями. В первом абзаце содержится краткое описание того, что теперь называют представлением Майорана для матриц Дирака. Указано, что их можно выбрать чисто вещественными, и тогда, если $\psi = u \exp(-iEt)$ есть решение с $E > 0$, то ψ^* будет решением с $E < 0$. Сейчас хорошо известно, что именно в таком представлении удобнее всего обсуждать зарядовое сопряжение.

Дальше объясняется, что трудность должна возникнуть в любой релятивистской теории из-за появления решений с двумя значениями энергии в классическом квадратичном гамильтоновом

² Это не так, но для получения T -инвариантности нужно рассматривать вторично квантованный лагранжиан и антиунитарные преобразования. Эти вопросы были в то время совершенно не исследованы.

уравнении. Снова подчеркивается квантовый характер проблемы — возникновение переходов при наличии возмущений. Этот вопрос обсуждается более подробно, чем в первой статье, — указано на возможность спонтанного перехода из состояния с $E > 0$ в состояние с $E < 0$ с испусканием двух γ -квантов.

Затем Дирак указывает, что *«электрон с отрицательной энергией движется во внешнем поле так, как если бы он нес положительный заряд»*. Далее говорится: «Этот результат заставил людей подозревать, что существует связь между электронами с отрицательной энергией и протонами». Дирак ссылается здесь на статью Вейля от 8 мая, но в действительности там обсуждается, как мы видели, нечто другое. Возможно, что связь, о которой пишет Дирак, все же действительно обсуждалась теоретиками в этот период времени, но документальные свидетельства мне неизвестны. Далее перечисляются причины, по которым такая идея не проходит.

1. Переходы из $E > 0$ в $E < 0$ означали бы несохранение заряда.
2. Электрон и протон отталкивались бы.
3. Электрон с отрицательной энергией имел бы тем меньшую энергию, чем быстрее он двигался и «должен был бы поглощать энергию, чтобы остановиться». Никаких частиц такой природы никогда не наблюдалось.

После этого Дирак высказывает знаменитую гипотезу: *«Все состояния с отрицательной энергией заняты, кроме немногих с небольшими скоростями»*. Далее делается ошибочное утверждение: «Любой электрон с положительной энергией будет теперь иметь очень мало шансов перепрыгнуть в состояние с отрицательной энергией». Далее обсуждаются свойства «дырок» — незаполненных состояний; указывается, что им соответствуют состояния, ведущие себя как частицы с положительной энергией и зарядом $+e$. После этого высказывается предположение, что *«дырки в распределении электронов являются протонами»*. Когда электрон с положительной энергией сваливается в дырку и заполняет ее, мы имеем исчезновение электрона и протона с испусканием фотона.

Затем Дирак обсуждает вопрос, не создаст ли заполненный фон электромагнитное поле с бесконечной дивергенцией. Предлагается считать «естественным», что в уравнении $\operatorname{div} E = 4\pi\rho$ следует учитывать только отклонения ρ от нормального (на современном языке — низшего) «состояния мира», в котором все состояния с $E > 0$ пусты, а с $E < 0$ заполнены. отождествление дырок с протонами рассматривается как достижение: «Нам требуется постулировать только один тип фундаментальных частиц вместо двух, электрона и протона, которые были необходимы ранее».

Затем следует обсуждение проблемы различия в массе. Дирак уже тогда видел, что возможна обратная картина — электроны можно сделать дырками, а протоны — частицами. Дирак, однако, надеялся на то, что, говоря современным языком, произойдет спонтанное нарушение симметрии и что два указанных им варианта не равноправны, если учесть взаимодействие частиц, заполняю-

щих состояния с отрицательной энергией³. Параграф, где все это обсуждается, кончается высказыванием: «Следствие такой дискретности не слишком легко рассчитать в релятивистской области, но мы можем надеяться, что это в конце концов приведет теорию к объяснению различных масс протона и электрона. Возможно, необходима какая-либо более совершенная теория взаимодействия, может быть основанная на принадлежащем Эддингтону⁴ вычислении постоянной тонкой структуры $e^2/(hc)$, прежде чем можно будет получить этот результат».

В заключение Дирак обсуждает комптоновское рассеяние. В нековариантном формализме следует учитывать переходы с участием электронов с $E < 0$. Более того, при низких энергиях фотона именно они дают основной вклад в рассеяние, и если их выбросить, то не получается правильного ответа (Дирак благодарит И. Валлера за указание на эту трудность. В опубликованной литературе такой способ расчета в этот момент не фигурировал или был Дираку неизвестен). Дирак указывает, что в новой версии необходимый вклад дадут переходы, которые происходят за счет того, что электрон фона поглощает (или испускает) фотон, переходя в состояние с положительной энергией. Если, однако, возникающая дырка есть протон, то неясно, какую массу надо подставлять при вычислении матричных элементов. Дирак, видимо, не заметил этой трудности и утверждал, что матричные элементы будут такими же, как для переходов в состояния с отрицательной энергией (без фона).

1930 г. Кризис

(Оппенгеймер, 14 февраля; Дирак, 26 марта;

Тамм, 7 апреля; Вейль, 1931 г.)

Как было сказано, уже в работе (26) от 6 декабря 1929 г. Дирак указал, что в его теории возможна e^-p -аннигиляция. Расчеты не замедлили последовать. Первый из них содержался в письме Оппенгеймера [15], в номере *Physical Review* от 1 марта, но содержание его этим не исчерпывается. Письмо начинается с краткого резюме предложения Дирака, дальше Оппенгеймер обсуждает трудности. Обсуждение начинается с фразы: «Возникает несколько серьезных затруднений, если пытаться придерживаться предположения, что протоны — дырки (gaps) с отрицательной энергией и что не существует особых (distinctive) частиц с положительным зарядом».

Дальше утверждается, что фон Дирака нужно компенсировать бесконечной плотностью положительного заряда, а волны де Бройля этого заряда должны обладать свойствами частиц. Мы предоставляем читателю судить, в какой степени можно считать, что Оппенгеймер имел в виду позитроны.

Дальше указывается, что различие в массах m_e и m_p приводит

³ Дирак надеялся также, что возникающее таким образом различие между протонами и электронами объяснит и взаимодействие протонов в ядрах.

⁴ Дирак цитирует здесь статью Эддингтона [14].

к сложностям в вычислении томпсоновского сечения. Оппенгеймер, однако, считал, что и при $m_{e^+} = m_p$ матричные элементы для рассеяния фотона будут одинаковы (хотя это и не очевидно), и, стало быть, получится, что томпсоновское сечение для e и p будет одинаковым, тогда как классические сечения относятся как $(1/m_e)^2$ к $(1/m_p)^2$. Письмо кончается утверждением, что $e^- + p \rightarrow 2\gamma$ — аннигиляция (как мы видели, об аннигиляции упоминал уже Дирак) дает нетерпимо малое время жизни для электрона в среде, содержащей протоны с плотностью n_p , порядка

$$T = (Gm^2c^3/e^4)/n_p,$$

где G — численная константа. После краткого повторного обсуждения неопределенности во времени говорится, что среднее время жизни электрона в обычной материи должно быть порядка 10^{-10} с.

Обсуждение кончается высказыванием: «Таким образом, мы вряд ли можем ожидать, что какие-либо состояния с отрицательной энергией останутся пустыми. Если мы вернемся к предположению о двух независимых элементарных частицах противоположного заряда и разной массы, мы сможем разрешить все трудности, указанные в этой заметке и сохранить гипотезу, что причиной, по которой ни для электронов, ни для протонов не происходит переходов в состояния с отрицательной энергией, является то, что все эти состояния заполнены. Таким способом можно согласовать предложение Дирака об отсутствии таких переходов со справедливостью формулы для рассеяния».

В литературе введение позитрона нередко приписывается Оппенгеймеру (см.: [16. С. 246]: «Bereits von Oppenheimer diskutierten Ausweg die Löcher mit Antielectronen, Teilchen der Ladung $+e$ und Electronenmasse zu identifizieren» или, напр.: [17. С. 103]). Фразу об особых частицах с «положительным зарядом» можно действительно интерпретировать таким образом, но следующий, цитированный выше, абзац делает несколько неясным, о чем думал Оппенгеймер.

Замечу, что Оппенгеймер вскоре опубликовал численное значение коэффициента, но оно оказалось ошибочным [18].

Статья Дирака (27) была опубликована в томе «Proceedings of the Cambridge Philosophical Society», где опубликованы доклады с датами поступления 28 октября 1929 г. — 28 июля 1930 г., так что она была опубликована в последнюю очередь из трех перечисленных статей, хотя результат получил, по-видимому, первым Дирак, так как доклад был прочитан 19 мая 1930 г. Основной объем статьи занят вычислением сечения $e^- + p \rightarrow 2\gamma$. Разностью масс Дирак пренебрегает, поэтому, по существу, он вычислил сечение $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ (для произвольной начальной энергии⁵), и это сечение вошло в учебники именно в таком качестве.

Основной объем работы занят описанием вычисления сечения. Расчет не стандартен: Дирак вычисляет сечение вынужденной

⁵ Оппенгеймер вычислял для случая, когда обе частицы покоятся.

аннигиляции — в начальном состоянии, кроме e^- и p , даны два пучка фотонов. Затем с помощью соотношений Эйнштейна получено сечение аннигиляции. Заодно Дирак «без гипотез» заново выводит сечение Клейна—Нишины. В конце работы приведено сечение аннигиляции для произвольной скорости протона. Чисел не приводится. Кажется, что Дирак считает, что стремление сечения к бесконечности недопустимо. Отмечается, однако, что величина сечения в целом несовместима с наблюдаемой стабильностью электронов и протонов.

В статье Тамма [19] сечения процессов $e+\gamma\rightarrow e'+\gamma'$ и $e^++e^-\rightarrow 2\gamma$ (в последнем процессе он, следуя Дираку, отождествляет e^+ с протоном) вычисляются методом, который потом надолго стал стандартным — используется теория возмущений во втором порядке по заряду и учитываются переходы с участием дырок. Тамм еще раз получил формулу Клейна—Нишины и рассчитал сечение аннигиляции как функции скорости «дырки». Для $v\rightarrow 0$ было получено правильное значение вероятности аннигиляции, для которой Тамм получил величину $\pi e^4/(L^3 m^2 c^3)$, где L^3 — объем на один электрон. Подставляя $m=m_p$, Тамм, в статье которого впервые явно появляется время жизни атома водорода, получает для него величину 10^{-3} с.

Статья тем не менее кончается выражением сомнения в полученном результате: «Остается открытым вопрос, можно ли, перенося проведенное рассмотрение к проблеме стабильности атома, пренебречь силами, действующими между электронами и протонами; уже в классической теории это не так».

В начале 1931 г. вышло второе немецкое издание ⁶ книги Вейля [20]. Вейль обсуждает в ней (С. 321—322 рус. пер.) вторичное квантование поля Дирака и на самом деле уже использует симметричное квантование (вычитающее фон автоматически).

Говоря об отождествлении положительно заряженных частиц с протонами, Вейль упоминает e^-p -аннигиляцию, но пишет, что «существование такого процесса давно принимается в астрофизике, поскольку, по-видимому, другим способом трудно было бы объяснить источник энергии, испускаемой звездами»⁷. Идея, однако, отвергается, так как «согласно нашей теории, масса протона должна быть такой же, какой должна быть масса электрона; более того, эта гипотеза при всех обстоятельствах независимо от выбора действия (пока оно инвариантно относительно замены правого и левого) приводит к существенной эквивалентности положительного и отрицательного электричества...»

Затем Вейль доказывает свое утверждение, делая явно зарядовое сопряжение ⁸.

⁶ Дирак ссылается на него в статье, поступившей в редакцию в мае 1931 г.

⁷ Идея об уничтожении материи как источника звездной энергии действительно обсуждалась в 20-е годы, например Эддингтоном [21. С. 121].

⁸ Если нарушить P -инвариантность так, как это делал ранее Вейль, переходя к двухкомпонентным уравнениям, то C -инвариантность нарушится, отсюда предыдущее высказывание.

Вейлю не удалось построить T -преобразование, но он не считал это недостатком. Для построения T -преобразования нужно использовать антиунитарные преобразования, что было делом будущего. Сейчас мы знаем, что равенство масс частицы и античастицы есть следствие CPT -инвариантности, которая, в свою очередь, вытекает без гипотез из лоренц-инвариантности. Сохранение P не обязательно.

Заметим, что, как мы знаем сейчас, симметрия лагранжиана не обязана совпадать с симметрией мира; может произойти спонтанное нарушение симметрии, что собственно и обсуждал Дирак в статье от 6 декабря 1929 г., но в то время четкого понимания этого вопроса не было, поэтому доказательство Вейля было принято вместе с аргументом о нестабильности материи.

Дирак, 29 мая 1931 г. Позитрон обсуждается в явной форме

По существу, в перечисленных в предыдущем разделе работах, в принципе содержалась концепция позитрона, хотя даже в работе Оппенгеймера [15] все же отсутствует высказывание о том, что в определенных условиях частицы с массой электрона и зарядом $+e$ должны наблюдаться. В какой момент это было понято, не ясно, во всяком случае, не существует статьи, специально посвященной такой частице, названной позже позитроном.

1 сентября 1931 г. появилась статья Дирака «Квантованные сингулярности электромагнитного поля» (33). В статье дана теория магнитного монополя с магнитным зарядом μ_0 , равным $137/(2e)$. Сейчас такой монополю называют монополем Дирака; теория, предложенная Дираком, оказалась связанной с развитой независимо математиками теорией расслоенных пространств.

Позитрон появляется в четвертом абзаце вводного параграфа статьи. В первом абзаце Дирак констатирует, что развитие физики приводит к тому, что математические конструкции типа неевклидовой геометрии или некоммутативной алгебры, которые раньше казались абстрактной игрой ума, теперь оказываются необходимыми для объяснения фактов реального мира.

Во втором абзаце Дирак пишет, что физика сталкивается со все более сложными проблемами и надежды на то, чтобы решить их с помощью поиска математического описания экспериментальных данных, становятся все более слабыми. Поэтому нужен другой подход — опираясь на чистую математику, пытаться усовершенствовать и обобщить существующий математический формализм теоретической физики и после этого искать физическую интерпретацию возникающей новой математики.

В следующем абзаце Дирак в качестве примера приводит свою идею дырок (работа от 6 декабря 1929 г.). Дальше, со ссылкой на цитированную в шестом разделе книгу Вейля указывается, что масса дырки должна быть равна массе электрона, и со ссылкой на Тамма, Оппенгеймера и работу Дирака (27) указывается, что отожд-

дествление дырок с протонами противоречит стабильности материи. Дальше сказано: «Таким образом, оказывается, что мы должны оставить отождествление дырок с протонами и найти для них какую-то другую интерпретацию. Следуя Оппенгеймеру (ссылка на работу [15].— *И. К.*), мы можем предположить, что в известном нам мире *все*, а не только почти все состояния с отрицательной энергией заняты. Дырка, если бы такая существовала, была бы новой частицей, неизвестной экспериментальной физике, с той же массой, что электрон, и противоположным зарядом. Мы можем назвать такую частицу антиэлектроном». Дальше говорится, что в природе она не должна встречаться из-за быстрой аннигиляции, но если их создать экспериментально, они будут стабильны в вакууме. Указан процесс $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$, и оценена его вероятность. «Эта вероятность, однако, пренебрежимо мала при существующих интенсивностях γ -пучков».

В заключительном абзаце говорится, что протоны независимы от электронов и что должны существовать антипротоны: «Теория в настоящее время совершенно не в состоянии предложить причину, по которой должно было бы существовать какое-либо различие между электроном и протоном».

Заключение

Казалось бы, статья Дирака от 29 мая 1931 г. могла вызвать поток теоретических работ. Ничего не стоило заменить один из γ -квантов в процессе $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ на кулоновское поле и рассмотреть процесс $\gamma + Ze \rightarrow e^+ + e^-$, что сразу приводит к вполне реальным сечениям, можно найти и другие задачи, которые удалось бы решить в рамках имеющейся техники. Ничего, однако, не происходило ни в 1931, ни в 1932 г. Возможно, «дираковский фон» казался слишком безумной идеей. Во всяком случае, уже после открытия позитрона, в 1933 г. В. А. Фок говорил (см.: [22. С. 144]) о фоне Дирака (термина еще не было, и Фок описывает фон явно): «Я должен признаться, что мною овладевает необычайное смущение, когда я пытаюсь осмыслить это основное положение теории, и я думаю, что я не одинок в этом чувстве». Станным образом никто, кажется, не заметил предложенный Вейлем способ избавиться от фона, который соответствует тому, что называют симметризованным квантованием, которое излагается сейчас во всех учебниках и которое обычно⁹ приписывают Гейзенбергу [23].

В 1933 г. вышел уже цитированный обзор Паули [16]. Обсудив состояние теории уравнения Дирака и упомянув об антиэлектронах и антипротонах, Паули написал: «Это кажется неудовлетворительным уже потому, что в этой теории законы природы в точности симметричны относительно электронов и антиэлектронов. Но тогда фотоны (чтобы учесть законы сохранения импульса и энергии, их должно быть по крайней мере два) должны были

⁹ См., напр.: [47. С. 403].

бы сами собой превращаться в электрон и антиэлектрон. Мы не думаем, таким образом, что этот выход следует рассматривать всерьез».

К тому времени, когда обзор Паули вышел, Андерсон уже открыл позитрон. За этим последовал поток работ, в которых рассчитывались процессы, приводящие к рождению и аннигиляции позитронов. Их успех в описании данных опыта, видимо, в очень большой степени содействовал возникновению убеждения, что по крайней мере, в некоторой области энергий квантовая электродинамика справедлива. Описание парадигмы квантовой электродинамики в той форме, в какой она сформировалась к 1936 г., можно найти в книге Гайтлера [24]. Там же можно найти библиографию работ по расчетам процессов рождения и аннигиляции позитронов.

Сам Дирак не принимал участия в этом направлении исследований, он приступил к изучению вопроса более сложного: как внесенный в «море» заряд действует на него. Исследуя этот вопрос, Дирак обнаружил и рассчитал поляризацию вакуума зарядом и обнаружил, что, кроме конечных членов, поляризация содержит также расходящийся логарифмически член, который мы сегодня называем перенормированным зарядом. Эта расходимость была одной из многих, обнаруженных в этот период, и в дальнейшем основные усилия Дирака были направлены на поиски конечной электродинамики.

Между тем в теории античастиц происходили важные изменения. В 1934 г. Паули и Вайскопф [25] рассмотрели вторичное квантование скалярного релятивистского поля и показали, что квантованная теория такого поля не приводит ни к каким проблемам с вероятностной интерпретацией, а теория также содержит частицы и античастицы. Таким образом, должно было бы стать ясным, что существование античастиц с морем не связано, так как для бозонов его нет.

В действительности оно, конечно, связано с двузначностью в формуле $E = \pm \sqrt{m^2 + k^2}$ и навязываемым релятивистской инвариантностью коммутаторов требованием включать во вторично квантованный оператор все решения уравнений поля. Тогда получится

$$\psi = \sum_n [a_n u_n \exp(-iE_n t) + b_n^+ (a_n^+) u_{-n} \exp(+iE_n t)],$$

где u_n — решение с энергией $E_n > 0$; u_{-n} — с энергией $E_n < 0$. Какому представлению группы Лоренца (скалярному, спинорному, векторному и т. д.) соответствует u_n , оказывается безразличным. То, что при u_{-n} должен стоять оператор поглощения, сразу видно, если рассматривать закон сохранения энергии при наличии, скажем, внешнего возмущения. Если поставить при u_{-n} оператор a_n^+ , то мы получим нейтральное поле, для которого нельзя построить заряд. Если ввести оператор b_n^+ , то вычисление заряда соответствующей частицы покажет, что заряды состояний $a^+|0\rangle$ и $b^+|0\rangle$ противоположны.

Все это осознавалось медленно. Хотя описание электромагнит-

ного поля в терминах операторов a и a^+ было известно, начиная с работы Дирака 1927 г., возможность аналогичного квантования для спинорного поля была понята впервые Этторе Майорана в 1937 г. [26]. Все это с трудом входило в парадигму. Гайтлер [24] ничего не пишет о квантовании скалярного поля и излагает квантовую электродинамику, пользуясь дираковским морем.

Симметричная трактовка частиц и античастиц с учетом возможности нейтральных частиц с любым спином была подробно изложена в надолго ставшем классическим обзоре Паули [27].

Тем не менее идея дираковского моря оказалась удивительно жизнеспособной. Одним из самых красивых продвижений в квантовой электродинамике была теория сверхзаряженных ядер, но она излагается [28] целиком на языке дираковского моря и не очевидно, как сформулировать ее без использования этого понятия. Можно привести и другие примеры — например, интерпретация «аномалий» в квантовой теории поля [29].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Schrödinger E.* Quantisierung als Eigenwertproblem: Vierte Mitt. // *Ann. Phys.* 1926. Bd. 81. S. 109–139.
2. *Gordon W.* Der Comptoneffect nach der Schrödingerschen Theorie // *Ztschr. Phys.* 1926. Bd. 40. S. 117–133.
3. *Klein O.* Elektrodynamik und Wellenmechanik vom Standpunkt des Korrespondenzprinzips // *Ibid.* 1927. Bd. 41. S. 407–442.
4. *Jordan P.* Über eine neue Begründung der Quantenmechanik // *Ibid.* Bd. 40. S. 809–838.
5. *Pauli W.* Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons // *Ibid.* Bd. 43. S. 601–623.
6. *Рожевников А. Б.* Дирак и квантовая теория излучения // *Эйнштейновский сборник, 1984–1985.* М.: Наука, 1988. С. 246–270.
7. *Darwin C. G.* The wave equations of the electron // *Proc. Roy. Soc. London.* A. 1928. Vol. 118. P. 654–677.
8. *Gordon W.* Die Energieniveau des Wasserstoffatoms nach der Diracschen Quantentheorie des Elektrons // *Ztschr. Phys.* 1928. Bd. 48. S. 11–14.
9. *Klein O., Nishina Y.* Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac // *Ibid.* 1929. Bd. 52. S. 853–868.
10. *Nishina Y.* Die Polarisation der Comptonstreuung nach der Diracschen Theorie des Elektrons // *Ibid.* Bd. 52. S. 869–877.
11. *Klein O.* Die Reflexion von Elektronen an einem Potentialsprung nach der relativistischen Dynamik von Dirac // *Ibid.* Bd. 53. S. 157–165.
12. *Sauter F.* Über die Verhalten eines Elektrons in homogenen elektrischen Feld nach der relativistischen Theorie Diracs // *Ibid.* 1931. Bd. 69. S. 742–764.
13. *Weyl H.* Elektron und Gravitation // *Ibid.* 1929. Bd. 56. S. 330–352.
14. *Eddington A. S.* The charge of an electron // *Proc. Roy. Soc. London.* A. 1929. Vol. 122. P. 358–369.
15. *Oppenheimer R.* On the theory of electrons and protons // *Phys. Rev.* 1930. Vol. 35. P. 562–563.
16. *Pauli W.* Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik // *Handbuch der Physik.* 2. Aufl. В.: Springer, 1933. Bd. 24. Т. 1. S. 82–272.— Рус. пер.: *Паули В.* Общие принципы волновой механики. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1947. 330 с.
17. *Швебер С.* Введение в релятивистскую квантовую теорию поля. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 842 с.

18. *Oppenheimer R.* The notes on the probability of radiative transitions // *Phys. Rev.* 1930. Vol. 35. P. 939–947.
19. *Tamm I.* Über die Wechselwirkung der freien Elektronen mit der Strahlung nach der Diracschen Theorie des Elektrons und nach Quantenelektrodynamik // *Ztschr. Phys.* 1930. Bd. 62. S. 545–568.— То же на рус. яз. // *Тамм И. Е. Собр. науч. тр. М.: Наука, 1975. Т. 2. С. 24–45.*
20. *Weyl H.* Gruppentheorie und Quantenmechanik. 2. Aufl. Leipzig: Hirzel, 1931.— Рус. пер.: *Вейль Г.* Теория групп и квантовая механика. М.: Наука, 1986. 496 с.
21. *Эддингтон А.* Звезды и атомы. М.; Л.: Госиздат, 1928. 151 с.
22. Атомное ядро: Сб. докл. I Всесоюз. ядер. конф. Л.; М.: ОНТИ, 1934. 227 с.
23. *Heisenberg W.* Bemerkungen zur Diracschen Theorie des Positrons // *Ztschr. Phys.* 1934. Bd. 90. S. 209–231.
24. *Heitler W.* The quantum theory of radiation. Oxford: Clarendon press, 1936. XI+252 p.— Рус. пер.: *Гайтлер В.* Квантовая теория излучения. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1940. 272 с.
25. *Pauli W., Weisskopf V.* Über die Quantizierung der skalaren relativistischen Wellengleichung // *Helv. phys. acta.* 1934. Bd. 7. S. 709–731.
26. *Majorana E.* Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone // *Nuovo cim.* 1937. Vol. 14. P. 171–184.
27. *Pauli W.* Relativistic field theories of elementary particles // *Rev. Mod. Phys.* 1941. Vol. 13. P. 203–232.
28. *Попов В. С.* Квантовая электродинамика сверхсильных полей // Современная теория элементарных частиц. М.: Наука, 1984. С. 127–144.
29. *Jackiw R.* Effects of Dirac's negative energy sea in quantum numbers // *Helv. phys. acta.* 1986. Vol. 59. № 5. P. 835–843.

И. В. Дорман

ТЕОРИЯ ДИРАКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА

Идея антиэлектрона возникла в связи с интерпретацией решений уравнения Дирака с отрицательной энергией в рамках «теории дырок». Как известно, вначале Дирак отождествил дырки с протонами. «В то время известными частицами были только отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный протон, а все атомные ядра считались составными системами,— вспоминал Дирак позднее.— Вот почему я высказал предположение, что эти дырки соответствуют положительно заряженным протонам, и оставил открытым вопрос о том, почему их масса должна так сильно отличаться от массы электрона.

Конечно, это было большой ошибкой: мне просто не хватило твердости. Прежде всего следовало сказать, что дырка должна иметь ту же массу, что и электрон. Это предположение было сделано другими вскоре после опубликования моей статьи» (170. С. 22 рус. пер.)

В статье И. Ю. Кобзарева в настоящем сборнике подробно описаны события, приведшие к предсказанию позитрона. Явно идея о существовании новой частицы с массой электрона и с по-

ложительным зарядом сформулирована Дираком в его статье (33), опубликованной 1 сентября 1931 г. Дирак даже обсуждает экспериментальный процесс $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$, в котором эта частица могла бы наблюдаться.

Предсказание Дираком позитрона не привлекло внимания ученых. Показательным, в частности, является ответ П. М. С. Блэккетта на вопрос о том, как и долго он был знаком с теорией Дирака до открытия позитрона. Блэккетт сказал «что не помнит, да это и не имеет значения, поскольку никто не принимал теорию Дирака всерьез» (цит. по: [1. С. 363]).

Осенью 1932 г. позитрон был открыт в космических лучах. В прочитанных в мае 1934 г. в Париже лекциях Блэккетт особо отметил, что «открытие позитрона впервые в космическом излучении представляется случайным, потому что позитрон мог бы без затруднения быть обнаружен в лабораторных экспериментах с радиоактивными источниками по меньшей мере лет пять тому назад» [2. С. 51].

История открытия новой элементарной частицы очень интересна. Летом 1930 г. Р. Милликен¹ предложил своему сотруднику Карлу Андерсону, который только что под его руководством защитил докторскую диссертацию и собирался переехать работать к А. Комптону в Чикагский университет, провести еще год в возглавляемой им лаборатории в Калифорнийском технологическом институте. За этот год Андерсон должен был построить прибор для измерения энергии космических лучей. Задача показалась интересной, и после недолгих колебаний Андерсон согласился. Каким же представлялся Милликену и Андерсону новый прибор и какова была цель задуманных исследований? Милликен знал об исследованиях, проводимых Д. В. Скобельцыным в Ленинградском политехническом институте с помощью камеры Вильсона, которая помещалась в магнитное поле с напряженностью 1000 Гс. На фотографиях, полученных в камере, Скобельцын [3] заметил следы «ультра- β -частиц» с энергией около 20 МэВ и, поскольку в конце 20-х годов общепринятым было представление, что космические лучи есть не что иное, как поток фотонов огромной энергии, и предполагалось, что их поглощение в веществе происходит преимущественно за счет комптоновского рассеяния, сделал вывод, что это следы комптоновских электронов, образовавшихся при поглощении космических лучей газом, заполняющим камеру.

Милликен надеялся, что используя оригинальную методику, предложенную Скобельцыным, он сможет с большой степенью точности оценить и энергию первичного космического излучения. Это казалось особенно важным, поскольку оценки, полученные другими методами, давали весьма неопределенные результаты. Милликену же необходимы были точные значения энергии фото-

¹ Р. Милликен был одним из первых физиков, заинтересовавшихся изучением космических лучей. Именно он предложил в 1925 г. термин «космические лучи», которым пользуются в настоящее время.

нов, составляющих космическое излучение, для подтверждения своей теории происхождения космических лучей, выдвинутой в 1925 г. [4].

Научный авторитет Роберта Милликена — лауреата Нобелевской премии 1923 г. был огромен, поэтому вокруг его теории, вызвавшей многочисленные толки и обсуждения, разгорелась одна из интереснейших в истории физики дискуссий. Очень скоро, уже в начале 30-х годов, выяснилось, что теория Милликена, по меткому выражению одного физика, — «самая невероятная из всех возможных». Но еще летом 1930 г., уговаривая Андерсона заняться измерениями энергии космических лучей, Милликен старался найти всяческие доказательства своей правоты.

Как отмечал в 1948 г. П. Эпштейн в статье, посвященной 80-летию со дня рождения Р. Милликена, Милликен с присущей ему интуицией увидел, что метод, предложенный Скобельцыным, открывает «новые многообещающие возможности для решения вопроса о природе космических лучей и механизма их поглощения» [5]. Не удивительно поэтому, что именно в лаборатории Милликена, где был усовершенствован этот метод, удалось получить много интересных и важных результатов, и первым из них явилось открытие позитрона.

Всего через несколько месяцев после разговора Милликена с Андерсоном была построена вертикальная камера Вильсона, в которой в отличие от всех ранее использовавшихся камер поршень двигался вверх и вниз, а не горизонтально. Поскольку предполагалось, что основная часть космического излучения приходит сверху, вертикально летящие частицы должны были оставлять в камере следы большей длины, что давало возможность обнаружить и приблизительно измерить даже незначительную их кривизну. Камера помещалась между полюсами мощного магнита, и при максимальной напряженности магнитного поля $H=24\,000$ Гс можно было измерять искривление траекторий частиц с радиусом ρ до 7 м, что соответствует магнитной жесткости $H\rho$ около $1,7 \cdot 10^7$ Гс·см. Энергия таких частиц (если предположить, что их масса равна массе электрона) составляла около 5000 МэВ, т. е. в 250 раз превышала значения энергии, доступные для измерения раньше.

Первые же полученные в начале 1931 г. результаты оказались совершенно неожиданными. Во-первых, космические частицы обладали широким диапазоном энергий вплоть до нескольких сотен МэВ. Во-вторых, примерно половина траекторий частиц в магнитном поле отклонилась в одну сторону, а вторая половина — в другую. Предполагая, что заряженные частицы космических лучей летят сверху вниз, Андерсон сделал вывод, что половина частиц имеет отрицательный заряд, а половина — положительный. В-третьих, особое удивление вызывали две фотографии, на которых из одного центра выходили две траектории, искривленные магнитным полем в разные стороны. Тут нельзя было ошибиться: одна частица имела положительный заряд, другая — отрицатель-

ный. В других же случаях, чтобы установить заряд частицы при изучении одиночной траектории, приходилось делать предположение о направлении прихода космических частиц. Кстати, этот момент не раз обсуждался Миллиkenом и Андерсоном. Андерсон вспоминал [6], что Миллиken не уставал ему твердить, что космические частицы могут приходить в камеру только сверху, в чем Андерсон справедливо сомневался. Осенью 1931 г. Миллиken находился в Европе, и первые полученные 11 фотографий Андерсон переслал ему. Письмо, сопровождавшее снимки, отражало взволнованность и недоумение Андерсона и заканчивалось словами: «Сотня вопросов относительно деталей картины немедленно приходит на ум. Такие вопросы, как потери энергии электронами высокой энергии, потери энергии протонами высокой энергии, наличие или отсутствие тяжелых ядер высокой энергии, распределение энергий между частицами в случае, когда испускаются дублет или триплет частиц, отношение моментов и т. д. Это направление обещает быть плодотворным, и, без сомнения, будет получено много информации фундаментального характера» [6. С. 120].

Миллиken прочел в Кембридже и Париже несколько сенсационных лекций, демонстрируя присланные Андерсоном фотографии. Интерпретация полученных результатов выглядела следующим образом: космические лучи, сталкиваясь с ядрами атомов газа, наполняющего камеру, выбивают из них положительные и отрицательные частицы, причем положительно заряженная частица — это протон. Другими словами, происходит процесс, подобный которому наблюдал в 1919 г. Резерфорд: при захвате α -частиц ядрами большинства легких атомов из них выбиваются протоны.

Особый интерес вызвали две фотографии: тщательный анализ следов частиц на одной подтвердил мнение Миллиkenа и Андерсона, так как ионизация вдоль следа положительной частицы с энергией 130 МэВ была гораздо большей, чем ионизация вдоль следа отрицательной частицы с энергией 120 МэВ. Положительная частица, несомненно, имела гораздо большую массу, чем отрицательная. Эта фотография задержала открытие позитрона по крайней мере на восемь месяцев, так как только позднее стало ясно, что из нескольких тысяч фотографий, исследованных Андерсоном и его сотрудниками, лишь на одной этой имелся след, определенно принадлежащий протону. Вообще оказалось, что фотографии, в которых видны одновременно следы электрона и протона, исходящие как бы из одной точки, крайне редки.

Вот как позднее Миллиken вспоминал свои лекции: «Эти две фотографии демонстрировались мною на лекциях в Кембридже и Париже в институте Пуанкаре в ноябре 1931 г. Первая из них, как я считал, показывала, что космические лучи выбивают из ядра протон, след которого изогнут вниз и вправо, и отрицательный электрон, оставивший след, идущий вниз и влево. Эта необычная фотография была впервые опубликована в декабре 1931 г. вместе

со снимком Андерсона под названием: «Космические лучи разрушают атомные ядра» [7. С. 222].

Вторая фотография доставила Андерсону, по словам Милликена, много беспокойства и вызвала длительное обсуждение. Левый след, по мнению Милликена и Андерсона, принадлежал электрону с энергией 27 МэВ, а второй след — протону с энергией 450 МэВ. Недоумение вызвал тот факт, что ионизация вдоль обоих следов оказалась одинаковой, поскольку интуитивно Андерсон понимал, что толщина следов электрона и протона такой энергии должна заметно различаться, как это и наблюдалось на первой фотографии.

Д. В. Скобельцын [8] вспоминает, что получил подобное сообщение о лекциях Милликена от Ф. Жолио-Кюри и М. Кюри из Франции и от Л. Х. Грея из Англии (эти письма сохранились). Он обратил внимание на тот факт, что величины $H\rho$, вычисленные для следов на фотографиях, исключают возможность приписывать эти следы протонам. Он справедливо заключил, что «что-то неверно или с фотографиями Милликена, или с их интерпретацией», и сообщил об этом в ответном письме. Несмотря ни на что, в работах, появившихся весной 1932 г., Милликен и Андерсон продолжали настаивать, что при взаимодействии космического излучения с ядрами атомов воздуха выбиваются быстрые протоны.

Даже после появления в начале 1932 г. строгих расчетов зависимости ионизирующей способности протонов и электронов от энергии, выполненных Г. Бете [9], Милликен и Андерсон не изменили своего мнения. «Мы не могли найти другого выхода из этого затруднения, — писал Милликен, — как сделать предположение о том, что для областей таких необычайно высоких энергий, с которыми до сих пор никому еще не приходилось сталкиваться, теория, дающая зависимость ионизации от энергии для протонов, является в чем-то неверной. Кроме того, представление о самом протоне как об основной единице положительного электричества так глубоко укоренилось, что любая гипотеза казалась в то время приемлемой, лишь бы с ее помощью можно было сохранить обычные представления» [7. С. 233].

Необходимо было собрать дополнительные данные, которые могли бы подтвердить или опровергнуть предположение о том, что положительная частица, наблюдаемая в опытах Андерсона, — это протон, а в то время это было не так просто, как может показаться сейчас. Вспомним, что срабатывание в камере Вильсона происходило случайно, а для того чтобы сфотографировать след частицы, необходимо, чтобы она прошла через камеру как раз перед расширением. В результате лишь на одной фотографии из 50 имелся след частицы большой энергии и только малая часть этих фотографий обнаруживала пару частиц, исходящих из общего центра. Как уже говорилось, одиночных следов явно недостаточно, чтобы выяснить, в каком направлении двигалась частица через камеру. Частицы, которые считались положительными и

движущимися сверху вниз, на самом деле могли оказаться обычными электронами, приходящими снизу.

И тут Андерсон нашел блестящий выход из положения. Внутри камеры Вильсона была помещена горизонтальная свинцовая пластинка толщиной 6 мм, пройдя которую частица теряла часть своей энергии, (т. е. величина $H\rho$ уменьшалась). Изменение радиуса кривизны траектории позволяло определить направление прихода частицы. Оказалось, что опасения Андерсона не были напрасны: в камере наблюдались частицы, движущиеся как сверху вниз, так и снизу вверх.

2 августа 1932 г. Андерсон получил фотографию, которой было доказано существование положительной частицы с массой, близкой к массе электрона. След оставлен частицей, движущейся снизу вверх. Без свинцовой пластины этот след, безусловно, был бы ошибочно принят за след обычного электрона, идущего сверху! Направление движения частицы в этом случае было очевидно, так как след над пластиной имел значительно меньший радиус кривизны, чем под пластиной, т. е. энергия частицы уменьшилась после прохождения пластины. Итак, частица пришла снизу, и по отклонению в магнитном поле можно заключить, что она несет положительный заряд. Если частица имела массу электрона, то ее энергия вначале составляла 63 МэВ ($H\rho=2,1\cdot 10^5$ Гс·см), а после прохождения пластины равнялась 23 МэВ ($H\rho=7,5\cdot 10^4$ Гс·см). Если же частица являлась протоном, то после прохождения свинцовой пластины протон с магнитной жесткостью $H\rho=7,5\cdot 10^4$ Гс·см должен был иметь кинетическую энергию, равную всего лишь 0,3 МэВ, и плотность ионизации вдоль его следа должна бы быть во много раз больше наблюдаемой.

Кроме того, такой протон имел бы пробег в газе камеры, равный 5 мм, в то время как наблюдаемая длина следа частицы на фотографии была более 5 см, т. е. в 10 раз больше.

«Получив и проявив снимок, Андерсон сразу же обнаружил его значительность, — вспоминал Милликен, — вместе с Неддермейером он провел всю ночь в напрасных попытках объяснить заснятое им явление, оставаясь в рамках прежних представлений» [7. С. 220]. Это оказалось невозможным. Поэтому Андерсон после ночных размышлений пришел к заключению, что след должен принадлежать «свободному положительному электрону». В сентябре в журнале «Science» было опубликовано краткое предварительное сообщение, в котором утверждалось, что существует положительно заряженная частица с массой намного меньше массы протона [10].

Вряд ли можно согласиться с мнением М. П. Бронштейна, что Андерсон напечатал свою первую заметку в недостаточно серьезном журнале «Science», так как «у него не хватило достаточной смелости для того, чтобы объявить о своем открытии во весь голос» [11. С. 316]. Тут прежде всего надо учесть характер руководителя Андерсона Милликена, который любил прибегать для большей сенсации к обсуждению важных проблем в научно-популярной и даже ненаучной литературе (вспомним, что Милликен

обсуждал свою сенсационную теорию происхождения космических лучей даже в воскресных газетах [4]). Кроме того «Science» являлся весьма уважаемым журналом, очень быстро печатавшим последние научные новости, и имел огромное количество читателей. Заметку Андерсона прочли многие (в том числе и Блэкетт и Оккиалини) и в течение нескольких месяцев с нетерпением ждали более подробных сообщений. Напечатав заметку, Андерсон оповестил научный мир о своем открытии, а не поместив снимка, не разгласил свою методику определения направления прихода частиц, имевшую принципиальное значение, т. е. достиг поставленной цели.

В период с сентября 1932 по март 1933 г. Андерсон получил большое количество фотографий, с несомненностью подтверждающих существование новой частицы. Сомнений больше не оставалось! «Из 1300 исследованных фотографий следов космических частиц,— писал Андерсон в подробной статье «Положительный электрон», которая была послана в журнал «The Physical Review» 28 февраля 1933 г.,— на пятнадцати видны положительные частицы, проходящие через свинец, ни одна из которых не может иметь такую же большую массу, как масса протона. Таким образом, установлено существование положительной частицы единичного заряда с массой, много меньшей, чем масса протона» [12]. Для иллюстрации в статье приводилось несколько фотографий со следами новой частицы.

Андерсон назвал новую частицу «позитрон». Это «гибридное» слово возникло за счет прибавления окончания «трон» от греческого слова «электрон» к корню латинского слова «positivus» — положительный². Впервые этот термин появился в печати в статье [12]. Андерсон вспоминал [6], что хотя он ни разу не обсуждал название новой частицы с Дираком, у него сложилось впечатление, что оно Дираку не нравилось.

В конце статьи Андерсон отмечал, что пока она готовилась к печати, он узнал о том, что П. М. Блэкетт и Дж. Оккиалини, изучая следы космических частиц, также получили доказательства существования легкой положительной частицы, что подтвердило его предыдущее сообщение.

Долгое время неясным оставался вопрос, знал ли Андерсон о теории Дирака в момент открытия позитрона? В своей статье [12] он никоим образом не делает попыток связать новую частицу с дырками, и, более того, там просто нет ссылок на работы Дирака.

² Название «позитрон» — это единственное существующее отступление от традиции в наименовании элементарных частиц с использованием суффикса «он». От второго названия-исключения «мезотрон», также предложенного Андерсоном, физики отказались уже в 40-х годах, поскольку, согласно словарю Вебстера, суффикс «трон» подчеркивает принадлежность предмета к приборам и используется в словах, служащих для наименования ускорителей частиц, и в настоящее время для обозначения всего спектра частиц в физике используются названия с суффиксом «он» (подробнее см.: [13]).

В одном из интервью по случаю тридцатилетнего юбилея открытия позитрона Андерсон ответил на этот вопрос так: «Да, я знал о теории Дирака... но я не был знаком в деталях с его работой. Я был слишком занят экспериментом, чтобы у меня хватило времени подробно изучать его теорию» (Цит. по: [1. С. 352]).

В воспоминаниях, написанных для симпозиума по истории элементарных частиц, проходившего в Батавии, США, в мае 1980 г., Андерсон четко высказал свое мнение по этому вопросу: «В литературе часто утверждается, что открытие позитрона есть следствие теоретического предсказания Дирака, но это неправда. Открытие позитрона произошло совершенно независимо. Несмотря на тот факт, что релятивистская теория электрона Дирака является блестящей теорией позитрона, и несмотря на то, что существование этой теории было хорошо известно почти всем физикам, включая меня, она не сыграла никакой роли в открытии позитрона» [6. С. 121].

В любом случае с уверенностью можно сказать, что Андерсон не ставил себе целью поиска антиэлектрона, и более того, даже открыв новую частицу, никак сразу не связал ее с теорией Дирака.

В то время как Андерсон проводил свои исследования в Америке, в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, хорошо известный своими исследованиями в области радиоактивности физик П. М. С. Блэкетт и его молодой сотрудник Дж. Оккиалини, который только что начал свою научную деятельность, приступили к изучению в космическом излучении ливней, обнаруженных Скобельцыным [3]. Они сконструировали камеру Вильсона, управляемую двумя счетчиками Гейгера—Мюллера, расположив один счетчик над камерой, а другой под камерой таким образом, что в камере производилось расширение в тот момент, когда частица проходила оба счетчика одновременно. Вероятность получения снимков, на которых наблюдались следы частиц высокой энергии, в этом случае значительно повышалась. «Обычно фотографирование производилось наудачу,— писал Блэкетт,— только небольшой процент снимков давал следы космических частиц. Однако можно сделать так, чтобы быстрые частицы сами себя фотографировали, пройдя через два счетчика и воздействуя через эти счетчики на реле, связанное с механизмом, производящим расширение» [2. С. 15]. Пользуясь этим остроумным методом соединения счетчиков, включенных в схему совпадения, и камеры Вильсона, Блэкетт и Оккиалини получили к началу 1933 г. около 500 фотографий, на 75% которых были зарегистрированы следы частиц высокой энергии.

Статья Блэкетта и Оккиалини «Некоторые фотографии следов проникающей радиации» [14], в которой обсуждались полученные результаты, была послана в журнал «Proceedings of the Royal Society of London» 7 февраля 1933 г., а вышла из печати на несколько дней позднее статьи Андерсона. Основной темой обсуждаемой статьи является выяснение природы ливней, наблюдаемых в космических лучах. Однако в третьем разделе статьи авторы

отмечали что, несмотря на сравнительно слабое магнитное поле (от 2000 до 3000 Гс), им удавалось установить, что примерно половина следов оставлена частицами, имеющими положительный заряд и массу электрона.

«Необходимо сделать такое же заключение, какое уже было сделано Андерсоном для подобных фотографий. Оно состоит в том, что некоторые следы принадлежат частицам с положительным зарядом, но с массой значительно меньше, чем масса протона», — резюмировали свои выводы авторы [14. С. 703] и дали ссылку на заметку Андерсона, опубликованную в «Science». Блэкетт и Оккиалини не раз обсуждали результаты исследований с Дираком, который принял в работе горячее участие и разрешил воспользоваться сделанными им расчетами вероятности аннигиляционных процессов (в статье [14] Блэкетт и Оккиалини приносят Дираку благодарность за обсуждение результатов).

Удостоверившись в существовании позитрона, они сразу же предположили, что обнаружена частица, необходимая для теории Дирака, и отождествили позитрон с дыркой. На основании экспериментальных фактов была подтверждена и гипотеза Дирака относительно рождения пары электрон—позитрон из γ -кванта. Теперь стало ясно, что источником наблюдаемых позитронов являются высокоэнергичные фотоны, входящие в состав космического излучения. Это был очень важный вывод: вначале механизм, в результате которого в космических лучах рождаются позитроны, был неясен, и, как считал Андерсон, они могли испускаться ядром при каких-то определенных обстоятельствах. Вызывает удивление тот факт, что Р. Опенгеймеру, который часто посещал Калтех и знал о полученных Андерсоном результатах, не пришла мысль о рождении пары электрон—позитрон высокоэнергичным γ -квантом. В письме к А. Пайсу от 30 марта 1933 г. Андерсон пишет: «Я поражен, что в то время Опенгеймер не пришел к идее о возникновении пар. Он тогда был в Пасадене и ежедневно имел доступ к новым результатам. Впервые о идее возникновения пар я узнал из статьи Блэкетта и Оккиалини и немедленно понял, что она верна» [1. С. 363]. Научная общественность восприняла результаты Блэкетта и Оккиалини как подтверждение открытия Андерсона: в 1936 г. К. Д. Андерсону была присуждена Нобелевская премия за открытие позитрона.

К сожалению, в литературе встречается утверждение, что хотя открытие позитрона формально приписывается Андерсону, убедительно доказали существование позитрона только Блэкетт и Оккиалини (см., напр.: [15. С. 20]). Такого же мнения придерживался и Дирак, описывая сложившуюся в те годы ситуацию: «У Блэкетта были довольно убедительные свидетельства в пользу существования позитрона, и, будучи в Кембридже, он мне о них рассказывал. Но он сомневался, не рано ли публично высказывать столь революционную идею: ему хотелось иметь подтверждение своих экспериментов. Эта задержка привела к тому, что автором открытия оказался Андерсон» (170. С. 23). О каких доказательст-

вах существования позитрона рассказывал Блэкетт, Дирак не уточнял, и нет никаких других свидетельств, что Блэкетт делился своими соображениями о существовании новой частицы до открытия Андерсона с кем-нибудь еще.

Заметим, кстати, что сами Блэкетт и Оккалини, которые сразу же оценили блестящую работу Андерсона, никогда не считали себя соавторами открытия. Подтверждением этого является высказывание Блэкетта из интервью, данного им 17 декабря 1962 г.: «Как только мы увидели статью Андерсона, то немедленно занялись поисками позитронов в своих собственных фотопластинках, и обнаружили их в больших количествах» (цит. по: [16]). Надо отдать должное молодому Карлу Андерсону, который в те годы, когда, судя по воспоминаниям современников (см., напр.: (170)), у физиков сложилось предубеждение против новых частиц, сумел найти в себе смелость заявить о своем открытии (в какой-то мере даже против воли своего руководителя Р. Милликена) и блестяще доказать свою правоту.

На сессии Сольвеевского конгресса, происходившего 22—29 октября 1933 г., Блэкетт, подводя итоги экспериментальных исследований, подчеркнул, какое большое значение имело открытие позитрона для теории Дирака. Дискуссия, последовавшая за сообщением, очень интересна для историков науки. Вспоминая об этой дискуссии, Д. В. Скобельцын приводит характерное для настроения аудитории конгресса высказывание Резерфорда: «Кажется в какой-то степени прискорбным, что мы имели теорию положительного электрона перед началом экспериментов... Было бы лучше, если бы теория появилась после установления экспериментальных фактов» [8. С. 50].

Несомненно, что экспериментальное обнаружение позитрона, которое устранило серьезное теоретическое затруднение и одновременно значительно расширило область явлений, к которым приложима теория Дирака, стало триумфом теории Дирака.

Следует прибавить несколько слов о фундаментальной важности этого открытия. «При этом существенным было отнюдь не открытие еще одной, до того неизвестной частицы,— писал в 1975 г. в докладе на XIV Международной конференции по космическим лучам в Мюнхене В. Гейзенберг,— было открыто еще множество частиц без сколько-нибудь серьезных последствий для оснований физики; существенным было открытие новой симметрии, сопряженности частиц-античастиц, тесно связанной с лоренцевой группой специальной теории относительности, а также с превращением кинетической энергии сталкивающихся частиц в массу покоя новых частиц и обратно» [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Pais A. Inward bound. Of matter and forces in the physical world. Oxford: Clarendon press, 1986. XIV+666 p.
2. Блэккетт П. М. С. Космическое излучение. Харьков: ОНТИ, 1935. 64 с.

3. *Skobeltzyn D.* Über eine neue Art sehr schneller β -Strahlen // *Ztschr. Phys.* 1929. Bd. 54. S. 686–702.
4. *Дорман И. В.* Космические лучи. М.: Наука, 1981. 192 с.
5. *Erstein P. S.* Robert Andrews Millikan as physicist and teacher // *Rev. Mod. Phys.* 1948. Vol. 20. P. 10–25.
6. *Anderson C. D.* Unraveling the particle content of the cosmic rays // *Early history of cosmic ray studies.* Dordrecht: Reidel, 1985. P. 117–132.
7. *Милликен Р.* Электроны (+ и –), фотоны, нейтроны и космические лучи. М.; Л.: ГОНТИ, 1939. 311 с.
8. *Skobeltzyn D. V.* The early stage of cosmic ray particle research // *Early history of cosmic ray studies.* Dordrecht: Reidel, 1985. P. 47–52.
9. *Bethe H.* Bremsformel für Elektronen relativistischer Geschwindigkeit // *Ztschr. Phys.* 1932. Bd. 76. S. 293–299.
10. *Anderson C. D.* The apparent existence of easily deflectable positives // *Science.* 1932. Vol. 76. P. 238.
11. *Бронштейн М. П.* Атомы, электроны, ядра. Л.; М.: ОНТИ, 1935. 362 с.
12. *Anderson C. D.* The positive electron // *Phys. Rev.* 1933. Vol. 43. P. 491–494.
13. *Walker C. T., Sluck G. A.* Who named the on's? // *Amer. J. Phys.* 1970. Vol. 38, N 12. P. 1380–1389.
14. *Blackett P. M. S., Occhialini G. P. S.* Some photographs of the tracks of penetrating radiation // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1933. Vol. 139. P. 699–726.
15. *Иваненко Д. Д.* Ядерная физика в 30-е годы // *Очерки по истории развития ядерной физики в СССР.* Киев: Наук. думка, 1982. С. 18–25.
16. *Heilbron J. L.* Summary of an interview with P. M. S. Blacket, Dec. 17, 1962. N. Y.: *Amer. Inst. Phys.*, 1963.
17. *Heisenberg W.* Cosmic radiation and fundamental problems in physics // *Naturwissenschaften.* 1976. Vol. 63. P. 63–67.

А. Б. Кожевников

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ДИРАКА

Отношения Дирака с квантовой электродинамикой складывались непросто. С одной стороны, ему эта теория обязана больше, чем кому бы то ни было еще, особенно если рассмотреть те решающие для ее становления годы — конец 20-х — начало 30-х годов, — когда были разработаны практически все основные концепции, кроме идеи перенормировок. Да и после этого периода Дирак написал ряд очень важных работ, в частности по индефинитной метрике и квантованию систем со связями. С другой стороны, он с начала 30-х годов был активным критиком теории, несколько раз проповал различными способами разработать альтернативную схему, не удовлетворился перенормировками, считая их математическим ухищрением, а не фундаментальным методом, и так и умер непримиренным с фактически собственным детищем¹.

¹ См., например, его статьи последних лет, за которые говорят уже названия: «Имеет ли смысл перенормировка?» (184), «Требования к фундаментальной физической теории» (191), «О неполноте квантовой теории поля» (194).

В настоящей статье я рассмотрю работы Дирака 1926—1933 гг. Моей целью будет — как показать его действительно решающий вклад в развитие теории, так и вскрыть корни его неудовлетворенности, которая восходит к тому же периоду и которая, как мне кажется, во многом определила и его дальнейшее отношение к квантовой электродинамике.

1926 г. Эффект Комптона

Это год, когда создавалась квантовая механика. Одновременно делались попытки построить релятивистскую квантовую теорию и разобраться с проблемами, связанными с излучением. Тогда еще не было ясно, должно ли все это образовать единую теорию или разделиться на две, как в конце концов и случилось. Дирак находился в самом центре событий².

По вопросам, которые впоследствии отойдут к квантовой электродинамике, он написал в этом году две статьи, содержащие теорию эффекта Комптона. Открытие этого эффекта в 1923 г. способствовало триумфу эйнштейновской концепции квантов света и кризису старой квантовой теории. Но на этом история проблемы не закончилась, а только началась³. В экспериментальных исследованиях к 1926 г. была надежно установлена формула для изменения частоты и справедливости законов сохранения, но еще не было окончательной ясности относительно интенсивности рассеянного излучения (т. е. сечения рассеяния) и ее зависимости от угла и частоты. Теоретики же пробовали самые различные модели для описания эффекта, и эта задача продолжала оставаться для них одной из самых актуальных.

Первая статья «Релятивистская квантовая механика с применением к комптоновскому рассеянию» (11) была закончена Дираком в апреле, она стала первой в квантовой механике работой по релятивистскому обобщению теории и повлияла на многие последующие попытки того же рода. Дирак еще не использует шрёдингеровский подход, и его теория находится в русле идей развиваемой им «алгебры q -чисел» — одного из обобщений матричной механики⁴. Основная идея перехода к релятивистской теории, по Дираку, — избавиться от выделенной роли времени и рассматривать переменную t аналогично пространственным координатам x, y, z . Электрон он описывает квантовомеханически с учетом релятивистских поправок, а электромагнитное излучение — по классической теории. Рассчитав действие падающей волны на электрон, можно было по обычным формулам матричной механики найти излучение электрона. Сделав это, Дирак получил формулы для частоты и интенсивности рассеянного света.

² Направления, существовавшие тогда в квантовой механике, и их удельный вес описаны в [1], работы Дирака этого года подробно проанализированы в [2].

³ До 1926 г. она подробно разобрана в книге [3].

⁴ Подробнее см.: [2].

Формула для интенсивности не была точной и не могла ей быть. Окончательная формула выводится только на основе уравнения Дирака для электрона со спином (уравнение получено в начале 1928 г., а формула комптоновского рассеяния — формула Клейна—Нишины — в конце того же года [4]). Все же предшествующие рассмотрения, а, кроме Дирака, в 1926 г. этой проблемой занимались еще В. Гордон [5] и О. Клейн [6], давали только приближенный результат, хотя и достаточно близкий к точному.

Работу Дирака многие использовали и ссылались на нее [7], но при этом сам подход Дирака не был популярен. Почти все исследователи, занимавшиеся в 1926 — начале 1927 г. релятивистской проблемой в квантовой механике, находились под влиянием идей «волновой теории материи». Решение электродинамических проблем при этом основывалось на уравнении Клейна—Гордона, интерпретации волновой функции как плотности заряда и на классической электродинамике. Дирак, в свою очередь, относился скептически к этой программе. Волновую механику он воспринял только как математический метод, именно так он и использовал ее в своей второй статье «Эффект Комптона в волновой механике» (15) (ноябрь 1926 г.). Эта статья практически повторяет первую, просто ряд выкладок существенно упрощаются благодаря использованию шрёдингеровских методов.

1927 г. Теория излучения

Вскоре после борновской статистической интерпретации была завершена разработка аппарата квантовой механики — с основными уравнениями, способами их решения и правилами сравнения результатов с экспериментом. Дирак сделал это в декабре 1926 г. в статье (16); одновременно и независимо аналогичную работу проделал Йордан. После этого Дирак счел теорию законченной⁵. «Новая квантовая теория... развилась к настоящему времени достаточно для того, чтобы образовать довольно полную теорию динамики», — пишет он в начале 1927 г., и тут же: «С другой стороны, вряд ли что-либо было сделано до настоящего времени в квантовой электродинамике» (17. С. 243).

В этой цитате отразилось его неприятие электродинамики Клейна—Гордона, которая не укладывалась в его формулировку квантовой механики. Что касается последней, то она основывалась на нерелятивистском по форме гамильтоновом формализме, в котором время играло выделенную роль. Поэтому, согласно Дираку, для решения релятивистской проблемы, равно как и для последовательного описания излучения, потребуется новая теория — квантовая электродинамика.

⁵ Это была теория преобразований, ставшая впоследствии основой его книги «Принципы квантовой механики» (30). Для копенгагенцев, правда, оставалась еще задача «понять» теорию, что и было ими сделано в 1927 г. с помощью «неопределенности» и «дополнительности», но для Дирака это не было необходимо.

В только что процитированной статье Дирак построит теорию излучения, с которой современные авторы обычно и отсчитывают начало квантовой электродинамики. Статья, законченная в феврале 1927 г., называлась «Квантовая теория испускания и поглощения излучения» (17)⁶.

Нельзя сказать, что в квантовой механике излучение до этого совсем не рассматривалось. Целый ряд явлений можно объяснить, если описывать излучение по классической волновой теории и рассчитывать его взаимодействие с квантовомеханической частицей. Сюда относятся и рассеяние света электроном (дисперсия и эффект Комптона), и квантовые переходы атома под влиянием излучения. Последняя задача была рассмотрена в квантовой механике Борном [10] и самим Дираком (14). Они вычислили эйнштейновский коэффициент вынужденного испускания-поглощения (так называемый коэффициент b), но зато коэффициент спонтанного излучения a при таком подходе нельзя было получить.

Для вычисления коэффициентов a и связанных с ними интенсивностей спектральных линий в квантовой механике использовалось дополнительное правило-постулат — так называемая «гипотеза Гейзенберга», с которой когда-то вообще и началась квантовая механика. В ней утверждалось, что вероятность излучательного перехода пропорциональна квадрату матричного элемента координаты электрона.

Дирак избавился от этого дополнительного постулата и вывел все результаты (в (17) — коэффициенты спонтанного и вынужденного излучения, в следующей статье (18) — формулу дисперсии Крамерса—Гейзенберга) на основе единого метода, в котором излучение рассматривалось как квантовый объект. Оно разлагалось на гармонические компоненты, и каждая из них квантовалась как осциллятор в квантовой механике. В действительности этот метод был предложен Йорданом еще в конце 1925 г. [11], но широкое распространение он получил только после того, как Дирак столь успешно применил его. Теория Дирака была в основном воспринята очень положительно как первая последовательная квантовая теория излучения, и работа (17) стала образцом-парадигмой для целого ряда дальнейших исследований [7].

В практическом смысле теория Дирака оказалась очень плодотворной, описывая все больший и больший круг явлений, но для того чтобы превратиться в последовательную квантовую электродинамику, ей еще очень многого не хватало. Во-первых, излучение квантовалось как гамильтонова система, а значит, релятивистская инвариантность теории не была непосредственно очевидна. Во-вторых, теория описывала только «радиационную» часть электромагнитного поля без кулоновского взаимодействия заряженных частиц, и в-третьих, сами эти частицы были пока нерелятивистскими. Первый из этих аргументов казался Дираку особенно важным. Из-за него он вопреки современной оценке вовсе не счи-

⁶ Подробнее, чем здесь, теория излучения разобрана в работах [8, 9].

тал свою теорию началом создания квантовой электродинамики. Последняя, думал он, должна с самого начала быть явно релятивистски инвариантной (17. С. 243, 244).

Действительное развитие пошло по-другому — путем последовательного исправления недостатков. Релятивистскую инвариантность квантования излучения докажут в 1928 г. Йордан и Паули [12], тогда же Дирак напишет релятивистское уравнение электрона (20), а полное электромагнитное поле проквантуют в 1929 г. Ферми [13] и Гейзенберг с Паули [14].

1927 г. Вторичное квантование

Кроме описанного выше метода квантования излучения, в статье (17) есть еще два других. Излучение трактуется в них как ансамбль фотонов, а фотон — как предельный релятивистский случай квантовомеханической бозе-частицы. Уравнение для ансамбля бозонов выводится Дираком двумя способами: с помощью симметричных собственных функций и с помощью квантования волновой функции одной частицы, т. е. вторичного квантования.

Если реконструировать историю создания теории, то окажется, что она началась именно с изобретения вторичного квантования⁷. Это была очень странная идея — взять ψ -функцию уже квантованной системы и сделать ее оператором, т. е. фактически второй раз проквантовать систему (отсюда и возникло потом название метода). Дирак не представлял себе, что получится в итоге, и был искренне удивлен, когда обнаружил, что из уравнения для одной частицы получилось уравнение для системы бозе-частиц (190. С. 48). Для подтверждения он вывел его еще раз обычным для квантовой механики способом — через симметричные волновые функции. Это уравнение было новым шагом для квантовой теории многих тел — впервые было получено описание бозе-системы в поле внешних сил.

Раз есть бозе-система, то нужно применить теорию к фотонам. Сделав это, Дирак рассмотрел их взаимодействие с атомом. Результаты фотонной теории и изложенного выше метода квантования волн вполне согласовывались, но метод фотонов оказался все же слабее — с его помощью Дирак смог вычислить только отношение a/b , но не сами абсолютные значения коэффициентов.

Из всех трех методов (квантование волн, вторичное квантование, фотоны, описанные с помощью симметричных функций) физической картине мира Дирака больше всего соответствовал третий. Именно с его помощью он изложит теорию в «Принципах квантовой механики» (30. Гл. 12), там он разработает метод фотонов подробнее и получит и коэффициенты a и b и формулу дисперсии. Квантование электромагнитных волн он, по-видимому, рассматривал скорее как вычислительный прием и вторичное квантование — тоже. От последнего он вообще почти сразу отка-

⁷ Реконструкцию истории этого открытия см. в работе [9].

зался, не использовал его впоследствии ни в теории излучения, ни в теории многих тел и вновь признал лишь во втором издании «Принципов» (1935 г.).

Дальнейшим развитием метод вторичного квантования обязан прежде всего Йордану и затем В. А. Фоку⁸. Самым важным достижением стало то, что Йордан, воодушевленный примером Дирака, придумал, как нужно квантовать волновую функцию, чтобы получилась система ферми-частиц [17, 18]. Он же сформулировал тогда программу построения квантовой электродинамики на основе представления о квантованных волнах как электромагнитного поля, так и материи — программу, которая реализована в современной теории квантованных полей.

Выше под вторичным квантованием понималось квантование волны, связанной с материальными частицами, но в принципе квантование электромагнитной волны тоже можно считать вторичным квантованием — благо математика совершенно та же. При таком понимании первое применение метода следует приписать Йордану [11], а за Дираком остается заслуга *независимого* изобретения его для случая материальных частиц. Такое толкование больше соответствует современным взглядам на вторичное квантование, а в 20-е годы, наоборот, то, что сделал Дирак, выглядело более непривычным и с большим правом могло расцениваться как открытие.

1928 г. Уравнение Дирака

В эпоху создания квантовой механики трудности в теории электрона были связаны с двумя различными причинами — его волновыми свойствами и его спином. Это приводило к дополнительной путанице. Так, например, известно, что Шрёдингер написал свое знаменитое уравнение сначала в релятивистском виде, но отказался от него, потому что получил неправильный спектр водорода. Лишь позже стало ясно, что для правильного спектра надо было учесть спин.

В решающую зиму 1925/26 г. эти вопросы были решены по отдельности: Уленбек и Гаудсмит ввели наглядную модель вращающегося электрона, а Шрёдингер записал волновое уравнение, вскоре после чего многими авторами было предложено его релятивистское обобщение — уравнение Клейна—Гордона. Теперь надо было объединить оба результата, т. е. построить квантовую механику электрона со спином.

По этому логичному пути и пошли теоретики. В 1927 г. Дарвин [19] и более корректно Паули [20] решили эту задачу для нерелятивистского электрона, и вскоре целый ряд ученых занялись релятивистским случаем. В их числе были Х. Крамерс, П. Йордан и Ю. Вигнер, Я. И. Френкель, Д. Д. Иваненко и Л. Д. Ландау (см.: [21. С. 61—62]). Скорее всего, какой-нибудь

⁸ См. историю этого метода в работах [15, 16].

из этих подходов в конце концов привел бы к успеху, но всех опередил Дирак, который шел другим, не таким прямолинейным путем: его больше заботило создание последовательной релятивистской квантовой механики, чем описание спина. Спин получился как дополнительный подарок, как следствие из уравнения Дирака; тем самым Дираку удалось не просто включить спин в квантовую механику, но даже в определенном смысле объяснить его.

Подробно история его статьи «Квантовая теория электрона» (20) (январь 1928 г.) изложена в работах [21, 22]. Никаких черновиков и архивных материалов не сохранилось, все реконструкции основаны на опубликованных статьях Дирака и его позднейших воспоминаниях. Мнения расходятся относительно того, совсем ли он не думал о том, чтобы описать спин (как он сам утверждает в: (162. С. 128 русского перевода)), или (по крайней мере подспудно) эта идея присутствовала, раз он стал работать с матрицами Паули. Но в любом случае главным движущим стимулом для него была неудовлетворенность релятивистским уравнением Клейна — Гордона:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \right) \psi = 0,$$

которое он считал несовместимым с ядром квантовой механики — теорией преобразований.

Его претензии базировались на требованиях, как показало последующее развитие, вообще невыполнимых, поэтому, по словам самого Дирака: «Развитие релятивистской теории электрона можно рассматривать сейчас примером того, как неверные доводы приводят иногда к ценному результату» (107. С. 32). Подробнее всего эти доводы изложены в малоизвестном докладе Дирака (23а) летом 1928 г. Он хочет написать волновое уравнение для одной частицы, и чтобы плотность вероятности была положительно определенной. Это условие выполняется только для плотности вида $\rho = \psi^* \psi$, откуда следует, что волновое уравнение должно быть дифференциальным уравнением первого порядка по времени. Уравнение Клейна — Гордона — второго порядка, и ему соответствует совсем другое выражение для плотности вероятности⁹.

Дирак искал уравнение, удовлетворяющее условиям и линейности по времени и релятивистской инвариантности, и нашел его в виде

$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} + \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} + \alpha_3 \frac{\partial}{\partial z} + \frac{imc}{\hbar} \beta \right) \psi = 0,$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta$ — особого вида матрицы 4×4 ; соответственно ψ — четырехкомпонентная функция. Далее Дирак показал,

⁹ В действительности уравнение Клейна — Гордона можно формально записать и как уравнение первого порядка [23. С. 9–10], но, главное, релятивистская квантовая теория оказалась принципиально теорией многих тел и строгое описание одной частицы в ней невозможно (см. анализ аргументов Дирака в [24]).

что это уравнение описывает частицу со спином $1/2$, а также, что оно дает в первом приближении правильные формулы для тонкой структуры спектра атома водорода (20, 21).

Публикация уравнения Дирака вызвала мгновенный и бурный отклик. Оно дало пищу и для физиков, и для математиков и приблизительно на год стянуло на себя почти все усилия теоретиков в области квантовой электродинамики и релятивистской квантовой теории. В числе особо важных достижений следует отметить полученную в конце 1928 г. окончательную формулу комптоновского рассеяния — формулу Клейна—Нишины [4]. Первоначальная эйфория сменилась, впрочем, достаточно скоро некоторым отрезвлением, ведь с самого начала была известна существенная трудность теории Дирака.

Дирак выдвинул ее сначала в (20) как дополнительное возражение против уравнения Клейна—Гордона, но сразу отметил, что этот недостаток остается и в его теории. Релятивистские уравнения имеют лишние степени свободы (четыре компоненты ψ в уравнении Дирака вместо необходимых двух), которые соответствуют решениям с отрицательной энергией. Классическая теория просто отбрасывала их, объявляя нефизическими, в квантовой так просто избавиться от них не удавалось. Ситуация усугубилась открытием «парадокса Клейна» [25]: электроны с положительной энергией, проходя под потенциальным барьером, могут превращаться в электроны с отрицательной энергией. Непонятно было, как интерпретировать эти электроны. Уравнение Дирака обладало столькими достоинствами и возможностями для приложений, что отказаться от него было невозможно, но и примириться с указанной трудностью — тоже.

1929 г. Ожидания и разочарования

Если Дирак шел к релятивистскому обобщению квантовой теории через механику одной частицы, то его немецкие коллеги попытались сразу построить полную квантовую электродинамику как теорию многих тел. И излучение и частицы материи описывались ими с волновой точки зрения — как квантованное поле, только в одном случае это было электромагнитное поле Максвелла, а в другом — волны материи Шрёдингера. Основы этой программы сформулировал осенью 1927 г. Йордан, сразу, как только понял, каким образом надо развить метод вторичного квантования для ферми-частиц [17]; он же в соавторстве с Клейном, Вигнером и Паули [12, 18, 26] сделал ряд важных шагов по ее реализации¹⁰.

Завершить ее собрались в самом начале 1928 г. Паули и Гейзенберг (см. письма Паули Крамерсу 7.02.1928 г. и Дираку 17.02.1928 г. [28. Т. 1. С. 432—435]). Частицы они описывали тогда еще с помощью уравнения Клейна—Гордона, которое затем

¹⁰ Подробнее см.: [15, 27].

должно было квантоваться по Дираку (бозе-случай) или по Йордану (ферми-случай). Но общая схема квантования поля дала осечку, когда они попытались распространить ее на полное электромагнитное поле, а не только на его «радиационную» часть — излучение. Поэтому их работа приостановилась, и вернулись они к ней через год, после того как Гейзенберг придумал специальный математический фокус, чтобы обойти эту трудность (письмо Паули Клейну 18.02.1929 г. [28. Т. 1. С. 488]). В марте 1929 г. они закончили работу «К квантовой динамике волновых полей» [14].

Она объединила все, что было достигнуто ранее — теорию излучения, вторичное квантование, уравнение Дирака, — в полную теорию, причем была доказана ее релятивистская инвариантность. Но возлагавшиеся на нее надежды не оправдались. За предыдущие годы квантовые теоретики привыкли к быстрым и блестящим успехам, тут же трудности отдельных частных схем при объединении их в последовательную теорию не только не разрешились, но даже усугубились. Полностью сохранились все недостатки дираковской теории электрона, «обманный» прием Гейзенберга нельзя было считать убедительным способом квантования электромагнитного поля, не оправдались возникшие было после статьи [26] надежды избавиться от бесконечности собственной энергии электрона¹¹. С этого момента обратили серьезное внимание на бесконечности, и они, как грибы после дождя, начали возникать в самых разных вычислениях.

Разочарование не заставило себя ждать. Сами авторы — сначала Йордан, затем Паули, Гейзенберг и близкие к ним И. Валлер, Р. Опенгеймер, Л. Розенфельд заговорили о том, что первоначальная программа была неправильна и что необходимы радикальные изменения в самой основе теории. Так, Паули, например, стал ожидать от новой теории, чтобы она объяснила величину безразмерной константы $e^2/\hbar c$ [29. С. 330 рус. пер.]. Широко распространившееся критическое отношение к теории, готовность отказаться от ряда важнейших ее частей свидетельствуют о кризисе в квантовой электродинамике, который продлился с начала 1930 до начала 1933 г. [16].

Дирак поначалу в этой истории не участвовал. В 1929 г. он ничего не написал по квантовой электродинамике, если не считать раздела в «Принципах квантовой механики» (30), где он изложил свои прежние результаты. Он не стал излагать там работу Гейзенберга—Паули, лишь однажды мимоходом и достаточно нейтрально упомянув о ней (30. С. 278 рус. пер.). Навряд ли она могла ему понравиться, и даже не столько из-за результата с его недостатками, сколько из-за самой, лежащей в основе, программы. Ведь она основывалась на волновой картине излучения и материи вместо близкой Дираку корпускулярной и на вторичном квантовании, тогда как Дирак в том же 1929 г., занимаясь теорией многих

¹¹ Об этих трудностях и последовавшем кризисе см. разд. «Кризис квантовой электродинамики» в [16].

тел (25), упорно избегал использования этого метода. Но он ограничился молчанием, впервые с явной критикой теории Гейзенберга — Паули выступив только в 1932 г.

1930 г. Теория дырок

Пока на континенте строили квантовую электродинамику, Дирак в Англии продолжал заниматься более узким вопросом — своей релятивистской механикой электрона. Новый важный шаг был сделан им в самом конце 1929 г. — он заключался в следующем повороте мысли: раз не удастся избавиться от состояний с отрицательными энергиями, надо сделать так, чтобы электрон не мог в них переходить, например, если все эти состояния уже будут заполнены электронами. Так появилось дираковское «море отрицательных (т. е. с отрицательной энергией) электронов» с носящимися над водою отдельными «положительными» электронами.

Если какое-то из отрицательных состояний не занято, то в море имеется «дырка», которая ведет себя как частица с положительным зарядом и положительной энергией. Дирак поддался соблазну отождествить эту частицу с протоном — его теория стала тогда как бы единой теорией материи, описывающей все известные тогда частицы. Правда, масса протона почти в 2000 раз больше массы электрона, но ведь дырка движется в среде из «отрицательных» электронов, и Дирак надеялся из взаимодействия с этой средой вывести дополнительную массу.

Этот комплекс идей Дирак высказал впервые в письме Бору от 26 ноября 1929 г. (опубликовано в [30]), подробно — в статье «Теория электронов и протонов» (26), (декабрь того же года), а также в прочитанных в середине декабря в Париже лекциях (34) и статье (29)¹².

Электрон может упасть в дырку — тогда происходит взаимное уничтожение, аннигиляция обеих частиц, и наоборот, если «отрицательный» электрон получает энергию и переходит в «положительное» состояние, происходит рождение электрона и дырки. Теория Дирака тем самым описывала рождение и уничтожение материальных частиц. Принципиально новым здесь была только возможность расчета процесса, а сама идея аннигиляции протонов и электронов уже несколько лет как активно обсуждалась в астрофизике (Джинс, Эддингтон и др.) (см.: [33]), из квантовых теоретиков ее упоминал Йордан [34]. Возражения вызывала не эта идея, а чаще всего — «метафизическое» с точки зрения многих понятие о ненаблюдаемом «море» с бесконечной плотностью заряда и массы.

Насколько горячо была встречена теория электрона 1928 г. — настолько же холодно теория дырок. Такие авторитеты, как Паули и Бор, отнеслись к ней отрицательно [30, 32]. Из квантовых тео-

¹² Подробнее о теории дырок и последующих событиях см.: [30, 31], а также переписку Дирака [32].

решеток всего несколько человек поддерживали Дирака: Тамм полностью принял его теорию, Оппенгеймер [35] поддержал идею о «море», но возражал против отождествления дырки с протоном (по его мнению, все дырки заполнены, так как аннигиляция их с электронами происходит очень быстро, для протонов же нужно вводить свое «море»). Тамм [36] и Дирак (27) посчитали время аннигиляции и убедились, что оно действительно очень мало (время жизни атома водорода 10^{-3} с). Г. Вейль проделал математические преобразования, которые еще больше убеждали в том, что масса дырки должна быть равна массе электрона¹³, он даже написал об электроне с положительным зарядом [37. С. 278 рус. пер.], но как только зашла речь о физической интерпретации математических результатов, сказал, что в природе он не наблюдается, и вернулся к идее Дирака о протоне.

Трудности теории дырок, а точнее, идеи отождествления дырки с протоном увеличивались: разницу масс объяснить не удалось и, наоборот, были веские аргументы в пользу равенства масс, атом водорода был стабилен и не собирался самоликвидироваться в доли секунды. Все это заставило Дирака в следующем году пересмотреть свои идеи.

1931 г. Монополь и другие частицы

Около 1931 г. в фундаментальной теоретической физике произошла интересная мутация. До сих пор она, как в общем-то и положено, стремилась к уменьшению числа основных сущностей мироздания, принимая в расчет только три (гравитацию, электромагнитное поле и электрон) и иногда добавляя четвертую (протон). И хотя уже было ясно, что в ядре должны действовать какие-то новые силы, хотя близкие к эксперименту физики обсуждали гипотезу о нейтральной частице, высокая теория этим серьезно не занималась. Мы знаем, как быстро начало увеличиваться число элементарных частиц и взаимодействий после открытия в 1932 г. нейтрона и позитрона, но любопытно, что перемена настроений начала происходить еще до этих открытий.

В декабре 1930 г. Паули в открытом письме высказывает идею о существовании в ядре нейтральной частицы. Она помогла бы решить проблемы со статистикой ядер и спектром β -распада. [28. Т. 2. С. 39]. Позже выяснится, что за эти трудности ответственны две разные частицы: нейтрон и нейтрино. Паули считал, что это частица со спином $1/2$, имеющая магнитный момент и небольшую, сравнимую с массой электрона массу. Он написал для нее уравнение, похожее на уравнение Дирака для электрона [28. Т. 2. С. 45].

В мае 1931 г. Дирак написал статью «Квантованные сингулярности в электромагнитном поле» (33), которая содержала теорию еще одной гипотетической частицы — магнитного монополя. Он

¹³ К такому же результату пришел Паули [32].

показал, что введение магнитного заряда, которое делает полностью симметричными уравнения Максвелла, не противоречит квантовой механике, если только электрические и магнитные заряды связаны соотношением

$$eg/\hbar c = 1/2n,$$

где e — электрический заряд; g — магнитный заряд; n — целое число. Существование монополя, таким образом, могло бы служить объяснением квантования заряда. Оценивая возможность существования монополя, Дирак писал: «Это новое развитие не требует никакого изменения в формализме... было бы странным, если бы Природа не использовала это» (33, С. 71)¹⁴.

Надо заметить, что если частица Паули была вызвана определенными экспериментальными трудностями, про монополь этого сказать нельзя. Дирак пришел к нему из чисто теоретических соображений, надеясь, по-видимому, объяснить квантование электрического заряда.

Но его предсказания не ограничились одним монополем. В той же статье Дирак обсуждает еще две новые частицы. Сославшись на трудности с массой протона и быстротой аннигиляции, Дирак отказывается от отождествления дырок с протонами и пишет, что теория дырок требует существования частицы с массой электрона и положительным зарядом — «антиэлектрона»¹⁵. Аналогично получается античастица и для протона. Настоящий фестиваль новых частиц состоялся 1 октября 1931 г. в Принстоне, где одновременно оказались Паули и Дирак и сделали доклады о своих идеях [28. Т. 2. С. 94].

Не то чтобы Дирак был абсолютно убежден в существовании предсказанного им позитрона, но он осознал дилемму: или новая частица существует, или надо отказываться от теории электрона. Вторую возможность он также рассматривал (письмо Тамма Дираку 5.06.1933 г. [32]). То, что антиэлектрон не был известен экспериментаторам, ставило в критическое положение всю теорию.



П. Дирак (30-е годы)
Фотография из архива П. Л. Капицы

¹⁴ Об истории монополя см.: [38, 39].

¹⁵ См.: [31].

1932 г. Несостоявшаяся революция, или как Дирак чуть было не стал Гейзенбергом

Исходящая из Германии волна критического отношения к квантовой электродинамике докатилась и до Дирака — в 1932 г. он включается в работу по пересмотру накопленного багажа методов. При этом внимание его смещается от теории электрона к описанию электромагнитного поля. Сейчас мы знаем, что вопрос этот был удовлетворительно решен в теории излучения Дирака (17) и ее развитии в 1929 г. Гейзенбергом—Паули [14] и Ферми [13], но в тогдашней кризисной ситуации даже эти результаты вызывали сомнения.

Так, в феврале 1931 г. новый вариант трактовки электродинамических проблем предложил Гейзенберг [40]. В отличие от дираковской теории излучения он не стал пользоваться гамильтонианом поля и частиц, а только уравнениями движения для них. Квантованная электромагнитная волна возбуждала атомную систему, для этой системы в духе волновой механики вычислялись плотность заряда и тока, а из них по классическим формулам — излучение. Таким образом, получилась теория, очень похожая на более раннюю теорию Клейна [6], с тем только отличием, что электромагнитные волны квантовались. Гейзенберг считал, что его подход опирается на принцип соответствия в отличие от теории излучения Дирака.

Особенно активно стал противопоставлять эти два подхода Л. Розенфельд. В нескольких статьях 1931 г. [41—43] он критиковал дираковскую теорию, считая что именно она приводит к появлению в квантовой электродинамике бесконечностей, и развивал метод Гейзенберга. Он получил с его помощью все основные результаты дираковской теории излучения, а в чем-то даже продвинулся дальше, а именно вывел в работе [43] так называемую формулу Мёллера для сечения рассеяния двух электронов с учетом релятивистского запаздывания взаимодействия. Возможно, что именно критика Розенфельда побудила Дирака самому заняться работой Мёллера [44], когда в начале 1932 г. он вернулся в Англию из поездки по Америке.

С точки зрения критериев квантовой электродинамики Мёллер вывел свой результат нестрого, в какой-то степени угадав правильный ответ. Он рассмотрел в борновском приближении рассеяние одного электрона на другом, переход электрона из одного состояния в другое связал в духе электродинамики Клейна—Гордона с определенными классическими выражениями для плотности заряда и тока, производимое им излучение вызывало переход и второго электрона в другое состояние. Излучение Мёллер не квантовал; несмотря на несимметричный и приближенный вывод, итоговый результат оказался симметричным по обоим электронам, релятивистски инвариантным и, добавим, полностью подтвердившимся впоследствии в более строгой теории. Для матричного элемента процесса, при котором начальное состояние электронов задается

переменными $p_0^I, u_0^I, p_0^{II}, u_0^{II}$ (u — спиновая часть волновой функции электрона, p — его импульс), а конечное — переменными p^I, u^I, p^{II}, u^{II} , он получил выражение

$$\Phi = \frac{e^I e^{II} h^5 c^2}{\pi} \frac{(u^I u^I | 1 - \alpha^I \alpha^{II} | u_0^I u_0^I)}{c^2 (p_0^I - p^I)^2 - (E_I - E_{01})^2} \delta(p^I + p^{II} - p_0^I - p_0^{II}).$$

Здесь α — вектор, составленный из матриц Дирака; римские цифры обозначают величины, относящиеся соответственно к первому и второму электронам.

Размышляя над работой Мёллера, Дирак придумал новый вариант построения всей квантовой электродинамики, который он изложил в статье «Релятивистская квантовая механика» (36), датированной 24 марта 1932 г.¹⁶ В представленной им схеме мёллеровский подход трансформировался очень сильно, пожалуй, лишь в постановке задачи осталось что-то схожее. Дирак рассматривает два электрона, для которых пишет систему уравнений:

$$\begin{cases} i\hbar \frac{\partial}{\partial t_1} \psi = (H_1 + \varepsilon_1 V(x_1 t_1)) \psi, \\ i\hbar \frac{\partial}{\partial t_2} \psi = (H_2 + \varepsilon_2 V(x_2 t_2)) \psi. \end{cases}$$

Здесь H_1 и H_2 — гамильтонианы свободных частиц; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — их заряды; V — потенциал поля. Заметим, что для каждой частицы вводится свое время, из-за чего теория позже получила название «теории со многими временами». Эти два уравнения связаны за счет общей функции поля V и волновой функции ψ . Для решения их Дирак полагает $t_1 = t_2 = t$ и складывает, получая

$$\{i\hbar \partial/\partial t - H_1 - H_2 - \varepsilon_1 V(x_1 t) - \varepsilon_2 V(x_2 t)\} \psi = 0.$$

Это уравнение он решает методом последовательных приближений, рассматривая два последних члена в скобке как возмущение.

Отметим еще две особенности теории Дирака. Во-первых, в отличие от его прежней теории излучения и от теории Гейзенберга — Паули в гамильтониан здесь входят только два члена, отвечающие частицам и их взаимодействию с полем, но нет третьего — гамильтониана самого поля. Во-вторых в теории отсутствует прямое кулоновское взаимодействие частиц друг с другом, они взаимодействуют только через поле. В качестве уравнения для последнего Дирак добавляет к двум исходным уравнениям третье:

$$\Delta V - (1/c^2) \partial^2 V / \partial t^2 = 0. \quad (i)$$

V здесь квантуется обычным способом. Это уравнение отвечает свободному полю, как бы не взаимодействующему с зарядами; в теории Дирака, таким образом, не вводится явно статического потенциала взаимодействия частиц, поле состоит только из излучения.

¹⁶ Этот эпизод еще не рассматривался историками, поэтому я остановлюсь на нем подробнее.

Для оправдания такой странной постановки задачи Дирак больше половины своей статьи посвящает философским рассуждениям, что, вообще говоря, совершенно нетипично для него. Он подражает копенгагенской школе, используя принципы соответствия и наблюдаемости, но, на мой взгляд, делает это достаточно неубедительно. Ему чужд был этот стиль мышления, и его философская аргументация противоречива и производит впечатление придуманной *post factum*. Я не буду излагать ее подробно, отмечу только, что для обоснования выделенной роли поля Дирак пишет, что оно необходимо для самого процесса измерения, и поэтому «мы не можем считать поле динамической системой на том же основании, как и частицы. Поле должно выступать в теории как что-то более элементарное и фундаментальное» (36. Р. 454). Далее, он считает, что его теория построена в духе принципа соответствия, за исходную классическую картину выбраны электроны, взаимодействующие через поглощение и испускание волн. Элементарным процессом своей теории Дирак считает квантовый скачок, при котором поле переходит из одного состояния падающей на электрон волны в другое состояние исходящей от него волны. Матричный элемент такого процесса он сравнивает с матричными элементами, введенными Гейзенбергом в 1925 г., и вообще проводит аналогии между ситуацией в квантовой электродинамике и ситуацией накануне создания квантовой механики и между революционной работой Гейзенберга 1925 г. и своей нынешней статьей.

Оправданием таких громких заявлений является, по-видимому поразивший Дирака результат вычислений. Хотя он рассчитал только очень далекий от реальности пример — нерелятивистские частицы, движущиеся в пространстве с одним измерением и взаимодействующие через скалярные волны, — но уже в нем (во втором приближении) он получил уравнение для ψ , такое, как будто между частицами действовало статическое поле притяжения. Это дало надежду, что в трехмерном случае из обмена волнами удастся вывести кулоновский потенциал. Вероятно, Дирак не был бы так удивлен, если бы знал, что подобные вещи делались еще в классических теориях и что даже в квантовой электродинамике Ферми еще в 1930 г. в работе [13], изданной на итальянском языке и оставшейся практически неизвестной, получил кулоновский потенциал из волн, отвечающих скалярному потенциалу ϕ , и продольной компоненты векторного потенциала A электромагнитного поля. Во всяком случае, чувствуется, что Дирак настроен с большим энтузиазмом относительно предложенной им теории.

Работе Дирака пока еще очень далеко до законченной квантовой электродинамики: реальная теория, конечно же, должна быть построена в трехмерном, а не в одномерном пространстве; вместо скалярных волн надо ввести в нее электромагнитные волны; а частицы надо описывать релятивистским уравнением Дирака.

Не прошло и двух месяцев после выхода статьи Дирака, как все эти недостатки попытались устранить В. А. Фок и Б. Подольский.

Подольский, американский теоретик русского происхождения, работал тогда в Харькове, в Украинском физико-техническом институте, а Фок регулярно приезжал в УФТИ. Именно там в июне 1932 г. они подготовили две статьи [45, 46]. В первой был построен трехмерный вариант теории Дирака, при этом из обмена скалярными волнами получился кулоновский потенциал взаимодействия, причем с правильным знаком: одинаково заряженные частицы отталкивались. Во второй они попробовали разрешить две оставшиеся проблемы, но, как выяснилось впоследствии, преуспели не полностью.

При квантовании электромагнитного поля они столкнулись с той же трудностью, что и Гейзенберг—Паули [14] и Ферми [13]: поле, описываемое уравнениями Максвелла, нельзя было квантовать по канонической схеме. Выход найден был следующий — фактически квантовалось поле, более общее, чем максвелловское, а выполнение уравнений Максвелла достигалось впоследствии с помощью дополнительного условия, которое накладывало определенные ограничения не на операторы электромагнитного поля, а на волновую функцию ψ . Конкретный вид обобщенного поля и дополнительного условия мог быть разным. Способ, выбранный Фоком и Подольским, отличался от обоих предложенных ранее, но и имел нечто общее с каждым из них (впрочем, Фок и Подольский знали тогда лишь работу [14], а об идеях Ферми имели лишь смутное представление). Но им не удалось довести свой метод до полностью непротиворечивого состояния, поэтому вопрос о правильном квантовании будет еще обсуждаться в их переписке с Дираком¹⁷.

Решение последней задачи — релятивистского описания частиц — тоже не было доведено до конца. Фок надеялся получить запаздывающее взаимодействие двух электронов. Кроме формулы Мёллера, тогда существовала еще формула Брейта, дающая такое взаимодействие с точностью до второго порядка по v/c . Фок искал потенциал взаимодействия в таком же приближении, но результат не только не совпал с формулой Брейта, но вообще оказался неудовлетворительным: кроме правдоподобных членов порядка $(v/c)^2$, в него входили также совершенно непонятные мнимые члены порядка v/c . Лишь в сентябре Подольский исправит имевшуюся в выводе ошибку, полученный им результат совпадет с формулой Мёллера¹⁸. Тем самым круг замкнулся — эта формула, давшая исходный толчок к построению новой теории, получила в ней строгое обоснование.

¹⁷ См. публикуемую в наст. сб. переписку Дирака, Фока и Подольского, письма от 7 июля, 19 июля, 16 октября, 2 ноября 1932 г.

¹⁸ См.: [47] и письма Подольского Фоку от 26 сентября и 1 октября. Несколько раньше формулы Брейта и Мёллера вывели в квантовой электродинамике Г. Бете и Ферми [48]. Они опирались на фермиевскую формулировку квантовой электродинамики. Совпадение результатов связано с тем, что в конечном итоге все формулировки — Гейзенберга—Паули, Ферми, Дирака, Гейзенберга — оказались эквивалентными.

Но пока таким образом новая теория развивалась, была поставлена под сомнение ее революционность. В апреле, когда первая статья Дирака (36) еще была в печати, он докладывал о ней на конференции в Копенгагене. Присутствовавший на докладе Розенфельд дождался выхода статьи Дирака и написал работу [49], доказывавшую, что новая теория и старая — Гейзенберга—Паули — эквивалентны, с подтекстом, что обе одинаково плохи. Несмотря на бросающуюся в глаза разницу исходных уравнений, перейти от одной к другой можно каноническим преобразованием¹⁹.

Тем не менее Дирак, Фок и Подольский продолжали, обмениваясь письмами, развивать теорию, а в сентябре встретились все втроем в Ленинграде на конференции по физике твердого тела. Дирак и Фок сделали там доклады, результаты которых во многом пересекались. После окончания конференции Дирак отдыхал с П. Л. Капицей в Крыму, а на обратном пути в начале октября посетил Харьков. Там он обещал Д. Д. Иваненко дать текст своего доклада в издававшийся в Харькове журнал «*Physikalische Zeitschrift der SowjetUnion*», но, поскольку обнаружилось, что значительная часть этого материала уже была написана Подольским для планировавшейся им вместе с Фоком новой статьи, договорился о публикации совместной работы. Текст ее писал Подольский в Харькове и согласовал его по переписке с Фоком в Ленинграде и Дираком в Кембридже²⁰. Так появилась известная статья «К квантовой электродинамике» (37), датированная 25 октября 1932 г.

В ней теория Дирака доведена до завершения. Основные новшества по сравнению со статьей Фока—Подольского [46] принадлежат Дираку. Это идея более простого, чем розенфельдовское, доказательства эквивалентности старой и новой квантовых электродинамик (доработанная Подольским — см. полемику о нем в письмах от 2, 16 и 24 ноября), а также уточненное дополнительное условие при квантовании электромагнитного поля, устранившее имевшиеся противоречия (Фок затем доказал эквивалентность этого условия с условием Гейзенберга—Паули — письмо от 16 октября).

Итак, кардинальной революции не получилось, но все же новая форма квантовой электродинамики по ряду свойств оказалась лучше старой: релятивистская инвариантность тут была явной из-за введения собственного времени для каждой из частиц, и ее не надо было сложно доказывать; представление взаимодействия обычно удобнее для решения задач, оно также сыграло впоследствии важ-

¹⁹ Фактически это переход от представления Шрёдингера к представлению взаимодействия. Характерным свойством представления взаимодействия является то, что уравнения для операторов поля совпадают с уравнениями для свободного поля, как будто бы источников поля нет [23, С. 132]. Именно таково дираковское уравнение (i). Отметим, впрочем, что в его теории переход к представлению взаимодействия осуществлен не полностью — только для электромагнитного поля, но не для частиц.

²⁰ См. письма от 9 и 16 октября, 2, 11, 16 и 24 ноября 1932 г.

ную роль при разработке в 40-х годах ковариантной формулировки квантовой электродинамики. Результаты работы (37) Дирак включил во второе издание «Принципов квантовой механики», 1935 г. (30а).

1933 г. Новые времена

Кризисную ситуацию в квантовой электродинамике отражает написанный в 1932 г. обзор Паули [29]. Паули считал, что имеются только отдельные части релятивистской теории, объединить которые в последовательную схему не удастся. Он признавал теорию излучения Дирака и его же теорию электрона, но отвергал или оценивал скептически вторичное квантование, свою с Гейзенбергом теорию [14], теорию дырок.

В 1925 г. Паули написал аналогичный критический обзор по старой квантовой теории [50]. Обзор еще был в печати, но уже устарел, потому что появились первые статьи по квантовой механике. Ситуация практически повторилась и на этот раз — только теперь новым существенным моментом стало открытие позитрона.

Первую публикацию Андерсона в сентябре 1932 г. почти никто не заметил, взрыв наступил после появления в начале 1933 г. второй статьи Андерсона [51] и статьи Блэкетта—Оккиалини [52]. Достаточно быстро окрепло убеждение, что новая частица не что иное, как описанный Дираком антиэлектрон. С этого времени начинается новый этап в развитии квантовой электродинамики.

Значительная часть трудностей была решена. Совместными усилиями Ферми, Гейзенберга—Паули, Дирака—Фока—Подольского было удовлетворительно проквантовано электромагнитное поле, после открытия позитрона исчезли острые проблемы с уравнением Дирака. Остались, правда, расходимости теории. В результате кризис превратился из острого в вяло текущий. По-прежнему многие были недовольны теорией, предпринимали попытки изменить ее (Йордан 1933—1934 гг., Борн—Инфельд 1934—1935 гг., Дирак 1936, 1938 гг. и т. п.), но широко распространилось и новое, прагматическое отношение к ней.

Открытие позитрона изменило соотношение квантовой электродинамики с экспериментом. До него квантовой электродинамике приходилось объяснять уже известные опыты или обосновывать формулы, выведенные прежними, менее строгими методами (например, формулу Мёллера). Фактически позитрон был первым предсказанием, сделанным именно квантовой электродинамикой, после него открылась целая обширная область новых явлений, которые прежними методами не объяснялись и где объяснениями и предсказаниями занялась квантовая электродинамика. Успехи подтверждали, что теория работает, несмотря на логическое несовершенство. Магистральным направлением развития, кроме решения прикладных задач, стала борьба с бесконечностями через разработку вычислительных процедур. Происходит постепенная смена поколений, и прежние лидеры, в их числе Дирак, перестают играть такую решающую роль.

Здесь я остановлюсь и не буду рассматривать последующие работы Дирака. Дам только краткую оценку его статей 1933 г., непосредственно примыкающих к рассмотренному периоду.

Статья «Лагранжиан в квантовой механике» (38) написана еще в конце 1932 г. В ней Дирак возвращается к своей постоянной мысли о том, что гамильтонов формализм с его выделенной ролью времени не очень пригоден для релятивистской теории, и рассматривает возможность переноса в квантовую теорию идей лагранжева подхода. Статья имела дальние последствия — ее идеи были трансформированы в 1948 г. Р. Фейнманом в формулировку квантовой механики на основе интегралов по траекториям.

В 1933 г. Дирак впервые высказывает идею поляризации вакуума (42, 43): заряженная частица экранируется из-за взаимодействия с морем отрицательных электронов и из-за этого ее наблюдаемый заряд меньше истинного. Математическая разработка этой идеи привела его одним из первых к успешной вычитательной процедуре, в которой конечный результат получается как разность двух бесконечных величин (45). Это как раз тот путь, который определил развитие квантовой электродинамики в 30-е годы. Но хотя Дирак сам предложил его, он, вероятно, никогда не относился к нему как к окончательному решению трудностей, так он продолжал относиться и к перенормировкам, даже когда они развились в последовательный универсальный метод. Разочарование в квантовой электродинамике, возникшее у Дирака в начале 30-х годов, по-видимому, никогда больше не оставляло его.

Подведение итогов

Дирак, как мы видели, существенно повлиял на становление почти всех основных понятий и методов квантовой электродинамики. В разных случаях это было по-разному. Он мог, например, создать парадигму, заложив основу целого широкого направления (квантование электромагнитного излучения, уравнение Дирака, вычитательные методы), мог высказать важную идею и оставить ее потом (вторичное квантование), некоторые направления он разрабатывал практически в одиночестве или же подвергаясь сильной критике (фотонная теория излучения, теория дырок, расчет аннигиляции, предсказание позитрона, теория со многими временами), часть его идей получила развитие намного позже (лагранжев метод, монополю).

Хотя его персональный вклад, по-видимому, ни с чьим другим несравним, он вовсе не определял развитие квантовой электродинамики так, как, скажем, Эйнштейн — общей теории относительности. Нельзя также сказать, что это развитие оправдывало его ожидания. Если уместны аналогии, то можно сказать, что его работы всегда задавали вектор касательной к траектории, но всегда же существовало и нормальное ускорение, которое отклоняло траекторию от заданного Дираком направления.

Можно кое-что понять из отдельных замечаний в его работах про его идеал теории, в каком виде она удовлетворила бы его картине мира и эстетическим вкусам. Из двух связанных, но все же различных задач — релятивистского обобщения квантовой теории и описания процессов с участием излучения — его явно больше занимала первая. Можно сказать что он строил скорее релятивистскую квантовую механику, чем квантовую электродинамику, это, кстати, видно и по названиям его статей. Релятивистская инвариантность должна быть явной, а не вводиться в качестве поправок или присутствовать в скрытом виде, основное условие для этого, которое он неоднократно приводил, — в том, чтобы переменная времени вводилась бы так же, как и переменные пространственных координат. Но этому требованию почти никогда не удавалось удовлетворить, и он часто ограничивался релятивистским выражением для гамильтониана.

Если говорить о картине мира, то в самом важном для физиков того времени аспекте — дилемме «волна—частица» — Дирак явно склонялся к корпускулярному взгляду. Особенно это заметно в его ранних работах. Это и тенденция понимать излучение как набор фотонов, стремление построить релятивистскую механику одной частицы, и понимаемое явно как реально существующее, а не как идеализация или метафора, море отрицательных электронов. Вообще, там, где Дирак обсуждает физическую интерпретацию, а не математический аппарат, он чаще всего делает это в корпускулярных терминах.

Что касается стиля и тактики, то нужно отметить, во-первых, его стремление заниматься самыми фундаментальными вопросами, не отвлекаясь на прикладные задачи. Во-вторых, он, кажется, не рассчитывал сразу построить всеобъемлющую теорию и решал эти вопросы по отдельности. Он не любил феноменологические и гибридные теории и, наоборот, вдохновлялся фундаментальными принципами типа релятивистской инвариантности или гамильтонова формализма. Физическая картина мира была важна для него на этапе постановки задачи и формулировки основных математических идей, дальше же он мог с легкостью довериться математическому формализму, не заботясь о соответствующей интерпретации промежуточных формул, а только — конечного результата.

На протяжении рассмотренного периода росли его расхождения с немецкими физиками. Вообще, в том, что я выделил как его физическую картину мира, он был наиболее одинок. Эти его идеи — типа фотонной теории излучения или дырок в море электронов — воспринимались другими с наибольшим трудом, а успех выпадал больше на долю математических методов, чем того, что Дирак считал физической интерпретацией теории. Это его одиночество явно способствовало возникновению у него критического отношения к той квантовой электродинамике, какой она в итоге оказалась.

1. *Kozhevnikov A. B., Novik O. I.* Analysis of informational ties dynamics in early quantum mechanics (1925–1927) // *Acta historiae rerum naturalium necnon technicarum*. Iss. 20. Pragae. 1989. P. 115–159.
2. *Mehra J., Rechenberg H.* The historical development of quantum theory. N. Y.: Springer, 1982. Vol. 4. 322 p.
3. *Stuewer R.* The Compton effect, turning point in physics. N. Y.: Sci. hist. publ., 1975. 367 p.
4. *Klein O., Nishina Y.* Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac // *Ztschr. Phys.* 1929. Bd. 52. S. 853–868.
5. *Gordon W.* Der Comptoneffect nach der schrödingerschen Theorie // *Ibid.* 1926. Bd. 40. S. 117–133.
6. *Klein O.* Elektrodynamik und Wellenmechanik vom Standpunkt des Korrespondenzprinzips // *Ztschr. Phys.* 1927. Bd. 41. S. 407–442.
7. *Physics Citation Index (1920–1929)*. Philadelphia: ISI, 1983. Vol. 1. 1931 p.; Vol. 2. 1431 p.
8. *Jost R.* Foundations of quantum field theory // *Aspects of quantum theory/* Ed. A. Salam, E. P. Wigner. Cambridge: Univ. press, 1972. P. 61–77.
9. *Кожеевников А. Б.* Дирак и квантовая теория излучения // *Эйнштейновский сборник, 1984–1985*. М.: Наука, 1988. С. 246–270.
10. *Born M.* Das Adiabatenprinzip in der Quantenmechanik // *Ztschr. Phys.* 1926. Bd. 40. S. 167–192.
11. *Born M., Heisenberg W., Jordan P.* Zur Quantenmechanik II // *Ibid.* Bd. 35. S. 557–615.
12. *Jordan P., Pauli W.* Zur Quantenelektrodynamik ladungsfreier Felder // *Ibid.* 1928. Bd. 47. S. 151–173.— То же на рус. яз. // Паули В. Труды по квантовой теории. М.: Наука, 1977. С. 7–29.
13. *Fermi E.* Sopra l'elettrodinamica quantistica // *Rend. Lincei.* 1929. Vol. 9. P. 881–887; 1930. Vol. 10. P. 431–435.— То же на рус. яз. // Ферми Э. Науч. тр. М.: Наука, 1971. Т. 1. С. 302–308, 359–363.
14. *Heisenberg W., Pauli W.* Zur Quantendynamik der Wellenfelder // *Ztschr. Phys.* 1929. Bd. 56. S. 1–61.— То же на рус. яз. // Паули В. Труды по квантовой теории. М.: Наука, 1977. С. 30–88.
15. *Darrigol O.* The origin of quantized matter waves // *Hist. Stud. Phys. and Biol. Sci.* 1986. Vol. 16. P. 197–253.
16. *Кожеевников А. Б.* В. А. Фок и метод вторичного квантования // *Исследования по истории физики и механики*. М.: Наука, 1988. С. 115–138.
17. *Jordan P.* Zur Quantenmechanik der Gasentartung // *Ztschr. Phys.* 1927. Bd. 44. S. 473–480.
18. *Jordan P., Wigner E.* Über das Paulische Äquivalenzverbot // *Ibid.* 1928. Bd. 47. S. 631–651.— Idem // *Selected papers on quantum electrodynamics/* Ed. J. Schwinger. N. Y.: Dover, 1958. P. 41–61.
19. *Darwin C. G.* The electron as a vector wave // *Proc. Roy. Soc. London.* A. 1927. Vol. 116. P. 227–233.
20. *Pauli W.* Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons // *Ztschr. Phys.* 1927. Bd. 43. S. 601–623.
21. *Kragh H.* The genesis of Dirac's relativistic theory of electrons // *Arch. Hist. Exact Sci.* 1981. Vol. 24. P. 31–67.
22. *Moyer D. F.* Origins of Dirac's electron, 1925–1928 // *Amer. J. Phys.* 1981. Vol. 49. P. 944–948.
23. *Ахиезер А. И., Берестецкий В. Б.* Квантовая электродинамика. 4-е изд. М.: Наука, 1981. 432 с.
24. *Pauli W., Weisskopf V.* Über die Quantizierung der skalaren relativistischen Wellengleichung // *Helv. phys. acta.* 1934. Bd. 7. S. 709–731.— То же на рус. яз. // Паули В. Труды по квантовой теории. М.: Наука, 1977. С. 194–214.
25. *Klein O.* Die Reflexion von Elektronen an einem Potentialsprung nach der relativistischen Dynamik von Dirac // *Ztschr. Phys.* 1929. Bd. 53. S. 157–165.

26. *Jordan P., Klein O.* Zum Mehrkörperproblem der Quantentheorie // *Ibid.* 1927. Bd. 45. S. 751–765.
27. *Кожешников А. Б.* Эйнштейновская формула для флуктуаций и корпускулярно-волновой дуализм // *Эйнштейновский сборник*, 1986–1987. М.: Наука, 1990. С. 102–124.
28. *Pauli W.* Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a.: In 2 Bd. N. Y. etc.: Springer, 1979–1985.
29. *Pauli W.* Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik // *Handbuch der Physik*. В., 1933. Bd. 24, Т. 1. S. 82–272.— Пер на рус. яз.: *Паули В.* Общие принципы волновой механики. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1947. 332 с.
30. *Moyer D. F.* Evaluations of Dirac's electron, 1928–1932 // *Amer. J. Phys.* 1981. Vol. 49. P. 1055–1062.
31. *Кобзарев И. Ю.* К истории позитрона // *Наст. сб.*
32. *П. Дирак и И. Е. Тамм.* Избранная переписка // Там же.
33. *Bromberg J.* The concept of particle creation before and after quantum mechanics // *Hist. Stud. Phys. Sci.* 1976. Vol. 7. P. 161–182.
34. *Jordan P.* Die Lichtquantenhypothese. Entwicklung und gegenwärtige Stand // *Ergebnisse der exakten Wissenschaften*. В.: Springer, 1928. Bd. 7. S. 158–208.— То же на рус. яз. // *УФН*. 1930. Т. 10. С. 27–94.
35. *Oppenheimer J. R.* On the theory of electrons and protons // *Phys. Rev.* 1930. Vol. 35. P. 562–563.
36. *Тамм И.* Über die Wechselwirkung der freien Elektronen mit der Strahlung nach der Diracschen Theorie des Elektrons und nach Quantenelektrodynamik // *Ztschr. Phys.* 1930. Bd. 62. S. 545–568.— То же на рус. яз. // Тамм И. Е. *Собр. науч. тр.* М.: Наука, 1975. Т. 2. С. 24–45.
37. *Weyl H.* The theory of groups and quantum mechanics. N. Y.: Dover publ., 1932. XXII+422 p.— Рус. пер.: *Вейль Г.* Теория групп и квантовая механика. М.: Наука, 1986. 496 с.
38. *Кривонос Л. Н.* История гипотезы монополя Дирака // *NTM-Schr. Gesch. Naturwiss., Techn. und Med.* 1986. Bd. 23. S. 35–45.
39. *Kragh H.* The concept of the monopole. A historical and analytical case-study // *Stud. Hist. and Phil. Sci.* 1981. Vol. 12. P. 141–172.
40. *Heisenberg W.* Bemerkungen zur Strahlungstheorie // *Ann. Phys.* 1931. Bd. 9. S. 338–346.
41. *Rosenfeld L.* Zur Kritik der Diracschen Strahlungstheorie // *Ztschr. Phys.* 1931. Bd. 70. S. 454–462.
42. *Rosenfeld L.* Zur korrespondenzmäßigen Behandlung der Linienbreite // *Ibid.* Bd. 71. S. 273–278.
43. *Rosenfeld L.* Bemerkung zur korrespondenzmäßigen Behandlung des relativistischen Mehrkörperproblems // *Ibid.* Bd. 73. S. 253–259.
44. *Möller Ch.* Über den Stoß zweier Teilchen unter Berücksichtigung der Retardation der Kräfte // *Ibid.* Bd. 70. S. 786–795.
45. *Fock V. A., Podolsky B.* Zur Diracschen Quantenelektrodynamik // *Phys. Ztschr. Sowjetunion.* 1932. Bd. 1. S. 798–800.— То же на рус. яз. // *Фок В. А.* Работы по квантовой теории поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. С. 52–54.
46. *Fock V. A., Podolsky B.* On the quantization of electromagnetic waves and the interaction of charges on Dirac's theory // *Phys. Ztschr. Sowjetunion.* 1932. Bd. 1. S. 801–817.— То же на рус. яз. // *Фок В. А.* Работы по квантовой теории поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. С. 55–68.
47. *Podolsky B., Fock V. A.* Derivation of Möllers formula from Dirac's Theory // *Phys. Ztschr. Sowjetunion.* 1932. Bd. 2. S. 275–277.— То же на рус. яз. // *Фок В. А.* Работы по квантовой теории поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. С. 68–69.
48. *Bethe H., Fermi E.* Über Wechselwirkung von zwei Elektronen // *Ztschr. Phys.* 1932. Bd. 77. S. 296–306.— То же на рус. яз. // *Ферми Э.* Науч. тр. М.: Наука, 1971. Т. 1. С. 428–438.
49. *Rosenfeld L.* Über eine mögliche Fassung des Diracschen Programms zur Quantenelektrodynamik und deren formalen Zusammenhang mit der Heisenberg – Paulischen Theorie // *Ztschr. Phys.* 1932. Bd. 76. S. 729–734.

50. *Pauli W. Quantentheorie // Handbuch der Physik. B.: Springer, 1926. Bd. 23. S. 1–278.*— То же на рус. яз. // Паули В. Труды по квантовой теории. М.: Наука, 1975. Т. 1. С. 7–351.
51. *Anderson C. D. The positive electron // Phys. Rev. 1933. Vol. 43. P. 491–494.*
52. *Blackett P. M. S., Occhialini G. P. S. Some photographs of the tracks of penetrating radiation // Proc. Roy. Soc. London. A. 1933. Vol. 139. P. 699–726.*

М. И. Монастырский

МОНОПОЛЬ ДИРАКА И РАССЛОЕНИЕ ХОПФА

В 1931 г. в двух ведущих научных журналах «*Mathematische Annalen*» и «*Proc. Roy. Soc. London*» появились статьи Х. Хопфа [1] и П. А. М. Дирака (33). Оба автора были молодыми, но уже известными учеными. Тридцатилетнему Хейнцу Хопфу принадлежали фундаментальные работы по алгебраической топологии. Достаточно упомянуть теорему Хопфа о векторных полях. Полюс Дирак (ему тогда было 29 лет) — один из создателей квантовой механики, к этому времени уже выполнил свои главные работы по квантовой электродинамике. В 1933 г. он удостоился Нобелевской премии по физике. Но даже на фоне предшествующих блестящих достижений работы 1931 г. занимают в творчестве обоих ученых особое место.

Жизнь и судьба этих работ, их влияние на дальнейшее развитие математики и физики и неожиданная встреча спустя почти 50 лет — вот краткое содержание последующих страниц.

Дираку принадлежат всего две работы по монополю, из них первая, опубликованная в 1931 г., является основной, содержащей все принципиальные идеи. Следующая работа появилась в 1948 г. (78) и посвящена детальной разработке квантовой электродинамики с учетом монополей.

Интересно проследить, как Дирак пришел к концепции монополя. Еще на заре исследований электромагнитных явлений возникла следующая принципиальная проблема. Почему в природе наблюдаются электрически заряженные частицы и не встречаются изолированные магнитные полюса? Исчерпывающего ответа на этот вопрос нет до сих пор. Проблема таких полюсов (магнитных монополей) рассматривалась в рамках классической теории Максвелла рядом выдающихся ученых, включая Пуанкаре, решившего задачу о движении заряженной частицы в поле магнитного монополя, но только П. Дирак придал этому вопросу новый смысл. Он связал задачу о монополе с другой, принципиальной с точки зрения квантовой теории, проблемой — целочисленным квантованием электрического заряда элементарных частиц. П. Дирак по-

казал, что из гипотезы о существовании магнитного монополя следует и существование электрического заряда. Его анализ базируется на основных принципах квантовой механики и существенно использует довольно простой, но фундаментальный топологический факт, который мы рассмотрим подробнее.

Выберем обычную декартову систему координат и поместим в ее начале монополь с магнитным зарядом g . Окружим монополь сферой произвольного радиуса r . Тогда вектор-потенциал магнитного поля монополя обязательно будет иметь по меньшей мере одну точку разрыва на сфере. Линия, соединяющая монополь с этой точкой, представляет собой линию сингулярности вектор-потенциала (называемую также струной, или нитью Дирака). Однако напряженность магнитного поля и другие наблюдаемые физические величины не имеют особенностей, т. е. этой линии не должен придаваться реальный физический смысл. С этой целью П. Дирак ввел специальные правила обхода линий сингулярности — правила квантования.

Пусть ψ — волновая функция электрона с зарядом e в поле монополя с магнитным зарядом g , обращающаяся в нуль на линии сингулярности γ . При обходе этой линии по любому замкнутому контуру s волновая функция преобразуется следующим образом:

$$\psi_1 = \exp(ie\alpha)\psi, \quad i = \sqrt{-1}.$$

Величина α , стоящая в экспоненте, как будет показано далее (см. формулу (vi)), связана с магнитным зарядом монополя простым соотношением: $\alpha = 2g\theta$ (θ — угол, определяющий положение точки на кривой s и изменяющийся на 2π при полном обходе вокруг струны). Но значения волновой функции в произвольной точке до и после обхода линии сингулярности должны совпадать. Это возможно лишь в том случае, если выполняется условие квантования:

$$eg = n/2.$$

Целое число n , входящее в эту формулу, не меняется при любых непрерывных преобразованиях векторных полей и поэтому является топологическим инвариантом, как и соответствующий ему квантованный магнитный заряд, который в этом смысле можно назвать «топологическим зарядом». Подобные целочисленные характеристики, возникающие и в других разделах физики, также получили наименование «топологических зарядов».

П. Дирак доказал, что гипотеза о существовании магнитных полюсов, дополненная правилами квантования $eg = n/2$, не противоречит ни уравнениям Максвелла, ни современным представлениям квантовой теории. В заключение своей статьи он в присущем ему стиле восклицает: «С этой точки зрения было бы удивительно, если бы Природа не использовала такой возможности».

Работа 1931 г., несомненно, относится к числу тех редких событий в естествознании, где «на кончике пера», да протрется мне это несколько избитое, но точное сравнение, предсказано суще-

ствование нового объекта — монополя. По глубине мысли и изяществу анализа эта работа — одна из жемчужин в творчестве Дирака. Но ее дальнейшая судьба не менее поразительна. Предсказанная частица не была открыта в течение последующих 50 лет, несмотря на большие экспериментальные усилия. Не открыта она и сегодня.

Последующее развитие теории элементарных частиц не привело к однозначному решению вопроса о существовании монополя. Оставаясь нерешенной, эта проблема практически не влияла на последующее развитие физики элементарных частиц. В течение ряда лет изучение свойств монополей было довольно захудалым разделом теоретической физики, несмотря на отдельные наскоки на эту проблему физиков высокого класса (Г. Венцель, Ю. Швингер и др.).

Такое положение существовало до начала 70-х годов, когда ситуация радикально изменилась. В 1974 г. появились работы двух молодых физиков Г. Хоофта [2] и А. М. Полякова [3]¹. В этих работах для уравнения Янга—Миллса—Хиггса с изотопической группой $SO(3)$ было построено трехмерное локализованное решение с конечной энергией. Это решение получило название калибровочного монополя, или монополя Хоофта — Полякова². Чтобы пояснить, о чем идет речь, я весьма схематически воспроизведу их рассуждения.

Рассмотрим набор взаимодействующих янг—миллсовских полей, преобразующихся по присоединенному представлению группы с изовекторными полями Хиггса.

Лагранжиан \mathcal{L} представим в следующем виде:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} \text{tr} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{1}{2} (D_\mu \Phi) (D^\mu \Phi) - U(\Phi),$$

$$U(\Phi) = -(\beta^2/2) (\Phi\Phi) + (\lambda/4) (\Phi\Phi)^2,$$

егд

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu + \tilde{e} [W_\mu, W_\nu];$$

$$D_\mu \Phi^a = \partial_\mu \Phi^a + \tilde{e} [W_\mu, \Phi] = \partial_\mu \Phi^a + \tilde{e} \varepsilon_{abc} W_\mu^b \Phi^c.$$

Выбор констант $\lambda > 0$ и $-\beta^2 < 0$ соответствует системам с ненулевым вакуумным средним. Напомним, стандартные обозначения и соглашения, принятые в теории поля: по повторяющимся индексам подразумевается суммирование; \tilde{e} — здесь константа связи для янг-миллсовских полей $\tilde{e} = 2e$, где e — электрический заряд; a, b, c — изотопические; μ, ν — пространственные индексы.

У уравнений движения, определяемых лагранжианом \mathcal{L} ,

¹ Любопытная деталь. Авторам этих работ А. М. Полякову и Г. Хоофту исполнилось в 1974 г., так же как и П. Дираку в 1931 г., 29 лет. В 1986 г. А. М. Поляков за работы по топологии калибровочных полей удостоился медали Дирака, учрежденной в 1985 г.

² Теории монополей посвящена обширная литература. Доступным для неспециалистов является цикл лекций С. Коулмена [4]. Вместе с дополнением переводчика [5] лекции Коулмена дают достаточно полное представление о современном физическом статусе проблемы монополей.

существует классическое вакуумное решение:

$$\varphi(x) = (\beta/\sqrt{\lambda}) \hat{e}_3, \quad W_\mu \equiv 0. \quad (i)$$

Здесь \hat{e}_3 — единичный вектор в изопространстве, направленный вдоль третьей оси (оси z). Это классическое решение уравнений движения с ненулевым вакуумным средним полевых операторов, соответствующее минимуму потенциала U . Однако у системы существуют и другие стационарные решения, порождаемые локальными минимумами $u(\psi)$, — локальные вакуумы. Они имеют следующий вид при $|x| \rightarrow \infty$:

$$\varphi^a(x) \rightarrow (\beta/\sqrt{\lambda}) (\hat{x})^a, \quad W_\mu^a(x) \rightarrow \varepsilon_{\mu ab} (\hat{x})^b / (\tilde{e} |x|^2). \quad (ii)$$

Здесь \hat{x} — единичный вектор в координатном пространстве $x \in R^3$; $\varepsilon_{\mu ab}$ — антисимметрический тензор ($a, b, \mu = 1, 2, 3, \varepsilon_{0ab} = 0$). Так как решение (ii) сферически симметрично и существует изоморфизм между изотопическими и пространственными вращениями, то можно не различать пространственные и изотопические индексы.

Можно показать, что уравнения, порожденные лагранжианом \mathcal{L} , имеют гладкие решения с асимптотикой (ii) и получить оценку энергии таких локально вакуумных решений: $E \sim \beta/\tilde{e}\sqrt{\lambda}$. Основания для связи решения (ii) с монополями Дирака кроются в следующем рассуждении. Определим, следуя Хоофту [2], магнитное поле $B(x)$:

$$B_{\mu\nu} = \varphi^a F_{\mu\nu}^a - (1/\tilde{e} |\varphi|^3) \varepsilon_{abc} \varphi^a (D_\mu \varphi^b) (D_\nu \varphi^c). \quad (iii)$$

Эта формула получается из простых соображений. Направим хиггсовское поле строго по третьей оси: $\varphi = |\varphi| (0, 0, 1)$. Тогда формула (iii) превратится в

$$B_{\mu\nu} = F_{\mu\nu}^3.$$

Поле $B_{\mu\nu}$ удовлетворяет уравнению Максвелла всюду, кроме точки $\varphi^a = 0$. С полем φ можно связать безмассовую частицу, отождествляемую с фотоном. Поле $B_{\mu\nu}$ в (iii) является калибровочно инвариантной величиной и соответствует полю $B(x)$ при произвольном направлении хиггсовского вектора. Для решения Хоофта—Полякова (ii) имеем

$$\varphi^a F_{\mu\nu}^a = - (1/\tilde{e} r^3) \varepsilon_{\mu\nu a} \hat{x}^a, \quad r = |x|,$$

$$D_\mu \varphi^a = \partial_\mu \varphi^a + \tilde{e} \varepsilon_{abc} W_\mu^b \varphi^c = 0,$$

и, следовательно:

$$\bar{B}_{\mu\nu} = - (1/\tilde{e} r^3) \varepsilon_{\mu\nu a} \hat{x}^a.$$

По полю $B_{\mu\nu}$, как обычно, определим магнитное поле $B_\gamma = = 1/2 \varepsilon_{\gamma\mu\nu} B_{\mu\nu}$. Здесь $B_a = \hat{x}^a / (\tilde{e} r^3)$. Полный поток радиального поля B_a равен $4\pi/\tilde{e}$, т. е. магнитный заряд $g = 1/\tilde{e}$ и условие квантования $\tilde{e}g = 1$.

Чуть позже мы выведем правило квантования монополя Дирака, а сейчас сделаем несколько замечаний о калибровочном монополе Хоофта—Полякова. Как видим, решение Хоофта—Полякова весьма своеобразно связано с монополем Дирака. В отличие от монополя Дирака оно является всюду регулярным решением. Несколько условно можно сказать, что монополь Дирака запрятан в монополе Хоофта—Полякова. Действительно, если использовать терминологию Полякова, назвавшего свое решение «ежом», то при попытке «причесать» ежа специальным образом, т. е. перейти от решения типа (i) к решению типа (ii) , возникает «нить» Дирака. Эти решения имеют разные топологические инварианты и поэтому не могут быть переведены гладким (непрерывным) калибровочным преобразованием друг в друга. Разрывное калибровочное преобразование имеет сингулярность типа «нити» Дирака. Другого физического смысла «нити» не имеет.

Возвращаясь к работам Хоофта и Полякова, надо подчеркнуть, что в их основе лежали совершенно другие идеи, не связанные непосредственно с монополем Дирака. Оба исследователя пытались обобщить одномерные вихревые решения (вихри Абрикосова) в сверхпроводимости, найденные незадолго до них в двумерной полевой модели $\lambda\phi^4$ Нильсеном и Ольсеном [6], на трехмерный случай. Это обстоятельство подчеркивает даже тот внешний факт, что в ссылках на литературу у обоих (авторов) первым номером стоит именно работа [6]. Соответствующие исследования стимулировались энергичными поисками моделей единых теорий слабых и электромагнитных взаимодействий. Подходящим кандидатом считалась модель Джорджи—Глешоу, описываемая лагранжианом \mathcal{L} . В дальнейшем эта модель была отброшена, так как она не давала правильных физических предсказаний. Всеобщее признание получила модель Вайнберга—Салама, блестяще подтвержденная на эксперименте (открытие нейтральных токов было одним из решающих подтверждений теории Вайнберга—Салама). Однако, несомненно, полезный byproduct исследований модели Джорджи—Глешоу — нахождение калибровочного монополя.

Существование калибровочных монополей является чисто топологическим следствием выбора калибровочной группы полевых уравнений и приводит к важным физическим результатам; например, чисто топологически можно показать, что в модели Вайнберга—Салама монополей нет [7]. Отметим, что по топологическим причинам не существует решений типа (ii) без хиггсовских полей ($\varphi=0$) в теориях с компактной калибровочной группой G (например, $SU(2)$). Анзац типа (ii) , но с $\varphi=0$ ранее уже рассматривался Ву и Янгом [8], но устойчивых решений такого типа нет.

Заканчивая краткий обзор результатов работ [2, 3], подчеркнем, что соотношение между калибровочным монополем и монополем Дирака, включая анализ условий квантования, было четко проанализировано Хоофтом. Поляков больше интересовался не-

обычными свойствами найденного им решения («ежа») как возможного кандидата на роль тяжелой частицы с большой массой $M \sim M_w/\bar{e}^2$. (Здесь M_w — масса W -бозона.) На связь «ежа» с монополю Дирака обратил его внимание Л. Б. Окунь.

Работы Хоофта и Полякова оказали исключительное влияние на развитие теории поля и во многом определили ее связь с современной топологией.

Практически сразу же было показано [7, 9], что существование монополей в конкретной модели определяется нетривиальностью второй гомотопической группы $\pi_2(G/H)$, где G — калибровочная группа лагранжиана теории; H — стационарная подгруппа соответствующего вакуумного вектора.

Этот простой критерий оказался весьма удобным орудием для классификации монополей в различных моделях теории поля. Особенно существенны модели большого объединения. Одновременно стала ясна эффективность аппарата алгебраической топологии, в частности гомотопических групп.

Вернемся к монополю Дирака. Новые идеи в теории поля позволили по-новому взглянуть на старую проблему.

В работе 1975 г. [10] Ву и Янг предложили конструкцию монополя Дирака, основанную на теории расслоений. Это, в частности, привело к отказу от введения гипотетической нити Дирака.

Суть работы Ву и Янга состоит в следующем. Поместим магнитный заряд в начало координат 0. Поле магнитного монополя A_μ определено всюду в R^3 , кроме 0. Рассмотрим поле A_μ на сфере S^2 , окружающей 0. Вектор A_μ удобно задать на S^2 в сферических координатах (r, θ, φ) .

Выберем покрытие сферы S^2 двумя дисками D_a и D_b , пересекающимися по полоске экватора.

В диске D_a ($0 \leq \theta < \pi$):

$$(A_r)_a = (A_\theta)_a = 0, \quad A_\varphi = g(1 - \cos \theta) / \sin \theta, \quad r = 1. \quad (\text{iv})$$

В диске D_b ($0 < \theta \leq \pi$):

$$(A_r)_b = (A_\theta)_b = 0, \quad A_\varphi = -g(1 + \cos \theta) / \sin \theta. \quad (\text{v})$$

Вектор-потенциал $(A_\mu)_a$ не имеет сингулярностей в диске D_a , а вектор-потенциал $(A_\mu)_b$ не имеет сингулярностей в диске D_b .

Ротор каждого из потенциалов определяет магнитное поле монополя. В области $D_a \cap D_b \neq \emptyset$ разность вектор-потенциалов

$$(A_\mu)_a - (A_\mu)_b = 2g / \sin \theta = \partial_\mu \alpha, \quad \alpha = 2g\varphi. \quad (\text{vi})$$

Рассмотрим теперь взаимодействие электрона с монополю. Волновые функции электрона в поле монополя удовлетворяют уравнению Шрёдингера:

$$[1/2 m (p - eA_a)^2 + V] \psi_a = E \psi_a \quad \text{в } D_a,$$

$$[1/2 m (p - eA_b)^2 + V] \psi_b = E \psi_b \quad \text{в } D_b.$$

Здесь ψ_a и ψ_b — волновые функции, определенные в области D_a и D_b соответственно. Так как волновые функции определяют физические состояния с точностью до фазового множителя, то из калибровочной инвариантности следует

$$\psi_a = \exp(i\epsilon\alpha) \psi_b, \quad (\text{vii})$$

и α определяется из.

Рассмотрим волновую функцию электрона ψ в области $D_a \cap D_b$. Пусть γ — экваториальная окружность, лежащая в $D_a \cap D_b$. Волновая функция ψ , получающаяся ограничением либо ψ_a , либо ψ_b , должна быть однозначной функцией при обходе по замкнутому контуру γ :

$$\psi_a = \exp[i2eg(\varphi + 2\pi)] \psi_b = \exp(i2eg\varphi) \exp(i4\pi eg) \psi_b,$$

откуда $eg = n/2$ ($\hbar = 1$, n — целое). (viii)

Такое условие квантования фазы волновой функции и называется условием квантования монополя Дирака.

Из этой формулы в предположении существования кванта магнитного заряда следует квантование электрического заряда $e = n/(2g)$.

Посмотрим теперь на монополь Дирака с точки зрения теории расслоенных пространств. Задание монополя с помощью вектор-потенциала A — это задание одномерного расслоения $E_{\mathbb{C}}$ над сферой S^2 , ассоциированного к главному расслоению над S^2 со слоем $S^1 \sim U(1)$. С расслоением $E_{\mathbb{C}}$ связано пространство волновых функций, а точнее, пространство сечений волновых функций $\{\psi\}$ над S^2 . Преобразование волновых функций, заданных на областях D_a и D_b по формуле (vii), задают сечения. Утверждение о несуществовании глобальных сечений (в физической интерпретации несуществование единой волновой функции)³ означает, что возникающие расслоения нетривиальны.

Перейдем теперь к главным расслоениям над S^2 со слоем S^1 . Целое число n , входящее в условие квантования Дирака (viii), характеризует соответствующее расслоение. Хорошо известно, что все главные расслоения над сферой S^2 со слоем S^1 классифицируются группой $\pi_1(S^1) = \mathbb{Z}$. Эта группа совпадает с $H^2(S^2, \mathbb{Z})$, первым классом Черна c_1 . Таким образом, с каждым квантовым числом n ассоциируется свой монополь. Совсем несложно и весьма поучительно построить пространство расслоения, характеризующего монополь с зарядом n .

Сделаем небольшое отступление, напомним основной результат Хопфа. Его работа посвящена решению следующей задачи. Как устроены гомотопически неэквивалентные отображения трехмерной сферы S^3 в S^2 .

³ Это свойство волновых функций в задаче о монополе отмечал Дирак еще в работе 1931 г.

Хопф доказал, что все такие отображения $f: S^3 \rightarrow S^2$ классифицируются с помощью коммутативной диаграммы:

$$\begin{array}{ccc} S^3 & \xrightarrow{p} & S^3 \\ h \downarrow & & \tilde{h} \downarrow \\ S^2 & \xrightarrow{\tilde{p}} & S^2 \end{array} \quad p \circ \tilde{h} = h \circ \tilde{p}.$$

При этом отображения p и \tilde{p} порождаются степенными отображениями (например, если сферу S^2 представить как комплексную плоскость \mathbb{C} , пополненную точкой ∞ , то $\tilde{p}: S^2 \rightarrow S^2 \ni z \rightarrow z^n$, где $z \in \mathbb{C}$), а отображение h определяется следующей конструкцией.

Реализуем S^3 как пару комплексных чисел (z_1, z_2) с условием $|z_1|^2 + |z_2|^2 = 1$. Рассмотрим отображение

$$h: (z_1, z_2) \rightarrow z_1/z_2 = w \in \mathbb{C}.$$

Продолжив отображение $(z_1, z_2) \rightarrow \bar{w}$ на пополнение \mathbb{C} бесконечноудаленной точкой $\infty (z_2=0)$, получим отображение $S^3 \rightarrow S^2$ (сферу Римана). Легко видеть, что точки $(e^{i\varphi}z_1, e^{i\psi}z_2)$ переходят в ту же точку w . Поэтому слоем отображения $h: S^3 \rightarrow S^2$ будет окружность S^1 .

Отображение h было построено Хопфом и называется отображением Хопфа, а тройка (S^3, h, S^2) — расслоением Хопфа. Степень отображения Хопфа равна единице.

С расслоением Хопфа $h: S^3 \rightarrow S^2$ и его обобщениями

$$h: S^{2n-1} \xrightarrow{S^{n-1}} S^n$$

связано решение классических проблем математики.

Не уклоняясь от основной темы, упомянем лишь о следующей задаче.

Существует всего три расслоения Хопфа со степенью единица.

$$S^{15} \rightarrow S^8, \quad S^7 \rightarrow S^4, \quad S^3 \rightarrow S^2$$

Из решения этой задачи вытекают многочисленные следствия. Например, решение классической задачи о нахождении всех алгебр с делением, доказательство формулы Радона—Гурвица о числе максимально линейно-независимых векторных полей на сфере и т. п.

Доказательство этой теоремы было получено Дж. Адамсом в 1961 г. и потребовало привлечения всей мощи современной математики (K -теория, когомологические операции и т. п.) [11].

Вернемся к монополю Дирака и покажем, что монополю с зарядом k соответствует определенное расслоение, получаемое из расслоения Хопфа факторизацией по конечной группе \mathbb{Z}_k . Этот результат легко следует из общей теории расслоенных пространств.

Простая явная конструкция была предложена в [12]. Рассмотрим действие циклической группы \mathbb{Z}_k на S^3 :

$$g : S^3 \rightarrow S^3, \quad g \in \mathbb{Z}_k,$$

$$g : (z_1, z_2) \rightarrow (\exp(2\pi i/k) z_1, \exp(2\pi i/k) z_2).$$

Фактор-пространство S^3/\mathbb{Z}_k называется линзой L_k . В свою очередь, на пространстве L_k действует калибровочная группа $U(1)$. Группа $U(1)$ действует на L_k без неподвижных точек, поэтому пространство L_k является пространством главного расслоения над S^2 со слоем S^1 и топологическим зарядом $q=k$. Координатными преобразованиями для расслоения $L_k \rightarrow S^2$ будут функции $\exp(ik\varphi)$.

Сформулируем окончательный результат.

Предложение. Пространствами расслоения (пространствами Ву—Янга) для монополя с квантовым числом (топологическим зарядом) k будут линзы L_k .

Занятия монополем Дирака неожиданно столкнули Янга с концепцией расслоенных пространств, в которой он с удивлением обнаружил готовый аппарат для теории калибровочных полей. С этой точки зрения калибровочные поля являются связностями в расслоении, определяемом калибровочной группой. История этого знакомства изложена им в докладе [13].

Ему же принадлежит и другое высказывание, касающееся расслоенных пространств, но представляющее значительно более широкий интерес для понимания взаимоотношений математики и физики. Оно содержится в его докладе в Академии Линчей (Рим, 1980 г.).

«В то время как концепция расслоенных пространств хорошо известна математикам около 40 лет⁴, вплоть до сегодняшнего дня она не приветствуется большинством физиков. В этом нет ничего странного, так как нам присуща естественная тенденция сопротивляться новым математическим формализмам, пока эти формализмы не смогут сделать нечто, недоступное другим методам. Я хотел бы сказать, что такая тенденция в основе своей здоровая, так как большинство математических формулировок в лучшем случае украшение, скорее скрывающее, чем высвечивающее физические идеи. Но иногда математическая формулировка существенна для истинного понимания некоторых физических концепций. Так произошло при изложении теории калибровочных полей на языке расслоенных пространств» [24. С. 1].

Если под таким углом зрения посмотреть на развитие теории монополей в последнем десятилетии, то мы увидим, что объединение математических и физических стилей и методов дало исключительные плоды. Необходимо, конечно, расширить обсуждаемую тему, включив найденные в 1975 г. классические решения чистых янг—миллсовских полей — инстантоны [14], струны и суперструны [15, 16].

⁴ Янг относит введение расслоенных пространств к работе Хопфа 1931 г. [1].

Применяемая математика включает рафинированные результаты алгебраической топологии и геометрии, используя идеи, развитые в самые последние годы, вплоть до работ по арифметическим поверхностям и гипотезе Морделла [17].

Несомненно, что работы по классификации инстантонов и монополей [18—20] методами алгебраической геометрии выдерживают проверку критерием Янга.

Неожиданным оказалось и встречное движение. Новые физические концепции и методы помогли в чисто математических проблемах. Ярким конкретным примером служит использование теории инстантонов для построения различных гладких структур на четырехмерных многообразиях [21].

Обнаружение топологических структур типа монополей, инстантонов, струн и т. п. в самых различных областях физики, включая космологию и физику конденсированного состояния, является одной из наиболее ярких примет в физике последнего десятилетия.

Я ограничусь констатацией этого факта, ибо вряд ли беглое перечисление недавних достижений заменит читателю удовольствие от непосредственного знакомства с оригинальными трудами.

Заканчивая эти отрывочные заметки, позволю себе пофантазировать в духе известной статьи Ф. Дайсона «Упущенные возможности» [22] на тему, что бы произошло, столкнись работы Хопфа и Дирака не спустя 40, а, допустим, через 5—10 или 20 лет. В более широком плане этот вопрос можно отнести к физике и топологии в целом.

Дирак — физик с редкой комбинацией математического и физического стиля мышления. Для него было характерным сочетание физической интуиции и интереса к новым формальным конструкциям. Он любил подчеркивать, что новая физика требует и новой математики. Любопытно, однако, что из всех разделов математики, на которые он возлагал надежды, ему меньше всего приходило на ум, что будущее развитие теории, начатое его работой по монополю, окажется связанным с топологией.

Чем же объясняется этот просчет великого физика? Я думаю, что объяснение кроется в методе работы Дирака. Он всегда исходил из физической сути задачи и уж затем возводил на этой основе математический фундамент. Так он пришел к теории спиноров, δ -функции и другим математическим открытиям. Новая математика возникла у него из потребностей физики, а не была формально извлечена из современных математических трудов.

Работа по монополю возникла у Дирака в связи с проблемой квантования электрического заряда и больше связана с электродинамикой, чем с геометрическими аспектами теории поля.

Отсутствие адекватных физических идей не позволили Дираку увидеть возможности применений топологии.

Действительно, только после работ по калибровочным полям в комбинации с идеей спонтанного нарушения симметрии тополо-

гия смогла занять достойное место в физике частиц. Вот одна из возможных причин невнимания Дирака к топологии.

Интуиция даже великого ученого не безгранична и в каком-то смысле экономна. Она позволяет находить возможность для крупных, но реальных продвижений, не занимаясь маниловщиной.

Поэтому рассматривая влияние топологических идей на продвижение исследований в физике частиц, хочется сказать, что до включения монополей в контекст теории калибровочных полей оно было незначительным. Я, конечно, не касаюсь связей в отдельных задачах, например в исследовании аналитических свойств амплитуд. Речь идет о концептуальных связях, аналогичных роли теории групп, гильбертовых пространств и т. п.

Если следовать пунктуально мысли Дайсона, то надо оценить возможное влияние работы Дирака на развитие топологии. Ведь с монополю Дирака связаны такие важные понятия, как характеристические классы (расслоение Хопфа соответствует первому классу Черна) и многозначные функционалы.

Теория характеристических классов была значительно продвинута в 30—40-х годах в работах Х. Уитни, С. Черна, Э. Штифеля, Л. С. Понтрягина без всякой апелляции к физическим моделям. Теория многозначных функционалов появилась совсем недавно, и монополю Дирака является одним из интересных примеров таких функционалов. В этой теории, развитой в работах П. Весса, Б. Зумино, С. П. Новикова, Е. Виттена и ряда других математиков и физиков, снова встретились монополю Дирака и расслоение Хопфа [23]. Часть математических результатов идейно могла бы проявиться значительно раньше, если бы математики знали о работе Дирака. В этом смысле монополю Дирака служит еще одним примером для коллекции «упущенных возможностей» Дайсона. Но в начале 50-х годов не то что математики, но мало кто из физиков глубоко понимал работу Дирака.

Период слабых контактов чистых математиков и физиков сейчас сменился довольно тесным взаимодействием тех и других. Польза таких контактов как для физики, так и для математики несомненна, и примерам здесь несть числа. И если сравнивать происходящее с каким-нибудь историческим периодом прошлого, то более интенсивное общение мне представляется в XIX в. и ранее, когда часто математик и физик выступали в одном лице.

Сейчас этого симбиоза не наблюдается. Здесь мне видится некоторая опасность.

Если в недавнем прошлом в мире физиков существовала тенденция недооценивать роль математики, то сейчас довольно значительно та точка зрения, что физических идей вполне достаточно и осталось применить или в крайнем случае развить ряд математических конструкций, чтобы решить все проблемы современной теории. Несмотря на всю соблазнительность такой мысли для математика, развитие науки в большей степени следует по другому пути — пути, проложенному великими физиками прошлого. И необходимая поддержка на этом пути — труды Поля Дирака.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hopf H.* Über die Abbildungen der dreidimensionalen Sphäre auf die Kugelfläche // *Math. Ann.* 1931. Bd. 104. S. 637–665.
2. *’t Hooft G.* Magnetic monopoles in unified gauge theories // *Nucl. Phys. B.* 1974. Vol. 79. P. 276–284.
3. *Поляков А. М.* Спектр частиц в квантовой теории поля // *Письма в ЖЭТФ.* 1974. Т. 20. С. 430–432.
4. *Коулмен С.* Магнитный монополяр пятьдесят лет спустя // *УФН.* 1984. Т. 144. С. 277–340.
5. *Долгов А. Д.* Магнитный монополяр после юбилея // Там же. С. 341–346.
6. *Nielsen H. B., Olesen P.* Vortex-line models for dual strings // *Nucl. Phys. B.* 1973. Vol. 61. P. 45–61.
7. *Monastyrsky M. I., Perelomov A. M.* Some remarks on monopoles in gauge field theories: Prepr. ИТЕФ-56. Moscow, 1974.
8. *Wu T. T., Yang C. N.* Some solutions of the classical isotopic gauge field equation // *Properties of matter under unusual conditions*/Ed. H. Mark, S. Fernbach. N. Y.: Wiley, 1969. P. 349–354.
9. *Тюпкин Ю. С., Фатеев В. А., Шварц А. С.* О существовании тяжелых частиц в калибровочных теориях поля // *Письма в ЖЭТФ.* 1975. Т. 21. С. 91–93.
10. *Wu T. T., Yang C. N.* Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of gauge fields // *Phys. Rev. D.* 1975. Vol. 12. P. 3845–3857.
11. *Adams J. F.* Vector fields on sphere // *Ann. Math.* 1962. Vol. 75. P. 603–632.
12. *Соловьев М. А.* О пространствах расслоений Ву–Янга // *Письма в ЖЭТФ.* 1982. Т. 35. С. 540–542.
13. *Yang C. N.* Magnetic monopoles, gauge fields and fiber bundles: Prepr. ITP SB 14. N. Y., 1977. 20 p
14. *Belavin A. A., Polyakov A. M., Schwartz A. S., Tyupkin Yu. S.* Pseudoparticle solutions of the Yang–Mills equations // *Phys. Lett. B.* 1975. Vol. 59, N 1. P. 85–87.
15. *Green M., Schwartz J., Witten E.* Superstring theory. Cambridge: Univ. press, 1987. Vol. 1. 350 p.; Vol. 2. 400 p.
16. *Polyakov A. M.* Gauge fields and strings. L.: Harwood Acad. press, 1987. 312 p.
17. *Faltings G.* Calculus on arithmetic surfaces // *Ann. Math.* 1984. Vol. 119. P. 387–424.
18. *Atiyah M. F., Hitchin N. J., Drinfeld V. G., Manin Yu. I.* Construction of instantons // *Phys. Lett. A.* 1978. Vol. 65. P. 185–187.
19. *Atiyah M. F., Ward R. S.* Instantons and Algebraic geometry // *Commun. Math. Phys.* 1977. Vol. 55. P. 117–124.
20. *Nahm W.* All self-dual Multimonopoles for arbitrary gauge groups: Prepr. CERN TH-3172. Geneva, 1981.
21. *Donaldson S.* An applications of gauge theory to four dimensional topology // *J. Different. Geom.* 1983. Vol. 18. P. 279–315.
22. *Dyson F. J.* Missed opportunities // *Bull. Amer. Math. Soc.* 1972. Vol. 78. P. 635.– Рус. пер.: *Дайсон Ф. Дж.* Упущенные возможности // УМН. 1980. Т. 35. С. 171–191.
23. *Новиков С. П.* Гамильтонов формализм и многозначный аналог теории Морса // УМН. 1982. Т. 37. С. 3–49.
24. *Yang C. N.* Magnetic monopole in fiber bundle: Prepr. CERN № 2886. Geneva, 1980. 5 p.

ПОЛЬ ДИРАК И КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ *

Данная статья представляет собой краткий исторический обзор вклада Поля Дирака в космологию. Поскольку первая фаза дираковской космологии (1937—1938) рассматривалась детально в работе [1], я сконцентрирую внимание на более поздних фазах, особенно на работах Дирака 1973—1983 гг.

Астрофизика и космология в карьере Дирака

До 1937 г. Дирак проявлял очень малый интерес к астрофизике и связанным с ней областям. За исключением юношеской работы по звездным атмосферам, выполненной под руководством Милна (6), у него не было публикаций по астрофизическим вопросам. Он предпочитал фундаментальные проблемы и рассматривал астрофизику так же, как и физику твердого тела, в качестве прикладной, а не фундаментальной физики. В начале 30-х годов он говорил Чандрасекару, что в астрономии его более привлекает космология и общая теория относительности, чем собственно астрофизика [2]. Дирак знал о космологических решениях общей теории относительности из учебника Эддингтона по теории относительности и заинтересовался космологией в ходе бесед с Г. П. Робертсоном, американским пионером релятивистской космологии.

Впервые Дирак встретился с Робертсоном весной 1927 г. в Геттингене; Робертсон, который был на год младше Дирака, в 1925—1927 гг. стажировался в Мюнхене и Геттингене, а в 1929 г. был назначен доцентом в Принстоне. Позже, когда Дирак провел несколько семестров в Принстоне, они хорошо узнали друг друга.

В 1930 г. космология была в состоянии революции. Было признано, что статические космологические модели Эйнштейна и де Ситтера не соответствуют наблюдательным данным, полученным Хабблом и другими и свидетельствовавшим о расширении Вселенной. В 1927 г. аббат Жорж Леметр и несколькими годами раньше Александр Фридман показали, что общая теория относительности содержит решения, соответствующие расширяющейся Вселенной. Теория расширяющейся Вселенной была замечена только тогда, когда в 1930 г. статья Леметра была переведена на английский язык и его теория была принята Эддингтоном. В 1930—1934 гг. концепция расширяющейся Вселенной развивалась, становясь новой парадигмой космологии.

* *Helge Kragh. Paul Dirac and cosmological theory* / Пер. Г. Е. Горелика.

Леметр был аспирантом Эддингтона в Кембридже с октября 1923 г. до июля 1924 г. Поэтому он, должно быть, встречал Дирака, но не познакомился с застенчивым юным студентом. Это случилось только позже, вероятно в связи с докладом Леметра в «клубе Капицы» в апреле 1933 г. о «Гипотезе начального состояния», т. е. о его идее происхождения Вселенной из некоего радиоактивного суператома в результате «Большого взрыва» [3]. В дальнейшем Дирак неоднократно встречался с Леметром и хорошо его узнал. Дирак высоко ценил научный вклад Леметра и в 1968 г., после смерти Леметра, написал биографический обзор его работ для Ватиканской академии наук. Аббат Леметр с 1960 г. был президентом этой академии, в которую Дирак был избран в 1961 г. В своем обзоре Дирак вспоминал: «Однажды, когда я беседовал с Леметром об этом вопросе (о космической эволюции) и был захвачен величиим картины, которую он нам нарисовал, я сказал ему, что космология кажется мне ветвью науки, находящейся ближе всего к религии. Однако Леметр не согласился со мной. Подумав, он назвал психологию ближайшей к религии» (126а).

Дираковская космология построена на идее расширяющейся Вселенной и включает в себя гипотезу Леметра о происхождении Вселенной в далеком прошлом. По духу и содержанию космология Дирака была в долгу у теорий Эддингтона и Милна, его прежних учителей.

Гипотеза больших чисел, 1937—1938 гг.

Дирак опубликовал свою космологическую идею в короткой заметке в «Nature» в феврале 1937 г. В этой заметке он обсуждал значение следующих безразмерных комбинаций, составленных из констант природы:

$$\tau_0 = \frac{t_0}{e^2/(mc^3)} \simeq 2 \cdot 10^{39},$$

$$\gamma = \frac{e^2}{GmM} \simeq 7 \cdot 10^{38},$$

$$\mu = \frac{\rho(c/H)^3}{M} \simeq 10^{78}.$$

Символ t_0 обозначает возраст Вселенной, который Дирак принимал равным $2 \cdot 10^9$ лет, и τ_0 — соответствующий возраст, выраженный в атомных единицах времени ($e^2/(mc^3)$ — это время, за которое свет проходит классический радиус электрона). Символ ρ обозначает среднюю плотность вещества во Вселенной, оценивавшуюся примерно в $5 \cdot 10^{-31}$ г/см³; H — константа Хаббла, для которой Дирак принимал значение $2 \cdot 10^{-17}$ с⁻¹, а c/H — хаббловское расстояние, соответствующее нынешнему радиусу Вселенной. В духе Эддингтона Дирак заявил, что регулярность, проявляющаяся в приведенных безразмерных числах, не является чисто случайной. Но в то время как Эддингтон полагал, что эти

константы не зависят от космического расширения, Дирак рассматривал эти величины зависящими от истории Вселенной (50):

«Вышеупомянутые большие числа следует рассматривать не как константы, а как простые функции данной эпохи, выраженной в атомных единицах. Мы можем принять в качестве общего принципа, что все большие числа порядка 10^{39} , 10^{78} , ..., появляющиеся в общей физической теории, должны быть с точностью до простых численных коэффициентов равны t , t^2 , ..., где t — данная эпоха, выраженная в атомных единицах».

Позже Дирак предпочитал называть это предположение Гипотезой больших чисел (далее ГБЧ). В 1938 г. он назвал его Фундаментальным принципом, подчеркивая, что его следует понимать как постулат о взаимосвязи между любыми двумя большими безразмерными числами, включающими τ_0 или нет. «Любые два из очень больших безразмерных чисел, встречающихся в Природе, связаны простым математическим соотношением с коэффициентами порядка единицы» (54).

Дирак вывел три далеко идущих следствия из ГБЧ. В своей заметке 1937 г. он сосредоточился на приблизительном совпадении времени эпохи, выраженного в атомных единицах, и отношения электрической силы к гравитационной между двумя элементарными зарядами. Это совпадение пленило Дирака, который, следуя Эддингтону, счел, что оно означает «некую глубокую связь в Природе между космологией и атомной теорией». Из ГБЧ следует, что всегда $\gamma(t) = kt$, где k — порядка единицы. Следовательно, если атомные константы e , m и M не меняются со временем, а Дирак предположил это, то «константа» гравитации должна уменьшаться:

$$G \sim t^{-1}. \quad (i)$$

Гравитационная константа, зависящая от времени, была ранее введена Милном и в том же 1937 г. была независимо предложена Самбурским [4, 5]. Но дираковский результат отличался от милновского, так же как и от результата Самбурского.

Другое следствие ГБЧ, которое Дирак указал в 1937 г., выводилось из того факта, что

$$\tau_0^2 = (10^{39})^2 = 10^{78} = \mu.$$

Согласно Дираку, отсюда следует, что число нуклонов во Вселенной пропорционально квадрату времени:

$$N \sim t^2. \quad (ii)$$

Космическое расширение Дирак включил в свою теорию в 1938 г., когда представил более разработанный ее вариант. Он рассуждал следующим образом. Пусть космическое расстояние между удаляющимися галактиками R измеряется в атомных единицах, скажем $e^2/(mc^2)$, так что становится большим безразмерным числом. В модели расширяющейся Вселенной константа Хаббла $H = \dot{R}/R$. Поскольку в атомных единицах $H = 10^{-39}$ и сред-

няя плотность Вселенной (тоже в атомных единицах) оценивалась как 10^{-44} , то, «допуская, что неточность вызвана неопределенностью, с которой используются атомные единицы, мы видим, что средняя плотность вещества того же порядка малости, что и константа Хаббла» (54. С. 203).

Используя ГБЧ для соответствующих величин, Дирак нашёл

$$\rho^{-1} = kH^{-1} = kR/\dot{R}.$$

Далее, предполагая, что вещество во Вселенной сохраняется, так что $\rho \sim R^{-3}$, он получил $R^3 = kR/\dot{R}$, откуда

$$R(t) \sim t^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{iii})$$

Это уравнение установило дираковский закон удаления галактик, из которого следовало, что возраст Вселенной должен быть связан с хаббловской константой соотношением

$$t_0 = \frac{1}{2} H^{-1}. \quad (\text{iv})$$

К 1938 г. космологическая теория Дирака, таким образом, дала три эмпирически проверяемых следствия, порождаемых уравнениями (i), (ii) и (iv). Все они были проблематичны. Поскольку общая теория относительности предполагает гравитационную константу не зависящей от времени, уравнение (i) вступает в конфликт с теорией Эйнштейна. Дирак, конечно, признавал это несоответствие, в особенности потому, что хотел сформулировать свою теорию в терминах общей теории относительности. В 1938 г. он намекнул, что это несоответствие, возможно, удастся разрешить, предполагая две различные метрики, одну для атомных явлений и другую для механических, однако это предположение он не разработал.

Что касается уравнения (iv), оно встречалось с той же трудностью относительно временного масштаба, что и большинство других вариантов расширяющейся Вселенной, приводя к абсурдно малой величине для возраста Вселенной. Дираковская величина $t = 7 \cdot 10^8$ лет противоречила надежным измерениям, основанным на радиоактивном распаде в минералах, и была в конфликте с оценкой астрономов для возраста галактик порядка 10^{12} лет. Дирак заметил эту трудность, но не считал ее угрожающей. Дираковское уравнение (ii), предложенное в статье 1937 г., предсказывало спонтанное и ускоряющееся рождение вещества во Вселенной. В более разработанной теории 1938 г., однако, он потребовал сохранения вещества, чтобы вывести уравнения (iii) и (iv). Тем самым он должен был изменить мнение в этом критическом пункте и в 1938 г. пришел к выводу, что «спонтанное рождение или уничтожение вещества так трудно согласовать с нашими нынешними теоретическими идеями в физике, что его не стоит рассматривать» (54. С. 204).

Принятие сохранения вещества в 1938 г. дало Дираку модель Вселенной, не очень отличающуюся от милновской. Дирак сделал вывод, что Вселенная, подчиняющаяся сохранению вещества и ГБЧ,

должна быть бесконечной и плоской в пространстве. Он далее заключил, что космологическая константа Λ должна быть равна нулю; иначе, аргументировал он, можно было бы из $1/\Lambda$ образовать очень большую безразмерную константу, что противоречило бы ГБЧ.

Интерлюдия

В 1939 г. Дирак оставил космологию и вернулся к квантовой теории. Только после 33-летнего перерыва он взялся за свою старую теорию. Между тем она вызвала интерес Йордана, который с 1937 г. занялся программой исследований, в большой мере опирающейся на взгляды Дирака и Эддингтона [6, 7]. Однако теории Йордана, подобно дираковской, остались вне главного направления космологии. Теории типа Эддингтона—Дирака—Йордана не согласовывались с позитивистским климатом, господствовавшим в науке 50-х годов. Большинство ученых и философов ощущали, что ГБЧ и связанные с ней нумерологические аргументы не имеют никакого веса и не могут рассматриваться серьезной наукой [8].

В 50-е годы значительной популярности достигла теория стационарной Вселенной, предложенная в 1948 г. Эта теория, развитая Хойлом, Бонди и Голдом, включала в себя непрерывное рождение вещества и этим была внешне похожа на космологию Дирака—Йордана. Однако в теории стационарной Вселенной гравитационная константа была постоянной. Более того, теория стационарной Вселенной несовместима с дираковской космологией, поскольку совершенный космологический принцип, лежащий в основе теории стационарной Вселенной, очевидным образом не оставляет места для ГБЧ.

Помимо философских возражений против теории Дирака и ее несовместимости со стационарной космологией, она казалась неприемлемой также по эмпирическим соображениям. В 1938 г. теория Дирака не находилась в очевидном контрасте с известными фактами (за исключением трудности с временной шкалой, общей для большинства моделей расширяющейся Вселенной), но после войны эмпирические доводы были выдвинуты Эдвардом Теллером [10]. Теллеровский аргумент был широко принят и сделал теорию Дирака еще менее приемлемой, чем раньше. Свой довод Теллер основывал на предположении, что температура поверхности Земли T прямо зависит от потока энергии, получаемого от Солнца. Астрофизическими рассуждениями он вывел зависимость T от времени в предположении, что гравитационная константа изменяется согласно теории Дирака. Теллер оценил, что для времени 200 или 300 млн лет назад дираковская теория предписывает слишком высокую температуру, чтобы ее могла выдержать земная жизнь. Поскольку геологические данные показывают, что в действительности жизнь существует на Земле по крайней мере 500 млн лет, Теллер счел себя вправе заключить, что гипотеза Ди-

рака находится в конфликте с твердо установленным научным знанием. Однако он осознавал, что его довод, возможно, переупрощен и что теория Дирака могла бы избежать этой трудности. «Таким образом, наше обсуждение не может полностью опровергнуть идею Дирака. Эта идея по своей природе достаточно неопределенная, и ее трудно опровергнуть» [10. С. 802]. Несмотря на осторожный теллеровский вывод, его статья часто цитировалась как опровержение теории Дирака.

Джордж Гамов, ядерный физик, ставший астрофизиком и космологом, увлекся дираковскими нумерологическими аргументами. Он был убежден, что фундаментальные константы и образованные из них безразмерные комбинации имеют глубокое значение в теоретической физике. С 1948 г. и до смерти в 1968 г. Гамов опубликовал несколько статей, в которых развивал «космонумерологию» в духе Эддингтона, Дирака и Йордана [11. С. 1—14]. Однако несмотря на привлекательность для него Гипотезы больших чисел, он чувствовал, что ГБЧ противоречит наблюдательным данным. В 1967 г. он вновь рассмотрел теллеровское возражение и добавил вывод, что фактическое состояние нашего Солнца как звезды главной последовательности несовместимо с уменьшающейся гравитационной константой. Потому что, аргументировал он, в соответствии с этой гипотезой светимость Солнца в прошлом была бы столь велика, что к нашему времени Солнце превратилось бы в красный гигант. Несмотря на это возражение, «было бы очень жаль расстаться с такой привлекательной идеей, как предположение Дирака» [12].

В 50-е и 60-е годы несколько физиков пытались включить космологии, подобные дираковской, в релятивистские рамки с помощью модификации полевых уравнений общей теории относительности. К таким попыткам относились теории Йордана, Гилберта и Фирца (ссылки см.: [13]). В 1961 г. Роберт Дикке со своим учеником Брансом предложили другую теорию, которая приводила к переменной константе гравитации [14]. В отличие от ранних теорий теорию Дикке—Бранса много обсуждали астрономы и космологи. В ней гравитационная константа уменьшалась со временем, но предсказанное изменение не соответствовало дираковскому $G \sim 1/t$. Хотя Дикке и Бранс не принимали теорию Дирака, они считали ее интересной и стоящей критики. Интерес Дикке к космологии Дирака можно усмотреть в его речи, произнесенной в 1958 г. Обсуждая теорию Дирака, он заметил, что эта теория основана на логической ловушке, а именно на предположении, что «сейчас», эпоха человека, выбрано случайно.

Используя «антропный» аргумент, Дикке заявил, что это предположение не обосновано и что нынешнюю величину хаббловского времени (и другие большие числа) следует понимать не как результат ГБЧ, а как следствие того, что существуют обитаемые планеты с человеческой жизнью [15]. В письме 1961 г. в «Nature» он повторил эти аргументы [16], что побудило Дирака дать короткий ответ (111): «По предположению Дикке обитаемые плане-

ты могли бы существовать только ограниченный период времени. Согласно моему предположению они могли бы существовать неопределенно долго в будущем и жизнь не обязана когда-то кончиться. Нет решающих аргументов, чтобы выбрать между этими предположениями. Я предпочитаю то, которое допускает возможность бесконечной жизни».

Дираковский ответ был первой публикацией по космологии за 22 года, и должно было пройти еще 11 лет до того, как он возобновил серьезную работу в этой области. За это время космология Большого взрыва установилась как новая мощная парадигма, в то время как теории стационарной Вселенной перестали рассматриваться как серьезная альтернатива. Главной причиной такого изменения было открытие в 1965 г. трехградусного фонового излучения, которое сразу же было интерпретировано как остаток Большого взрыва. Новые измерения константы Хаббла также устранили трудность космологии Большого взрыва, связанную с временной шкалой и состоящую в том, что предсказанный возраст Вселенной был меньше возраста звезд. В 60-е годы предположительное значение $1/H$ было около 10^{10} лет, эта величина делала аргумент Теллера против гипотезы Дирака менее убедительным. 70-е годы были подходящим временем для анализа космологических теорий, включая уменьшение гравитационной константы. Дирак вернулся к космологии в серии статей, в которых он изменил некоторые свои взгляды, но в целом сохранил верность программе ГБЧ, выдвинутой в его первоначальной теории.

Возврат к космологии, 1972—1974 гг.

В краткой статье 1972 г., посвященной памяти Джорджа Гамова, Дирак дал намек на свои новые идеи: «После смерти Гамова я перепроверил аргументы Теллера и обнаружил в них возможный дефект. Чтобы вычислить удаление Земли от Солнца, Теллер предположил сохранение углового момента Земли на ее орбите вокруг Солнца. Делать такое предположение естественно, но не обязательно» (140. С. 58). Дирак намекал на изменение ньютоновских законов, вызванное полным использованием принципа двух временных масштабов. Он надеялся, что этот принцип вместе с возрождением старой теории Вейля смог бы примирить ГБЧ-космологию с эйнштейновской теорией гравитации.

Дирак был очарован единой теорией поля, которую Герман Вейль опубликовал впервые в 1918 г. [17]. В этой теории Вейль дал чисто геометрическую интерпретацию электромагнетизма и гравитации, основываясь на геометрии более общей, чем риманова геометрия общей теории относительности. Вейль указал, что интегрируемость длин в римановой геометрии была лишь «пережитком» евклидовой геометрии и что следовало бы работать с геометрией, в которой есть только параллельный перенос и сравнимость длин в точке. Ему удалось выразить внутреннюю метрику пространства через две величины, которые он интерпретировал соот-

ветственно как эйнштейновские гравитационные потенциалы и электромагнитные потенциалы.

Интерес Дирака к вейлевской единой теории восходит к его студенческим дням в Кембридже, где он ее внимательно изучал. Однако в соответствии со взглядами большинства в то время он решил, что эта теория, хотя и привлекательна математически, физически необоснована [18]. Но Дирак оставался очарованным математической структурой этой теории и вообще подходом Вейля к физике, в котором он видел близость со своими собственными методологическими идеалами. Эстетическая основа дираковского одобрения теории Вейля сделалась ясной в 1973 г., когда он вернулся к космологии. Умершую вейлевскую теорию Дирак характеризовал как «очень красивый синтез электромагнитного поля и гравитационного», как теорию, которая «остаётся непревзойденной по своей простоте и красоте» (142. С. 53). Что касается его новой космологической теории и ее опоры в вейлевской геометрии, Дирак признавал, что она нуждается в эмпирической поддержке. Однако эмпирическая поддержка была не так уж важна для Дирака, который для принятия теории Вейля придавал особое значение методологическим причинам.

В полном соответствии с общей его философией физики, наиболее полно выраженной в предисловии к «Принципам квантовой механики» и в статье 1931 г. о монополе, Дирак писал (143. С. 418): «Одним из фундаментальных принципов Природы кажется требование, чтобы уравнения, выражающие основные законы, были бы инвариантны относительно как можно более широкой группы преобразований... Переход к вейлевской геометрии — это следующий шаг в направлении расширения группы преобразований, лежащей в основе физических законов. Сейчас надо рассматривать преобразования калибровки так же, как преобразования криволинейных координат, и надо, чтобы физические законы были инвариантны относительно всех этих преобразований, что накладывает строгие условия на них».

Дирак ощущал необходимость найти способ устранить возражения против прекрасной вейлевской теории и соединить ее с другой идеей огромной красоты — с Гипотезой больших чисел. Дираковский способ примирения заключался в разработке идеи двух метрик, которую он уже высказывал в предварительной форме в 1938 г.: «Имеются две важные меры расстояния и времени, одна для атомных явлений, другая для обычных механических явлений, включая относящиеся к общей теории относительности» (54. С. 206). Хотя Дирак перенял то, что иногда называл «гипотезой Милна», он развивал это положение собственным путем и получил результаты, весьма отличающиеся от милновских. В дираковской версии этой гипотезы одна метрика (ds_E) относится к эйнштейновской теории гравитации, к планетным и родственным механическим задачам; другая метрика (ds_A) относится к квантовым явлениям и всевозможным атомным величинам, включая функционирование обычного лабораторного оборудования. В «эйн-

штейновских единицах» временной масштаб — это динамическое время τ , и в этой шкале гравитационная константа — истинная постоянная; в «атомных единицах», с другой стороны, G зависит от времени в соответствии с ГБЧ:

$$G(\tau) = \text{const} \quad \text{и} \quad G(t) = 1/t.$$

Дирак указал, что мир можно описывать двумя способами в зависимости от того, используются эйнштейновские либо атомные единицы. Например, в то время как в атомных единицах Вселенная расширялась из ее начального состояния при $t=0$, в эйнштейновских единицах она представляет собой замкнутую статическую Вселенную, в которой красное смещение должно объясняться не удалением галактик, а каким-то другим механизмом. То же самое утверждал в 1935 г. Милн.

Дирак развил свою новую теорию в 1973—1975 гг., поселившись во Флориде. Он остался верен фундаменту своей первоначальной теории 1937 г. — Гипотезе больших чисел. Рассматривая ограничения, которые накладывает ГБЧ на расширение Вселенной, Дирак заключил, что осциллирующие модели Вселенной исключаются. Они содержат максимальный размер Вселенной, и поскольку это соответствует очень большому числу, не зависящему от времени, Дирак счел осциллирующие модели противоречащими ГБЧ. Тогда как в 1938 г. Дирак нашел закон расширения, согласно которому R изменяется как t^n , теперь он доказывал, что любое замедляющееся расширение запрещено Гипотезой больших чисел. Его аргумент: предположим, что $R \sim t^n$; если $n < 1$, то в прошлом имеется момент времени, когда темп расширения превышает скорость света. Если, например, $n = 3/4$, это произошло бы при $t = 10^{27}$ атомных единиц, и «эта выделенная эпоха характеризуется большим числом, не таким большим, как 10^{39} , но все-таки слишком большим, чтобы его допускала наша Гипотеза больших чисел» [142. С. 46].

Оставив в 1938 г. непрерывное рождение вещества, в 1973 г. Дирак вернулся к своим взглядам 1937 г. Кроме того, что постулированное непрерывное рождение вещества — это, возможно, новый тип радиоактивности, Дираку было нечего сказать о его механизме. Он различал два типа рождения, которые называл аддитивным (+) и мультипликативным (×). В предположении +-рождения нуклоны рождаются равномерно во всем пространстве; ×-рождение означает, что новое вещество рождается там, где оно уже существует, пропорционально имеющемуся количеству. В обоих случаях Дирак нашел, что вещество возрастает как t^2 , т. е. пришел к тому же самому, что и в 1937 г. Далее, он обнаружил, что соотношение между эйнштейновской и атомной метриками зависит от типа рождения.

В случае +-рождения

$$ds_A = t^{-1} ds_E \quad \text{и} \quad \tau \sim 1/2 t^2,$$

при ×-рождении

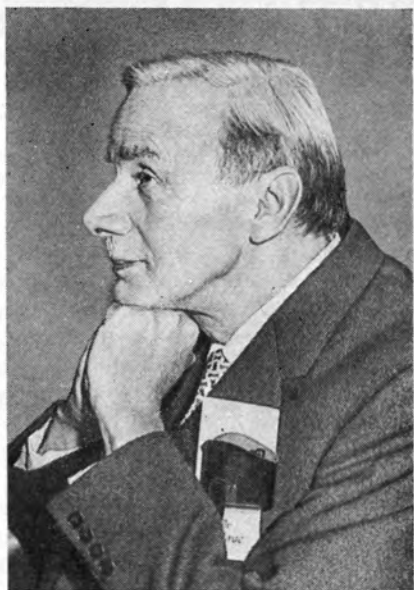
$$ds_A = t ds_E \quad \text{и} \quad \tau \sim \ln t.$$

Дирак выводит, что при $+$ -рождении Земля приближается к Солнцу, тогда как при \times -рождении — удаляется.

В 1973—1975 гг. Дирак колебался, какую из альтернатив следует предпочесть. Осознавая несовместимость обеих со стандартной физикой, он думал, что \times -гипотеза находится в менее серьезном конфликте с эйнштейновской теорией гравитации. Дирак, конечно, хотел установить согласие своей теории с общей теорией относительности и для этого готов был на отчаянные средства. Чтобы компенсировать рождение вещества, он предположил дополнительное рождение отрицательной массы (148. С. 443; ранее отрицательную массу в космологию вводил Бонди [19]). Не было никаких независимых подтверждений этой

гипотезы ad hoc. Более того, чтобы избежать сильной несогласованности с данными наблюдений, Дирак должен был предположить, что гипотетические атомы отрицательной массы не имеют никаких физических проявлений, т. е. в принципе ненаблюдаемы. Дирак также обосновывал, что величина космологической константы связана с принимаемым типом рождения; аддитивное рождение возможно только при $\Lambda=0$, а ненулевая Λ соответствует мультипликативному рождению. Напомним, что в 1938 г. Дирак доказывал совместимость с ГБЧ только нулевой космологической постоянной; таким образом, дираковский аргумент 1938 г. приводил бы к $+$ -рождению, в 70-е годы такой вывод уже не действовал.

В эйнштейновской метрике массы больших тел, подобных Солнцу, постоянны. Но тогда, согласно Дираку, чтобы компенсировать \times -рождение, масса нуклона должна изменяться, как t^{-2} (тогда как в атомных единицах эта величина постоянна). Так как $e^2/(GMm) \sim t$, элементарный электрический заряд в эйнштейновских единицах должен меняться, как $t^{-1/2}$. Поскольку постоянную тонкой структуры Дирак считал истинной постоянной в обеих метриках, постоянная Планка должна меняться, как t^{-3} . Предполагая далее, что \times -рождение относится также к фотонам, Дирак полагал, что число фотонов в пучке света будет расти, как t^2 , что дает увеличение светимости удаленных звезд. Видя спекулятивность своей теории, Дирак все же был убежден, что она содержит существенный элемент истины. Он указывал, что теллеровские



П. Дирак на встрече
Нобелевских лауреатов в Линдау

возражения 1948 г. утрачивают силу: если $G \sim t^{-1}$ сочетается с $M \sim t^2$ и $\tau \sim t$, формулы Теллера дадут намного более медленное измерение температуры Земли, которое уже не представляет серьезных проблем для существования жизни в геологическом прошлом.

Дираковская космология в 70-е годы

В 1973 г. космическое фоновое излучение, распределенное изотропно и соответствующее черному телу с температурой 3 К, признавалось решающим фактом, с которым должны согласовываться космологические модели. В стандартной космологии Большого взрыва в трехградусном излучении видят остатки первичного отрыва излучения от вещества. Первоначальное излучение в процессе расширения остается чернотельным, только его температура уменьшается с возрастанием радиуса Вселенной. Дирак сознавал, что его космологическую теорию нелегко примирить с трехградусным излучением: если фотоны непрерывно рождаются, теперешнее существование чернотельного излучения — это просто случайное следствие того факта, что нам пришлось жить в эру, когда постепенное почернение излучения привело форму его распределения к планковской.

Дирак осознавал, что предположение о таком совпадении не удовлетворительно, но не мог предложить лучшего объяснения. Он ощущал оправданность своей теории в том, что она обещала возродить старую теорию Вейля. Главное возражение против вейлевской теории состояло в том, что атомные часы измеряют время абсолютным способом и, следовательно, дают абсолютную метрику; а тогда нет проблемы в сравнении длин векторов с помощью параллельного переноса, о которой говорил Вейль. Но, согласно Дираку, вейлевская теория оперирует с эйнштейновской метрикой и к ней неприменимы аргументы, основанные на атомной метрике. Даже если ds_A остается инвариантной при переносе по замкнутому контуру, ds_E таковой не будет. «Нам следовало бы вновь ввести теорию Вейля. Она так прекрасна и дает такой ясный путь к объединению дальнедействующих сил. И здесь в действительности нет конфликта с атомными идеями, когда имеются два ds » (146. С. 8).

Космологическая теория Дирака не получила большой поддержки, что не удивительно, учитывая ее необычность и спекулятивный характер. Однако несколько исследователей более молодого поколения приняли сущность теории Дирака и развивали ее в различных направлениях [13, 20–22]. Сам Дирак принимал очень малое участие в этих работах. Будучи духовным отцом субпарадигмы в космологии, он никогда не стремился основать соответствующую школу.

Возврат к сохранению вещества, 1978—1984 гг.

Дирак продолжал размышлять о космологии своим собственным путем. В 1978 г. на симпозиуме в Талахасси, он вновь вернулся к сохранению вещества: «С предположением о непрерывном рождении вещества я работал много лет, но теперь вижу трудности в согласовании его с разнообразными наблюдениями и полагаю, что от него следует отказаться» (167. С. 170). Поскольку Дирак еще верил в ГБЧ, он должен был сохранить соотношение $N \sim t^2$. Но он интерпретировал это соотношение по-новому, как означающее просто «непрерывное увеличение количества наблюдаемого вещества», а не подлинное рождение вещества. Такую интерпретацию можно было бы легко примирить с сохранением вещества: галактики на границе видимой Вселенной удаляются со скоростью, например, $c/2$; хотя в новой дираковской космологии Вселенная бесконечна, можно говорить о сфере радиуса $R_m \approx ct$, соответствующего радиусу видимой Вселенной.

В этой части Вселенной средняя плотность вещества $\rho = N/R_m^3 \approx N/(ct)^3$, где N — число нуклонов в видимой Вселенной — имеет порядок 10^{78} . Если N будет изменяться, как t^2 , то ρ должна изменяться, как $1/t$. При сохранении вещества плотность пропорциональна R^{-3} , где R — расстояние между двумя удаляющимися галактиками. Отсюда следуют соотношения

$$R \sim t^{1/3} \text{ и } dR/dt \sim t^{-2/3}.$$

Это был возврат к модели 1938 г., но теперь соотношение $N \sim t^2$ воспринималось как увеличение числа галактик в видимой Вселенной. В эйнштейновских единицах найденное Дираком расширение пропорционально $t^{2/3}$; это совпадает с законом расширения в космологической модели, предложенной Эйнштейном и де Ситтером в 1932 г. Дирак был вполне удовлетворен этим и утверждал, что «единственная космологическая модель, согласующаяся с ГБЧ, это модель Эйнштейна—де Ситтера» (174. С. 9). Напомним, что шестью годами ранее он установил, что любое замедляющееся расширение, включая решение Эйнштейна—де Ситтера, отвергается Гипотезой больших чисел.

Главной причиной, по которой Дирак предложил свой позднейший вариант, было, видимо, стремление справиться с трехградусным излучением. Отказавшись от непрерывного рождения фотонов, ГБЧ-космология больше не находилась в очевидном противоречии с трехградусным излучением. Однако хотя Дирак теперь принимал, что фоновое излучение — это существенный реликт Большого взрыва, он не мог принять стандартное объяснение этого явления. В соответствии со стандартной космологией это излучение — результат исходного отрыва излучения от вещества, произошедшего около 10^{26} атомных единиц времени после Большого взрыва.

Но Дирак возражал: «наличие такого времени отрыва, играю-

щего фундаментальную роль в космологии, противоречило бы ГБЧ» (174. С. 10). Дираковские рассуждения против отрыва имеют такой же характер, как его рассуждения 1973 г. против замедляющихся космологических моделей (которые теперь он принимал). Произвольный элемент теории Дирака иллюстрирует следующий довод в пользу Вселенной Эйнштейна—де Ситтера. Рассмотрим энергию kT , где T — нынешняя температура фонового излучения и k — постоянная Больцмана; если выразить эту энергию в единицах энергии покоя нуклона, получится большое безразмерное число:

$$(mc^2/kT)^3 \simeq 10^{38}.$$

В соответствии с ГБЧ эта величина должна быть пропорциональна времени, и, следовательно, температура должна изменяться, как $t^{-1/3}$, а этот темп охлаждения соответствует эйнштейн—деситтеровскому расширению. Но почему здесь используется масса нуклона, а не, например, электрона? Ответ Дирака: «Если бы мы использовали массу электрона вместо массы протона, то получилось бы маленькое несоответствие, несущественное, имея в виду приблизительный характер ГБЧ» (174. С. 10).

В конечном счете идея двух метрик осталась в последнем варианте теории Дирака, но, чтобы обеспечить сохранение вещества, он был вынужден изменить соотношение между метриками. Согласно Дираку, временные параметры связаны равенством $d\tau = \pm dt$, что совпадает с результатом его теории 1973 г. при $+$ -рождении.

Заключение

Интерес Дирака к космологии возник, когда ему было 35 лет, но стал главным только после 70. Последнюю статью по космологии он опубликовал в 80 лет. В космологии так же, как в квантовой электродинамике, он был аутсайдером, на чьи взгляды совсем не влияли научные моды. Дирака, конечно, очень уважали за его фундаментальный вклад в физику, но его репутация основывалась прежде всего на работах по квантовой теории. В космологии и астрофизике он всегда был аутсайдером, и ему не удалось создать успешные теории, сравнимые с теориями в квантовой механике. Было бы справедливо сказать, что астрофизики не относились к нему всерьез. Его самоизоляция и спекулятивная природа его теорий были не единственными причинами для этого. ГБЧ-космологии не доставало наблюдательной поддержки, и в некоторых отношениях ее трудно примирить с успешно действующей стандартной космологией Большого взрыва. К тому же, часто изменяя взгляды (например, на рождение вещества), Дирак вероятно, еще более ослаблял привлекательность своей теории. По-видимому, путь, избранный Дираком в космологии, был тупиковым, но, быть может, отвергать его теорию еще слишком рано. Не исключено, что историки будущего будут смотреть на нее в совсем ином свете, чем мы сегодня.

1. *Kragh H.* Cosmo-physics in the thirties: towards a history of Dirac cosmology // *Hist. Stud. Phys. Sci.* 1982. Vol. 13. P. 69–108.
2. *Chandrasekhar S.* A chapter in the astrophysicist's view of the Universe // *The physicist's conception of nature.* Dordrecht: Reidel, 1973. P. 34–44.
3. *Lemaitre J.* Lecture delivered to the Kapitza Club on 25 April 1933 // *Kapitza Club minute book.* Churchill College Archive.
4. *Milne E.* *Relativity, gravitation and world structure.* Oxford: Clarendon, 1935. VIII+365 p.
5. *Sambursky S.* *Static universe and nebular red shift* // *Phys. Rev.* 1937. Vol. 52. P. 335–338.
6. *Jordan P.* *Bemerkungen zur Kosmologie* // *Ann. Phys.* 1939. Bd. 36. S. 64–70.
7. *Jordan P.* *Schwerkraft und Weltall.* Braunschweig: Vieweg, 1952. 207 S.
8. *Jordan P.* *The expanding earth.* N. Y.: Pergamon press, 1971. XV+202 p.
9. *Yourgrau W.* *Some problems concerning fundamental constants in physics* // *Current issues in the philosophy of science.* N. Y.: Holt, Rinehart and Winston, 1961. P. 319–347.
10. *Teller E.* *On the change of physical constants* // *Phys. Rev.* 1948. Vol. 73. P. 801–802.
11. *Alpher R. A., Herman R.* *Reflections on «Big Bang» Cosmology* // *Cosmology, fusion and other matters: George Gamow mem. vol. L.: Hilger, 1972.* P. 1–14.
12. *Gamow G.* *Electricity, gravity and cosmology* // *Phys. Rev. Lett.* 1967. Vol. 19. P. 760.
13. *Wesson P.* *Cosmology and geophysics.* Bristol: Hilger, 1978. 240 p.
14. *Brans C., Dicke R.* *Machs principle and a relativistic theory of gravitation* // *Phys. Rev.* 1961. Vol. 124. P. 925–935.
15. *Dicke R.* *Gravitation – an enigma* // *Amer. Sci.* 1959. Vol. 47. P. 25–40.
16. *Dicke R.* *Diracs cosmology and Machs principle* // *Nature.* 1961. Vol. 192. P. 440–441.
17. *Weyl H.* *Gravitation und Elektrizität* // *Sitzungsb preuss. Akad. Wiss.* 1918. S. 465–480.
18. *Interview with Dirac of 1964* // *Arch. Hist. Quant. Phys. Copenhagen.*
19. *Bondi H.* *Negative mass in general relativity* // *Rev. Mod. Phys.* 1957. Vol. 29. P. 423–428.
20. *Canuto V.* *Dirac cosmology* // *J. Astrophys.* 1977. Vol. 211. P. 342–356.
21. *Roxburgh I.* *Large number hypothesis and continuous creation cosmologies* // *Nature.* 1977. Vol. 268. P. 504–507.
22. *Adams P.* *Large number hypothesis. 1. Classical formalism* // *Intern. J. Theor. Phys.* 1982. Vol. 21. P. 607–632.

КОСМОЛОГИЯ ДИРАКА В ИСТОРИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКОМ КОНТЕКСТЕ

(к статье Х. Крага)

Вряд ли кто-нибудь из физиков, занимающихся космологией, относится сейчас всерьез к космологическим идеям Дирака. Само выражение «космология Дирака» может употребляться только условно — слишком неупорядочена совокупность соответствующих построений. Надеяться, что эти идеи Дирака осветят будущее физической науки, оснований практически нет. Но прошедшие события, история фундаментальной физики 30-х годов в лучах этого необычного источника света становятся видны лучше. Поэтому для историка «космология Дирака» — феномен, несомненно заслуживающий внимания.

В статье Х. Крага подробно (иногда даже слишком подробно) описаны сами космологические построения Дирака. Но при этом остались не отмечены некоторые важные историко-методологические обстоятельства.

Пожалуй, первое чувство, которое возникает при знакомстве с космологическими статьями Дирака (особенн 70-х годов), — это недоумение, смешанное с жалостью к великому физика, который в одиночестве упрямо строит теорию из элементов, не стыкующихся один с другим и рассыпающихся в руках, а физики при этом вежливо не обращают внимания на его усилия. Однако полезней взглянуть на эту ситуацию, помня о психологии научного творчества и о том, что к старости черты личности обычно усугубляются. Тут можно вспомнить и другого великого физика, который последние десятилетия своей жизни стремился к поставленной цели не менее упорно и не придавал значения равнодушию коллег, — это Эйнштейн. И тогда в упрямой самоизоляции двух великих ученых мы опознаем силу духа и способность к интеллектуальному одиночеству, без которых были бы невозможны их великие достижения первой половины жизни.

В космологии Дирака легко увидеть важные черты его методологии. Во-первых, это ставка на «угадывание» правильной математической структуры, последовательное разворачивание которой должно дать описание Природы. В фундаменте методологии Дирака лежало убеждение, что «книга Природы написана на языке математики» и что действительно красивая математическая структура должна получить физическое воплощение. С этим естественно связать веру Дирака в красивую вейлевскую геометрию и его стремление непрерывно согласовывать свои построения с ОТО (основанной на красивой математике). Во-вторых, теоретический максимализм Дирака не мог оставить его равнодушным

к безразмерным «большим числам», безразмерность которых, с одной стороны, идеальна для математической теории, а с другой — сама их величина требует какого-то необычного объяснения.

В статье Крага не отмечены также важные историко-научные обстоятельства, предшествовавшие и сопутствующие космологическим идеям Дирака. А без учета этих обстоятельств (обычно опускаемых при изложении идей Дирака [1]) космологические построения Дирака выглядят совсем уж чужеродными и искусственными, не связанными с организмом физики кровеносными сосудами. Случайным — для истории *физики* — кажется и время их рождения.

Оба исходных для дираковской космологии элемента — идея «переменной константы» и «совпадение больших чисел» — имели к 1937 г. любопытные предыстории.

Биографию идеи переменной константы можно было бы начать с представления о переменной скорости света, которое Эйнштейн пытался использовать при построении релятивистской теории тяготения. Однако к 30-м годам этот эпизод вряд ли мог сохранить какое-то значение: некрасивую идею заслоняло величественно-прекрасное здание ОТО, да к тому же прошло уже много времени.

Гораздо большее значение могла иметь встреча Дирака с идеей переменной константы, притом в космологическом контексте, встреча, которая должна была произойти в 1933 г. в Ленинграде. Здесь, на 1-й Всесоюзной ядерной конференции в один день с Дираком сделал доклад М. П. Бронштейн. Доклад Бронштейна назывался «Космологические проблемы», и в нем, судя по статье Бронштейна 1933 г. [2], фигурировала переменная константа — космологическая константа Λ , которая в ОТО принципиально постоянна. Переменная Λ появилась у Бронштейна в результате его попытки совместить боровскую гипотезу несохранения энергии с космологией расширяющейся Вселенной (подробником в [3]). Дирак был хорошо знаком с Бронштейном (переводчиком двух изданий главной книги Дирака 1932 и 1937 гг.), и их общение на космологические темы было вполне вероятно.

Второй элемент, фундаментальный для космологии Дирака, — совпадение больших чисел, исходя из которого Дирак выдвинул свою Гипотезу больших чисел. И сейчас, и для Дирака в 1937 г. совпадение больших чисел, представляемое в виде

$$e^2/(Gm^2) = mc^4/(He^2),$$

где H — параметр Хаббла — выглядит как эмпирическое совпадение, которое не могло появиться до открытия закона Хаббла в 1929 г. Тем не менее совпадение больших чисел появилось на 10 лет раньше, в 1919 г., во второй работе Вейля по единой теории среди многих теоретических домыслов (см.: [4]).

И наконец, о моменте рождения дираковской космологии. Этот момент тоже не случаен. В середине 30-х годов Дирак, один из создателей квантовой электродинамики, сильно разочаровался в тогдашней квантовой теории поля с ее неустраняемыми бесконеч-

ностями. Ярким проявлением этого разочарования была заметка Дирака 1936 г., в которой он под воздействием сомнительных опытов Шэнкланда легко отказался от закона сохранения энергии, а вместе с ним и от тогдашней квантовой теории поля. В такой обстановке «разброда и шатаний» экстравагантная идея Дирака имела, конечно, больше шансов на появление, чем в спокойные времена уверенного поступательного развития теории.

Космологические построения Дирака сами по себе не оставили следа в современной космологии, но совпадение больших чисел, прочитанное Дираком «слева направо»:

$$G \sim H \sim 1/t,$$

будучи прочитано справа налево:

$$t \sim 1/G,$$

стало главным основанием для антропного принципа. Хотя зависимость наблюдателя от породившего его объекта наблюдения обсуждалась еще в 30-е годы в связи с флуктуационной гипотезой Больцмана [5], только количественный характер совпадения больших чисел побудил наполнить его физическим (точнее, астрофизическим) содержанием.

Антропный принцип, появившийся как альтернатива дираковской космологии, претендует на совершенно новый элемент научной картины мира, и уже это побуждает внимательно относиться к его истории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Структура и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975. 735 с.
2. Bronstein M. On expanding Universe // Phys. Ztschr. Sowjetunion. 1933. Bd. 3. S. 73–82.
3. Горелик Г. Е., Френкель В. Я. Матвей Петрович Бронштейн (1906–1938). М.: Наука, 1990. 211 с.
4. Горелик Г. Е. История релятивистской космологии и совпадение больших чисел // Эйнштейновский сборник, 1982–1983. М.: Наука, 1986. С. 302–322.
5. Бронштейн М. П. К вопросу о возможной теории мира как целого // Успехи астрон. наук. 1933. Вып. 3. С. 3–30.

П. А. М. ДИРАК О ВЗАИМОСВЯЗИ ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ *

Особенности взаимодействия физики и математики в XX в.

Достижения П. Дирака в области теоретической физики — отличный пример характерного для XX в. способа взаимосвязи математики и физики. Научная революция в физике, закончившаяся к концу первой трети XX в.¹, отодвинула классическую физику с лежащими в ее основе классико-механической и электромагнитно-полевой программами на второй план. Место «классики» заняла неклассическая физика, управляемая релятивистской и квантовой программами.

Физика XIX в. интенсивно использовала математический метод. Характер взаимосвязи физики и математики в этот период определялся следующими тремя чертами [1, 2]:

явное преобладание классико-механической программы как главной программы синтеза физического знания, что в перспективе означало «математическую» сводимость физики к обыкновенным дифференциальным уравнениям;

широкий спектр феноменологических и полупеноменологических теорий в математическом отношении сводился к различным уравнениям в частных производных (главным образом второго порядка)²;

«инструментальный» характер использования математики, вследствие чего она всегда рассматривалась как нечто только техническое, только вспомогательное.

В XX в. в связи с релятивистской и квантовой перестройкой фундамента физики на передний план в теоретической физике вышли новые математические структуры, резко повысилась структурообразующая и эвристическая роль математики, возникли целые математические стратегии [2, 4, 5]. В процессе «завоевания физики духом математики» (выражение А. Рея, цитированное

¹ Заметим, что самая последняя стадия этой революции была в значительной мере связана с именем Дирака: завершение концептуально-аксиоматической системы квантовой механики (1926–1930 гг.), основы квантовой электродинамики и релятивистская механика электрона (1927–1934 гг.).

² Таким образом, первые две особенности можно объединить в утверждение, что классическая физика с математической точки зрения — это теория дифференциальных уравнений 2-го порядка. Прав был А. Эйнштейн, когда писал, что «система дифференциальных уравнений с частными производными входила в теоретическую физику как служанка, однако постепенно она стала в ней госпожой» [3. С. 137].

* Перепечатана с дополнениями из «Исследования по истории физики и механики». М.: Наука. 1988. С. 88–106.

В. И. Лениным в «Материализме и эмпириокритицизме» [6. С. 325]), особенно остро протекавшем при создании теории относительности, квантовой механики и квантовой теории поля, проявились следующие черты взаимодействия математики и физики, противостоящие тем, которые были присущи классическому периоду:

доминировать стали не дифференциальные уравнения, а геометрические, алгебраические и функционально-аналитические структуры. Физические теории с математической точки зрения стали интерпретироваться как теории инвариантов некоторых групп преобразований (дифференциальные уравнения сохранили свое значение — уравнения движения, уравнения полей, — но их построение, выбор стали определяться новыми геометрическими и функционально-аналитическими структурами);

математика стала рассматриваться не столько в качестве вспомогательного, «счетного» аппарата, сколько как своеобразная библиотека возможных структурных карт и исследовательских программ для построения физических теорий; главной установкой этих программ стало положение об опережающем развитии математического формализма теории (по сравнению с разработкой ее физических аспектов).

Именно в XX в. крайне распространенными среди физиков-теоретиков и математиков стали представления о «предустановленной гармонии» между физикой и математикой (А. Пуанкаре, Г. Минковский, Ф. Клейн, Г. Вейль, А. Эйнштейн), о «непостижимой эффективности математики» в физике (Е. Вигнер и др.) и т. п. [7]. Проиллюстрируем это несколькими высказываниями некоторых из упомянутых физиков и математиков.

(1933) А. Эйнштейн: «Весь предшествующий опыт убеждает нас в том, что природа представляет собой реализацию простейших математически мыслимых элементов. Я убежден, что посредством чисто математических конструкций мы можем найти те понятия и закономерные связи между ними, которые дадут нам ключ к пониманию явлений природы... Опыт остается единственным критерием пригодности математических конструкций физики. Но настоящее творческое начало присуще именно математике» [8. С. 184].

(1933—1934) Л. И. Мандельштам: «Современная теоретическая физика, не скажу — сознательно, но исторически так оно и было, пошла по иному пути, чем классика. Теперь прежде всего стараются угадать математический аппарат, оперирующий с величинами, о которых или о части которых заранее вообще не ясно, что они означают» [9. С. 329].

(1948) Н. Бурбаки: «В своей аксиоматической форме математика представляется скоплением абстрактных форм математических структур, и оказывается (хотя, по существу, и неизвестно, почему), что некоторые аспекты экспериментальной действительности как-будто в результате предопределения укладываются в некоторые из этих форм» [10. С. 258].

(1964) Ф. Дайсон: «Математика для физика это не только инструмент, с помощью которого он может количественно описать любое явление, но и главный источник представлений и принципов, на основе которых зарождаются новые теории» [11. С. 112].

Отметим еще одну, третью особенность взаимодействия физики и математики — это «непостижимая эффективность» аналитической механики в физике. До сих пор самые изощренные теоретические построения в физике (не говоря уже о релятивистских и квантовых теориях 10—30-х годов) опираются на понятия и структуры, сформировавшиеся в аналитической механике XVIII—XIX вв., такие, как действие, лагранжиан, гамильтониан, вариационные принципы и т. д. [12].

«Сначала... уравнения...»

Эти слова принадлежат Дираку. Вот как они звучат в контексте: «Вполне может оказаться, что следующий решающий успех в физике придет именно так: сначала удастся открыть уравнения, и только спустя несколько лет выяснятся физические идеи, лежащие в основе этих уравнений» (117. С. 139 рус. пер.). Многие работы Дирака прекрасно вписываются в отмеченные особенности функционирования математики в неклассической физике. Чтобы в этом убедиться, достаточно обратиться к его q -числовой формулировке квантовой механики, к его квантовомеханической теории преобразований, к работе о магнитном монополе, к его работам по квантовой электродинамике и т. д. Все эти работы были в значительной мере «играми с математическим формализмом теории», «играми с уравнениями». Разумеется, за уравнениями и вообще математикой просматриваются физические идеи (давняя идея магнитного заряда, стремление согласовать уравнения квантовой механики с теорией относительности и т. д.). Но основное «творческое» движение при этом протекало на уровне математических структур физической теории.

Каждый из упомянутых «прорывов» заслуживает специально углубленного анализа. Некоторые из дираковских достижений в той или иной степени уже исследованы историками науки [13—17], и, по их мнению, чуть ли не во всех случаях для Дирака была существенна стратегия «сначала... уравнения».

Мы пойдем по другому пути: а именно, попытаемся изучить программные заявления Дирака, касающиеся проблемы взаимосвязи физики и математики, его рефлексии на собственные работы и работы других теоретиков в разрезе этой взаимосвязи. Важнейшими для нас будут немногочисленные источники, относящиеся к 30-м годам, когда творческая активность Дирака была весьма велика (30, 33, 56). Более второстепенными — его многочисленные работы мемуарного, научно-популярного и философского характера, относящиеся к 60—80-м годам, а также интервью,

которые он давал Т. Куну и Дж. Мехре в 60—70-х годах. Конечно, мы будем опираться и на историко-научные работы, прежде всего Х. Крэга, Дж Мехры, Х. Рехенберга, М. де Марии и Ф. ля Теаны, М. Джеммера и др. [13—18].

Стратегия «сначала... уравнения» особенно четко сформулирована во введении к первой статье Дирака о монополе (1931 г.) (33). Столь общий, почти философский, характер введения к совершенно специальной физико-теоретической статье — случай, можно сказать, уникальный!

Прежде всего Дирак указывает на изменения в самой математике, которые оказались необходимы для разработки неклассических теорий: «Развитие современной физики потребовало такого математического аппарата, который непрерывно расширяет свои основания и становится все более и более абстрактным» (33. С. 60). Вопрос о том, какие же разделы математики вышли в новой физике на передний план, мы обсудим позже.

Дирак далее отмечает сложность теоретических проблем физики и высказывает предположение, что физики могут оказаться «не в силах выработать необходимые новые идеи с помощью прямых попыток сформулировать данные опыта в виде математических соотношений» (33. Р. 60). «Поэтому,— продолжает он,— теоретик будущего воспользуется более косвенным путем». И именно здесь он излагает программу «сначала... уравнения»: «Наиболее действенный способ продвижения вперед, который можно предложить в настоящее время, заключается в том, чтобы используя все возможности чистой математики попытаться усовершенствовать и обобщить математический формализм, лежащий в основе современной теоретической физики, а затем после каждого успеха в этом направлении попробовать использовать новые математические результаты с помощью физических понятий (этот процесс аналогичен предложенному Эддингтоном принципу отождествления)» (33. С. 60)³.

Этот путь Дирак иллюстрирует несколькими примерами. Пер-

³ Как известно, Дирак был в восторге от теории относительности и хотел заниматься ею всерьез. Он находился под сильным влиянием великолепных книг А. С. Эддингтона по теории относительности. Одну из них [19] он читал еще в Бристоле, вторую [20], очевидно, в Кембридже [13]. Эддингтоновский «принцип отождествления» фигурирует именно в «Теории относительности», в главе, посвященной единым теориям поля [20. С. 414—417]. Согласно этому принципу, построение физической теории должно происходить посредством отыскания такой математической (или даже геометрической) структуры, основные величины которой (тензоры, как полагал Эддингтон) можно отождествлять с основными физическими величинами («тензорами, измеряющими физические величины»).

Так, метрика, тензор энергии-импульса и т. п. должны выражаться через фундаментальные математические величины, например тензоры кривизны (если в качестве такой структуры привлекается та или иная четырехмерная риманова или нериманова геометрия). В известной мере таков был путь построения общей теории относительности и единых геометрических теорий поля Вейля, самого Эддингтона и др.

вые два относятся к недавнему героическому прошлому (созданию общей теории относительности и квантовой механики, причем во втором примере он, несомненно, имеет в виду и свои собственные работы): «Неевклидова геометрия и некоммутативная алгебра, которые одно время считались чистой игрой разума и упражнениями для логических размышлений, теперь оказались необходимыми для описания весьма общих закономерностей физического мира» (33. С. 60).

Третий пример — это работа Дирака об отождествлении состояний электрона с отрицательной энергией, неизбежно следующих из релятивистского уравнения электрона (уравнения Дирака), с «антиэлектронами» (предсказание позитрона «на кончике пера»); а четвертая иллюстрация — это предсказание магнитного монополя на основе последовательного развития математического формализма квантовой механики, связанного с калибровочной симметрией: «Существующий формализм квантовой механики, развитый естественным образом без наложения произвольных ограничений, неизбежно приводит к волновым уравнениям, которые имеют единственную интерпретацию — движение электрона в поле одиночного магнитного полюса. Это новое развитие теории *не требует какого-либо изменения формализма*, если использовать абстрактные символы, обозначающие состояние и наблюдаемые, и является просто обобщением тех возможностей, которые дает представление этих абстрактных символов волновыми функциями и матрицами. С этой точки зрения было бы удивительно, если бы Природа не использовала этой возможности» (33. С. 71).

В статье «Соотношение физики и математики» 1939 г. (56) Дирак еще раз подчеркнул продуктивную мощь математики и математического формализма физических теорий в прогрессе физического знания: «Квантовая механика требует введения в физическую теорию новой обширной области чистой математики, области, связанной с некоммутативным законом умножения. Это вслед за новыми геометриями, введенными в физику теорией относительности, указывает на характерную тенденцию, которая, как можно ожидать, будет существенна и в будущем. Можно ожидать, что дальнейший прогресс в области фундаментальной физики будет связан с использованием новых больших областей чистой математики» (56. С. 124).

И спустя тридцать-сорок лет после этого, в 60–80-х годах Дирак, вспоминая 20-е и 30-е годы, по-прежнему высоко оценивал стратегию «сначала... уравнения» в создании неклассической физики и вовсе не считал этот ресурс исчерпанным (127. С. 291–294 рус. пер.; 161. С. 690–691 рус. пер.; 192. С. 677). Например, он говорил в одном из своих докладов в 1977 г.: «Любое существенное продвижение в дальнейшем, как я чувствую, должно воследовать из каких-то коренных перемен в основополагающих уравнениях. Где их надо произвести, я не знаю, но чувствую, что эти изменения будут схожи с теми переменами, которые были сделаны

Гейзенбергом в 1925 г. Возможно, к этим изменениям люди придут совсем не прямым путем. Единственная черта новой теории, в которой можно быть уверенным, заключается в том, что она должна основываться на разумной и красивой математике.

Большая часть моих позднейших исследований была направлена по этому пути — пути попыток отыскания математических идей, которые могли бы помочь в построении лучшей квантовой электродинамики. У меня было несколько идей в этом направлении, но ни одна из них не оказалась очень успешной» (161. С. 690). Таким образом, программа «отыскания математических идей» срабатывала далеко не всегда. Сам Дирак считал, что наибольших успехов он достиг, руководствуясь этой программой, но, как показывает история, «математическая» программа оказывается эффективной, когда за ней стоят новые нетривиальные физические идеи. В случае общей теории относительности — это принцип эквивалентности, в случае квантовой механики — это идеи старой квантовой теории Бора и концепция корпускулярно-волнового дуализма, для релятивистской теории Дирака — вероятностная трактовка волновой функции, уверенность в необходимости релятивистского подхода, концепция спина.

«Возрастающее применение теории преобразований...»

Сам Дирак главным своим достижением считал квантово-механическую теорию преобразований, которая позволила ему разработать последовательную теоретико-инвариантную формулировку квантовой механики⁴. История создания «теории преобразований», в которую наряду с Дираком большой вклад внесли П. Йордан, Ф. Лондон, а также Д. Гильберт (в совместной работе с Л. Нордхеймом и И. фон Нейманом) и особенно фон Нейман, рассмотрена в книге М. Джеммера [18].

Мы уже говорили, что Дирак находился под сильным впечатлением от теории относительности, которая впервые явным образом ввела в фундаментальную физику теоретико-инвариантный подход. С другой стороны (и об этом более подробно будет сказано ниже), ему импонировала гамильтонова формулировка классической механики, прежде всего ее представление в терминах теории канонических преобразований. В своей «теории преобразований», которая легла в основу «Основ квантовой механики» (30), Дирак видел образцовую форму теории и считал, что именно эта форма отвечает дорогим его сердцу традициям Гамильтона и новому стилю мышления, проникающему с помощью теоретико-инвариантного подхода в «закулисную сторону этого мира» (30. С. 6). С точки

⁴ «Мне удалось развить общую теорию преобразований, — вспоминал Дирак, — и это доставило мне большое удовлетворение. Я считаю, что из всех работ, которые я сделал за свою жизнь, именно эта работа принесла мне наибольшее удовлетворение» (161. С. 685).

зрения этого подхода, как писал Дирак в своем предисловии к «Принципам», «все важные свойства мира являются инвариантами этих преобразований (т. е. тех или иных преобразований, лежащих в основе фундаментальных физических теорий.— В. В.) или по крайней мере „почти инвариантами“, т. е. величинами, преобразующимися по очень простым правилам» (30. С. 6). Наблюдаемыми же при этом оказываются отношения этих инвариантов к тем или иным системам отсчета (или соответствующие проекции инвариантных величин на координатные оси или плоскости).

Дирак воспринял обе формы теоретико-инвариантного подхода [21]: пространственно-временную (фундаментальные группы симметрии действуют на пространственно-временном многообразии, например галилей-ньютоновская группа классической механики и группа Пуанкаре специальной теории относительности) и фазовую (группы симметрии действуют на многообразии состояний, например канонические преобразования — автоморфизмы фазового пространства классической механики). Поэтому вслед за А. Пуанкаре, А. Эйнштейном, Г. Минковским и Ф. Клейном он, учитывая еще и опыт квантовой механики, провозгласил теоретико-инвариантную программу дальнейшего развития физики: «Возрастающее применение теории преобразований, которая была применена в теории относительности, а затем и в теории квант, представляет сущность нового метода теоретической физики. Дальнейший прогресс состоит в том, что наши уравнения становятся инвариантными по отношению к все более широким классам преобразований» (30. С. 6).

И в 1939 г. Дирак выделял теорию групп преобразований как такую область математики, которая стала определяющей в теоретической физике XX в. и которая оттеснила на второй план дифференциальные уравнения, игравшие главную роль в математическом аппарате классической физики (56. С. 125). В 60—80-х годах он продолжал сохранять уверенность в особой перспективности теоретико-группового подхода. Так, например, возможное решение трудностей квантовой теории поля он связывал с анализом приводимых представлений группы Лоренца (161. С. 691).

«...Жажда математической красоты...»

В 1939 г. Дирак впервые при обсуждении перспектив развития фундаментальной физики и проблемы взаимосвязи математики и физики использовал понятие «математической красоты» («mathematical beauty»; 56. С. 123). Концепция «математической красоты», по Дираку, крайне проста. Если чистая математика оказывается своеобразным складом возможных структурных форм для описания физической реальности и если при этом опыт построения новых неклассических теорий (и в частности, личный опыт Дирака) показал, что реализуются наиболее мощные и содержательные математические структуры (теория групп, риманова геометрия,

функциональный анализ, некоммутативная алгебра), то естественно предположить, что природа, которую изучает физик, устроена по законам чистой математики. Иначе говоря, природе должно быть присуще «математическое качество» («mathematical quality»).

В классической физике доминировали дифференциальные уравнения, и выбор тех или иных уравнений в значительной мере регулировался «принципом простоты» («principle of simplicity»), во всяком случае если речь шла о фундаментальных теориях. Но простота, как полагает Дирак,— вещь непростая. Что, например, проще с точки зрения математики: ньютоновская теория тяготения или общая теория относительности? Более удобно, более приемлемо для физики говорить не столько о простоте, сколько о математической красоте, понятии, может быть, еще более интуитивном, но зато ясном каждому математику или теоретику. Следующие примеры поясняют ситуацию.

Группа Лоренца в специальной теории относительности — «значительно более прекрасная вещь, чем прежняя группа (т. е. группа Галилея—Ньютона в классической механике.— В. В.), которая фактически с математической точки зрения может рассматриваться как вырожденный случай группы Лоренца» (56. С. 123). Риманова геометрия, лежащая в основе общей теории относительности,— дальнейший шаг в этом же направлении, поскольку локально она устроена как псевдоевклидова геометрия. Таким образом, всякий более общий математический формализм «прекраснее» тех частных схем, которые в него включаются. Значит, трудности теории можно пытаться разрешить на пути поиска нетривиальных обобщений существующего математического аппарата. При этом достигнутая математическая красота не должна утрачиваться. И на этом уровне действует своеобразный вариант принципа соответствия. Говоря о математической красоте квантовой механики, Дирак выражает удовлетворение в том, что она сохраняет все «элегантные черты» («elegant features») классической механики в ее гамильтоновой форме. Более того, квантовой механике удалось придать такую форму (q -числовая формулировка и теория преобразований Дирака—Йордана), в которой эти «элегантные черты» проявились с еще большей силой, чем в аналитической механике.

Здесь же Дирак вводит образ теоретической деятельности, который он затем широко использовал,— это математические игры с уравнениями, с формализмом теории. С помощью этого образа он пытается объяснить принципиальное различие между работой теоретика и математика и по-своему поставить проблемы «непостижимой эффективности математики» в физике (выражение Е. Вигнера [22. С. 182]).

«Ситуацию (т. е. общее и различное в работе математика и физика-теоретика.— В. В.) можно описать, говоря, что математик играет в игру, правила которой он изобретает сам, в то время как физик играет в игру, правила которой определяются Природой, но постепенно становится все более очевидным, что правила, кото-

рые математик считает интересными, — те же самые, которые выбирает Природа» (56. С. 124). Тем самым математически прекрасное сближается с «математически интересным». Значение некоторой области чистой математики оказывается «пропорциональным ее интересу в математике (т. е. тем, насколько она математически интересна.— В. В.)» (56. С. 124). Все же это соответствие выполняется не в полной мере, что подчеркивает и сам Дирак. Например, с математической точки зрения одинаково интересны и n -мерные и четырехмерные псевдоевклидовы и неевклидовы геометрии, но с физической точки зрения последние явно предпочтительнее. Но математика развивается и, возможно, в будущем, как думал Дирак, выяснится и математическая предпочтительность четырехмерности⁵.

Конечно, вопрос о том, какие математические структуры являются математически интересными, а какие нет, едва ли корректны. Во многом тот или иной ответ на него — дело вкуса, интуиции, моды. Например, топологию и теорию множеств в 1939 г. Дирак не считал математически интересными в отличие от проективной и дифференциальной геометрии, теории групп, функционального анализа и теории функций комплексного переменного. Возможно, сейчас он изменил бы свою оценку, по крайней мере в отношении топологии. Ему также не нравились (т. е. он не считал математически интересными) неассоциативные алгебры, которые предлагал использовать в квантовой механике П. Йордан и которые, возможно, уже теперь находят или в ближайшем будущем найдут нетривиальные физические применения. Мы имеем в виду квазигруппы [23. С. 155—159]. Дирак же, руководствуясь стратегией математической красоты, пытался в середине 30-х годов более тесно связать квантовую механику с теорией функций комплексного переменного, но особого успеха не имел (52).

Главные идеи Дирака, касающиеся взаимосвязи физики и математики, — опережающая функция математики, теоретико-инвариантный подход, математическая красота (и математически интересное) и др. — замечательным образом оказываются взаимосвязанными: «Тенденция к объединению математики и физики обеспечивает физика новым мощным методом исследования... методом, который применяется пока не так успешно, но который, наверняка, докажет свое значение в будущем. Этот метод состоит в том, чтобы сначала выбрать такую область математики, которая, как можно надеяться, окажется основой новой теории. В этом выборе в первую очередь следует руководствоваться соображениями математической красоты. Было бы, вероятно, целесообразно отдать предпочтение тем областям математики, в основе которых лежат интересные группы преобразований, так как преобразования играют важную роль в современной физической теории: и теория относительности, и квантовая теория демонстрируют¹ более фундамен-

⁵ С нашей точки зрения, более вероятно обратное, т. е. будет показано, что и n -мерные геометрии имеют существенное физическое значение.

тальное значение преобразований по сравнению с уравнениями. После этого следует развивать математический формализм, одновременно ведя поиски путей естественной физической интерпретации его» (56. С. 125).

Впоследствии, особенно в 60—80-е годы Дирак в своих научно-популярных, мемуарных и методологических статьях, а также в интервью и обзорах чаще всего говорил именно о концепции математической красоты как главном пункте своей методологической установки. Приведем в подтверждение несколько дираковских высказываний этого периода.

(1963) «У теоретической физики есть еще один верный путь развития. Природе присуща та фундаментальная особенность, что самые основные физические законы описываются математической теорией, аппарат которой обладает необыкновенной силой и красотой... Вы спросите: почему природа устроена именно так? На это можно ответить только одно: согласно нашим современным знаниям, природа устроена именно так, а не иначе. Мы должны просто принять это как данное. Наши жалкие математические усилия позволяют пока понять во Вселенной лишь немного. Но развивая все более современные математические методы, мы можем надеяться на лучшее понимание Вселенной» (117. С. 139).

И несколько дальше: «Математические основы квантовой теории разрабатываются многими физиками, которые прилагают усилия для лучшего понимания теории и для придания ей большей силы и большей математической красоты... Вполне может оказаться, что следующий решающий успех в физике придет именно так: сначала удастся открыть уравнения, и только спустя несколько лет выяснятся физические идеи, лежащие в основе этих уравнений. Я убежден, что следует полагаться именно на такой путь, а не на попытки угадать правильную физическую картину» (117, С. 139).

(1968) «По мере роста количества знаний об объекте, когда становится крепче почва под ногами, можно все более переходить к математическому образу действия. При этом побудительным мотивом для теоретика становится жажда математической красоты. Физик-теоретик принимает требование математической красоты как символ веры» (127, С. 292). И в конце этой лекции: «Современная квантовая электродинамика не удовлетворяет строгим стандартам математической красоты, которые можно было бы предъявить к фундаментальной физической теории, и это заставляет подозревать, что основные идеи требуют еще коренного пересмотра» (127. С. 298) (Дирака не удовлетворял перенормировочный способ устранения расходимостей, который он всегда считал математически неэлегантным).

(1972, из интервью с Дж. Мехрой) «Я чувствую, что теория, если она правильна, должна быть красивой (beautiful), так как мы руководствуемся принципом красоты, когда устанавливаем фундаментальные законы. Так, в исследованиях, опирающихся на математику, мы часто руководствуемся требованием матема-

тической красоты. Если уравнения физики некрасивы с математической точки зрения, то это означает, что они несовершенны и что теория ущербна и нуждается в улучшении. Бывают случаи, когда математической красоте должно отдаваться предпочтение (по крайней мере временно) перед согласием с экспериментом... Дело обстоит так, будто Бог создал Вселенную на основе прекрасной математики, и мы сочли разумным предположение, что основные идеи должны выражаться в терминах прекрасной математики» [24. С. 59]. В другом месте этого интервью: «Главная линия моей работы — это как раз игра с уравнениями и поиск того, что она может дать. Вторичное квантование вышло именно из игры с уравнениями... Мне обычно нравится играть с уравнениями, отыскивая математические соотношения, которые, возможно, вовсе не имеют физического смысла» (Цит. по: [24. С. 45]).

(1975) «Записать уравнения Ньютона по-новому Гамильтона побудили лишь соображения математической красоты» (170. С. 12). И несколько далее: «На мысли о том, что волны и частицы связаны между собой, де Бройля натолкнули соображения математической красоты» (170. С. 14).

(1977) «Единственная черта новой теории, в которой можно быть уверенным, заключается в том, что она должна основываться на разумной и красивой математике» (161. С. 690).

(1978) «Я хотел бы подчеркнуть новую точку зрения, которую ввел Эйнштейн и которая состоит в том, что основные уравнения физики должны обладать особой красотой. Эйнштейн ввел эту точку зрения и больше, чем кто-либо другой, подчеркивал важность требования красоты основных уравнений. Вы можете спросить: «Почему уравнения должны обладать особой красотой?» Определенного ответа на этот вопрос мы не можем дать. Мы можем сказать, что это — принцип, который чрезвычайно эффективен, особенно в руках Эйнштейна. Следует просто принять, что Бог так создал мир. Он призвал нас найти математику, которая лежит в основе физики» (185а. С. 23)

(1983) «Физика должна быть основана на *строгой* математике» (192. С. 677).

«Гамильтонов формализм как основа атомной физики»

Безусловно, с начала 20-х годов Дирак восхищался аналитической механикой. Особенно ему импонировала гамильтонова формулировка механики, отвечающая, по его мнению, критерию математической красоты. Вот как он ее оценивал в середине 70-х годов: «Записать уравнения Ньютона по-новому Гамильтона побудили лишь соображения математической красоты... Гамильтон был, по-видимому, наделен каким-то удивительным даром проникать в самую суть — удивительнейшим даром из тех, которыми когда-либо обладал математик. Он нашел для уравнений меха-

ники такую форму записи, значение которой суждено было понять лишь спустя столетие, через много лет после его смерти» (170. С. 12).

Хорошо известно, какую большую роль сыграл гамильтонов формализм классической механики при разработке Дираком q -числовой формулировки квантовой механики. Дирак впоследствии вспоминал: «Я тогда (т. е. в начале сентября 1925 г.— В. В.) находился под таким большим впечатлением от гамильтонова формализма как основы атомной физики, что считал, что любой другой подход не может сравниться с ним» (Цит. по: [24. С. 31]).

Познакомившись с работой Гейзенберга, в которой были заложены основы квантовой механики, он сначала не увидел связи новой теории с гамильтоновым формализмом и отложил ее на некоторое время. Ему стало ясно все значение теории Гейзенберга, когда он усмотрел связь гейзенберговских коммутационных соотношений со скобками Пуассона. Это фактически и было исходным мотивом разработки q -числового варианта квантовой механики. В своей основополагающей статье по квантовой механике он с удовлетворением отмечал, что дело не столько в том, что квантовая механика отменяет законы классической механики, хотя последняя и является в известном смысле предельным случаем первой при $\hbar \rightarrow 0$ (где \hbar — постоянная Планка), сколько в том, что при переходе к микромиру уравнения классической механики обобщаются таким образом, чтобы учесть обнаруженную Гейзенбергом некоммутативность умножения физических величин⁶.

Дираковская «теория преобразований» также находится в органичном соответствии с теорией касательных преобразований классической механики, вписывающейся в гамильтонов формализм. Гамильтонов подход использовался Дираком и в его релятивистской теории электрона, опиравшейся на гамильтониан, линейный по всем четырем компонентам четырехимпульса (20), и в его классических работах по квантовой электродинамике. Лекции по квантовой механике, читанные им в начале 60-х годов, начинаются с лекции, названной «Метод Гамильтона». В ней он объясняет свою приверженность этому методу: «Мне кажется, что при таких подходах (т. е. подходах, альтернативных гамильтонову.— В. В.)

⁶ Об этом в статье он говорит дважды, каждый раз подчеркивая разные аспекты соотношения классической и квантовой механики. Именно гамильтонов формализм привел его к выводу, «что не уравнения классической механики в каком-либо отношении ошибочны, а что требуют модификации математические операции, посредством которых из этих уравнений выводятся физические результаты. Таким образом, вся информация, даваемая классической теорией, может быть использована в новой теории» (8. С. 612 рус. пер.). С другой стороны, «соответствие между квантовой и классической теориями лежит не столько в предельном согласии при $\hbar \rightarrow 0$, сколько в том, что математические операции обеих теорий подчиняются во многих случаях одинаковым законам» (8. С. 618).

всегда будет теряться нечто такое, что можно получить только при использовании гамильтониана или, возможно, некоторого обобщения гамильтониана. Поэтому я придерживаюсь той точки зрения, что гамильтониан действительно очень важен для квантовой теории» (122. С. 9 рус. пер.).

Упомянем еще о двух работах Дирака, тесно связанных с аналитической механикой и послуживших исходными пунктами двух плодотворных направлений в квантовой теории. Первая — это статья 1933 г. «Лагранжиан в квантовой механике» (28), сыгравшая важную роль в генезисе фейнмановского подхода к квантовой механике [25. С. 210—212].

Вторая — это статьи 1950—1951 гг. по обобщению гамильтонова формализма на системы со связями⁷, которое было затем с большим эффектом применено к задачам квантования гравитации и неабелевых калибровочных полей [26. С. 206].

Таким образом, поиски Дираком прекрасных с математической точки зрения обобщений математических формализмов существующих теорий чуть ли не на протяжении всей его жизни направлялись по крайней мере двумя конкретными математическими программами (в дополнение к общей стратегии «математического прорыва» и «математической красоты»): теоретико-групповой, или теоретико-инвариантной, и ориентацией на казавшуюся ему «математически прекрасной» аналитическую механику, прежде всего гамильтонов формализм. При любых обобщениях классики или квантовой теории, с точки зрения «гамильтоновой программы», следует исходить из гамильтоновых формулировок существующих теорий. При этом «математическая красота», присущая гамильтонову подходу, не может уменьшиться. Иначе говоря, ориентация на «гамильтоновость», по мнению Дирака, обеспечивает неубывание «математической красоты» в эволюции физических теорий. О поразительной универсальности и эффективности гамильтонова, или канонического, формализма при решении задач



П. Дирак (50-е годы)

⁷ Достаточно ясно и обстоятельно обобщенная гамильтонова механика Дирака и метод ее квантования были изложены им в цитированных выше лекциях (122).

фундаментального и прикладного естествознания — см. недавнюю монографию Ю. Г. Павленко [27] («непостижимая эффективность» аналитической механики в физике [12]).

«Геометрия... очаровала меня»

На первый взгляд многие из упомянутых достижений Дирака носят абстрактный, явно алгебраический характер («алгебра q -чисел», «теория преобразований», спиноры и т. п.). Это обстоятельство как будто находится в противоречии с неоднократными «высказываниями Дирака, свидетельствующими о его «геометризме», о его особой симпатии к геометрическим методам и конструкциям»⁸. В действительности здесь нет никакого парадокса. Геометрические структуры в большинстве случаев имеют свои алгебраические аналоги (например, многие вопросы геометрии групп Ли сводятся к теории алгебр Ли). Алгебраизация геометрии облегчает формализацию аппарата и вычисления. Геометризация алгебры придает наглядность соответствующим математическим объектам и операциям, усиливая эвристическую функцию последних. Из приведенных высказываний Дирака видно, что он себя относил к «геометристам», что к своим результатам, алгебраическим по форме, он пришел «геометрическим путем». Правда, этот «геометрический путь» зачастую, как в случае с алгеброй q -чисел, остается скрытым.

Тем не менее дираковское понимание «математической красоты» в значительной мере было связано с его «любовью к геометрии», а его «теория преобразований» — не что иное, как своеобразные формы геометрической концепции Ф. Клейна, его «эрлангенской программы». Наконец, и убежденность в плодотворности гамильтонова формализма имеет геометрическую подоплеку: ведь гамильтонова структура — это геометрическое представление динамики (в современной терминологии — это симплектическая

⁸ См., напр.: [14], откуда мы заимствовали несколько таких высказываний. В интервью с Т. Куном в 1962 г. Дирак, вспоминая свой путь к алгебре q -чисел, говорил: «Я мог взяться за алгебру, когда основные идеи были уже разработаны, но создать новые фундаментальные идеи я мог, работая лишь геометрически... Как только эти идеи были созданы, их можно было сформулировать в алгебраической форме... Наиболее важная часть задачи — это создание новых идей, а для этого, как я думаю, нужен геометрический ум (geometrical mind)» (Цит. по: [14. С. 601]). В своих более поздних воспоминаниях Дирак писал: «Меня очень интересовала геометрия. Это была область математики, которая очаровала меня. Вы можете разделить всех математиков на два класса: тех, чей главный интерес — геометрия и тех — кто в первую очередь интересуется алгеброй... Я уверенно отношу себя к «геометрическому классу», причем таким я был всегда...» (162. С. 111–112). Это пристрастие к геометрии Дирак объяснял своим стремлением к наглядному, интуитивному мышлению («...Я представлял себе q -числа как своего рода таинственные числа, соответствующие физическим вещам... Дельта-функция была открыта также благодаря стремлению к наглядному образу бесконечности» (Цит. по: [14. С. 609], чему, как считал он, способствовало и полученное им инженерное образование [14. С. 608]).

геометрия). Весьма высоко оценивал Дирак и теории относительности (специальную и общую), имеющие элегантно-геометрические формулировки.

Можно предположить, что истоки дираковского «геометризма» — в особенностях его инженерного и математического образования [13, 24]. П. Фрэзера, который преподавал Дираку чистую математику в Бристольском университете, отличал геометрический подход к изложению анализа. К тому же он читал курс проективной геометрии, который с самого начала увлек Дирака. В это же время Дирак начал самостоятельное изучение теории относительности, в частности по книгам Эддингтона [19, 20]. Вполне вероятно, что изучение инженерных дисциплин и прикладной математики (черчение, начертательная геометрия и т. п.) также способствовало развитию у Дирака геометрического наглядно-оперативного мышления. Он продолжал и в Кембридже изучение проективной геометрии, посещая домашние семинары крупного кембриджского геометра, друга П. Фрэзера, Г. Бэйкера (162. С. 115—116). Тогда же он пытался применить методы проективной геометрии к задачам физики, прежде всего к четырехмерной формулировке специальной теории относительности.

Мехра и Рехенберг привели веские соображения в пользу геометрического происхождения q -числовой формулировки квантовой механики, отметив при этом непосредственное влияние на Дирака книги Бэйкера «Принципы геометрии» (1922 г.) [13. С. 162—175]. Универсальная теоретико-групповая классификация геометрий, а именно «эрлангенская программа» Ф. Клейна была сформулирована в рамках проективной геометрии. В конце первого десятилетия XX в. усилиями Г. Минковского и Ф. Клейна фундаментальные физические группы Пуанкаре и Галилея—Ньютона были также включены в рамки проективно-геометрического подхода. Дираковская теоретико-инвариантная концепция физики, тесно связанная с его «теорией преобразований», таким образом, естественно ассоциируется с его проективно-геометрическими интересами.

Есть также основания предполагать, что и при открытии релятивистского уравнения электрона он мог использовать идеи и методы проективной геометрии. Во всяком случае, в 1972 г., еще раз подчеркнув большое, эвристическое значение проективной геометрии в сделанных им теоретических открытиях, он специально в этой связи упомянул о своей работе по спинорам: «Мое знакомство с проективной геометрией в большой степени стимулировало мои исследования, интерес к ней, я бы сказал, остался на всю мою жизнь. Проективная геометрия оказалась весьма полезным аппаратом для исследований, однако я никогда не ссылался на нее в моих печатных работах. Мне кажется, что я никогда даже не упомянул о ней в статьях (хотя я не совсем в этом уверен), так как я чувствовал, что большинство физиков с ней не знакомы. Когда я получал какой-нибудь результат, я переводил его на аналитический язык и превращал мои аргументы в уравнения. Это относится к моим работам по спинорам. Мы должны работать с

величинами совсем нового типа; лучший инструмент для исследования дает нам проективная геометрия» (122. С. 114) ⁹.

Кажется, это замечание Дирака недостаточно оценено историками физики, которым в большинстве случаев еще предстоит дать проективно-геометрическую реконструкцию его достижений. Возможно, конечно, Дирак несколько преувеличил значение проективно-геометрических стимулов в своей работе, но несомненно одно — особенности математического образования Дирака, его раннее увлечение проективной геометрией сформировали геометрический стиль его мышления, который является ключом ко многим его открытиям и к его пониманию связи между физикой и математикой.

Заключение

Описанные взгляды Дирака на взаимосвязь физики и математики составляют, в сущности, основу его философских и методологических воззрений. К традиционным же философско-методологическим проблемам физики XX века, связанным с вероятностной трактовкой квантовой механики, принципом дополнительности и т. п., проблемам, которые, в свою очередь, волновали творцов квантово-релятивистской физики Н. Бора, Э. Шрёдингера, В. Гейзенберга, А. Эйнштейна, М. Борна и др., он относился почти равнодушно [14] (см.: [15—17]). М. де Мария и Ф. ла Теана приводят несколько более чем убедительных свидетельств на этот счет, принадлежащих, правда, позднему Дираку. «Вопрос о том, являются ли волны (речь идет о волнах, описываемых волновой функцией Шрёдингера.— В. В.) реальными или нет,— вспоминал он,— не беспокоил меня, потому что я считал его относящимся к метафизике» (цит. по: [14. С. 603]).

Имея в виду принцип дополнительности, он писал: «В целом он мне не нравился... Прежде всего он был достаточно неопределен. Он не обеспечивал вас какими-либо уравнениями» (Цит. по: [14. С. 610]). И дальше: «Его (т. е. Бора.— В. В.) идеи были, скорее, философскими. Я их совершенно не понимал. Мой собственный подход заключался в подчеркивании идей, которые можно сформулировать в виде уравнений. Многие же из главных идей Бора носили слишком общий характер и, скорее, были далеки от математики» (Цит. по: [14. С. 610]). Даже принцип неопределенности Дирак явно недооценивал: «Я был всецело поглощен уравнениями с некоммутативной алгеброй; качественные вещи вроде принципа неопределенности казались мне второстепенными» (Цит. по: [14. С. 605]).

⁹ Это высказывание цитируется в переводе Я. А. Смородинского, который отметил, что только в 70-е годы проективно-геометрические методы стали достоянием физиков-теоретиков: «Еще несколько лет назад эти слова поставили бы физиков в тупик... Появление твисторного исчисления и проективных пространств в теории поля в который раз подтвердило пророческий дар Дирака» [28. С. 534].

«Антифилософизм», или «антиметафизичность», Дирака просвечивают и в его статье 1963 г. (117), в которой он все интерпретационные трудности квантовой теории квалифицировал как философские и потому не представляющие интереса для физиков¹⁰.

Это не означает, что «математическая натурфилософия» Дирака нехарактерна для физиков и математиков XX века. Фактически ее мы встречаем и у позднего Эйнштейна (периода единых теорий поля), и у послевоенного Гейзенберга (когда он разрабатывал свою единую нелинейную спинорную теорию материи), и у таких видных теоретиков, как Е. Вигнер, Ф. Дайсон и др. Но, во-первых, Дирак сформулировал ее наиболее полно и эмоционально, а во-вторых, по существу, последовательно придерживался ее на протяжении всей своей творческой жизни.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Визгин Вл. П.* Взаимосвязь физики и математики в XIX веке // Историко-математические исследования. М.: Наука, 1977. Вып. 22. С. 111–126.
2. *Визгин Вл. П.* Особенности взаимодействия математики и физики в XIX и XX вв. // Математизация современной науки: предпосылки, проблемы, перспективы: Сб. тр. М.: Центр. сов. филос. (методол) семинаров при президиуме АН СССР, 1986. С. 57–64.
3. *Эйнштейн А.* Влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности // Собр. науч. тр. М. Наука, 1967. Т. 4. С. 136–139.
4. *Визгин Вл. П.* Проблемы взаимосвязи математики и физики // Историко-математические исследования. М.: Наука, 1975. Вып. 20. С. 28–50.
5. *Vizgin V. P.* The relationship between physics and mathematics during the scientific revolution in the first third of the twentieth century // Acta historiae rerum naturalium nec non technicarum (Czechoslovak studies in the history of science; Spec. Iss. 19). Science and technology at the turn of the 19 th and 20 th centuries: interrelations of disciplines. Prague, 1985. P. 33–74.
6. *Ленин В. И.* Материализм и эмпириокритицизм // Полн. собр. соч. Т. 18. С. 7–521.
7. *Клайн М.* Математика: Утрата определенности. М.: Мир, 1984. 434 с.
8. *Эйнштейн А.* О методе теоретической физики // Собр. науч. тр. М.: Наука, 1967. Т. 4. С. 181–186.
9. *Мандельштам Л. И.* Лекции по основам квантовой механики (теория косвенных измерений) (1939 г.) // Мандельштам Л. И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972. С. 325–388.
10. *Бурбаки Н.* Архитектура математики // Бурбаки Н. Очерки по истории математики. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. С. 245–259.
11. *Дайсон Ф.* Математика в физических науках // Математика в современном мире. М.: Мир, 1967. С. 111–128.
12. *Vizgin V.* Analytical mechanics as a factor in the development of mathematics // The history of science: Soviet researches. Moscow: Soc. Sci. Today, 1985. Vol. 2. P. 151–168.
13. *Mehra J., Rechenberg H.* The historical development of quantum theory. N. Y. etc.: Springer, 1982. Vol. 4. VIII+322 p.

¹⁰ «Такие трудности не слишком беспокоят физиков. Если физик умеет вычислять необходимые результаты и сравнивать их с экспериментом, то при согласии с экспериментом он вполне счастлив, потому что именно этого он хотел. Трудности первого рода (т. е. интерпретационные трудности.— В. В.) волнуют только философов...» (117. С. 130).

14. *De Maria M., la Teana F.* Dirac's «unorthodox» contribution to orthodox quantum mechanics (1925–1927) // *Scientia*. 1983. Vol. 118. P. 595–626.
15. *Kragh H.* The concept of the monopole. A historical and analytical case-study // *Stud. Hist. and Phil. Sci.* 1984. Vol. 12. P. 141–172.
16. *Kragh H.* Cosmo-physics in the thirties: towards a history of Dirac cosmology // *Hist. Stud. Phys. Sci.* 1982. Vol. 13, pt 1. P. 69–108.
17. *Kragh H.* The genesis of Dirac's relativistic theory of electron // *Arch. Hist. Exact Sci.* 1981. Vol. 24. P. 31–67.
18. *Джеммер М.* Эволюция понятий квантовой механики. М.: Наука, 1985. 380 с.
19. *Эддингтон А. С.* Пространство, время и тяготение. Одесса: Матезис, 1923. VIII+216 с.
20. *Эддингтон А. С.* Теория относительности. Л.; М.: Гостехиздат, 1934. 508 с.
21. *Визгин Вл. П.* Эрлангенская программа и физика. М.: Наука, 1975. 112 с.
22. *Вигнер Е.* Непостижимая эффективность математики в естественных науках // *Вигнер Е.* Этюды о симметрии. М.: Мир, 1971. С. 182–198.
23. *Горелик Г. Е.* Размерность пространства: Историко-методологический анализ. М.: Изд-во МГУ, 1983. 216 с.
24. *Mehra J.* The golden age of theoretical physics: P. A. M. Dirac's scientific work from 1924 to 1933 // *Aspects of quantum theory* / Ed. A. Salam, E. P. Wigner. Cambridge: Univ. press, 1972. P. 17–59.
25. *Фейнман Р.* Нобелевская лекция: Разработка квантовой электродинамики в пространственно-временном аспекте // *Фейнман Р.* Характер физических законов. М.: Мир, 1968. С. 193–231.
26. *Хуанг К.* Кварки, лептоны и калибровочные поля. М.: Мир, 1985. 382 с.
27. *Павленко Ю. Г.* Гамильтоновы методы в электродинамике и в квантовой механике. М.: Изд-во МГУ, 1985. 338 с.
28. *Сморodinский Я. А. П. А. Дирак (8.VIII.1902–23.X.1984) // УФН.* 1986. Т. 148. С. 527–534.

Рудольф Пайерлс (Великобритания)

НЕКОТОРЫЕ НАХОДИЛИ ДИРАКА. СТРАННЫМ *

Друзья и знакомые Поля Дирака часто бывали поражены его неожиданной и иногда «странной» реакцией на темы, возникающие в разговоре. Однако если у вас было время подумать, то становилось очевидно, что его замечания были естественным и логическим ответом, и что только чисто автоматические и бездумные ассоциации всех остальных и заставляли нас ожидать от него чего-нибудь другого. Это же свойство проявляется в его физике. Сходство настолько явно, что, как я покажу, многие из знаменитых анекдотов (иногда, возможно, апокрифические, но все равно характерные) могут быть прямо поставлены в соответствие с некоторыми из его статей.

Возьмите, например, широко известную историю о пилюлях в бутылке, рассказанную мне Г. Р. Ульмом (H. R. Hulme). Ульм извинился за шум в своем кармане, объяснив, что бутылка уже не

* *Rudolf Peierls.* Some thought Dirac odd/Пер. Т. Б. Романовской.

полная и поэтому производит шум. Дирак заметил: «Я думаю, она производит наибольший шум, когда она заполнена наполовину». Он уловил тот факт, что бутылка не производит шума не только когда пуста, что очевидно, но и когда целиком заполнена. Эта мысль похожа на идею, лежащую в основе его «дырочной теории». Когда я впервые услышал эту историю, не зная, когда она произошла, я подумал, что было бы очень интересно, если бы этот разговор предшествовал теории дырок, и таким образом случай с бутылкой мог привести к этой теории. На самом деле это произошло значительно позже, так что Дирак просто повторил ход мыслей, который привел его к теории дырок.

В другом эпизоде беседа за чаем зашла о том, что среди детей, родившихся за последнее время у физиков в Кембридже, была удивительно большая доля девочек. Когда кто-то легкомысленно заметил: «Должно быть что-то в воздухе!» — Дирак добавил после паузы: «Или может быть в воде». Он воспринял выражение «в воздухе» не в его условном смысле, но буквально, увидев возможное применение. Эта тенденция отражается во многих его работах. Может быть впервые она проявилась в том, как он использовал наблюдение Гейзенберга, что квантовые переменные не коммутируют. Самому Гейзенбергу это казалось уродливой чертой формализма. Дирак, наоборот, показал, что это обстоятельство занимает очень важное место в новой теории.

Важность понимания действительного смысла условного оборота распространялась даже на высказывания о погоде. Джагдиш Мехра (Jagdish Mehra) рассказывает, как гость, сидящий рядом с Дираком на обеде в колледже и желающий завязать разговор, сказал: «Сегодня очень ветрено». Дирак поднялся и пошел к двери, так что гость забеспокоился, что он как-то его обидел. Дирак открыл дверь, выглянул наружу и, возвратясь на свое место к столу, сказал: «Да».

Другая характерная особенность проявляется в истории о том, как, когда он был в Копенгагене, было решено, что Паули слишком быстро набирает вес, и Дирака попросили последить за тем, чтобы Паули не ел слишком много. Паули принял участие в этой игре и спросил Дирака, сколько кусков сахара он может положить в кофе, «Я думаю, одного для вас будет достаточно», — сказал Дирак, добавив чуть погодя: «Я думаю, одного достаточно для каждого». После некоторого дальнейшего размышления: «Я думаю, что куски сделаны таким образом, что одного достаточно для каждого».

Такая вера в упорядоченность мира часто отражается в его работах, и прежде всего в замечании в статье, показывающей, что магнитный монополь не противоречит известным законам квантовой механики: «Было бы удивительно, если бы природа не использовала это».

Та же самая идея отражена в его убеждении, что истинная теория должна быть математически красива. В своей статье 1980 г. «Почему мы верим в теорию Эйнштейна» (182) он пишет, что действительная причина веры в общую теорию относительности на-

ходится не в экспериментальном подтверждении: «Я думаю, что истинная причина веры в нее — это исключительная красота теории».

Говорят, что он однажды писал статью под диктовку Нильса Бора. (Бор имел привычку, разгуливая по комнате, диктовать черновик одному из своих сотрудников.) В одном месте Бор остановился и сказал: «Я не знаю, как закончить это предложение». Дирак, как рассказывают, положил ручку и сказал: «Меня в школе учили, что нельзя начинать предложение, если не знаешь, как закончить его».

Кажется, сам он всегда выполнял это предписание. Во всяком случае, все его статьи отражают исключительную тщательность в отборе выражений. Уцелело совсем мало черновиков, но очевидно, что у него было очень немного изменений или поправок. Когда он рассказывал на семинаре о недавно написанной статье, он объяснял свою работу почти дословно в тех же выражениях, что были в самой статье, в форме, которую он выбрал как наиболее ясную.

Следующий эпизод иллюстрирует, как возникают легенды. Гябджи (Туабджи), отставной юрист из Индии, который изучал теоретическую физику у Дирака, обнаружил, что Дирак очень хочет встретиться с писателем Форстером (Forster). Он пригласил обоих на обед, и когда они были представлены, Дирак, как рассказывал мне Гябджи, спросил: «Что произошло в пещере?» (вопрос относился, конечно, к «Поездке в Индию» Форстера), а Форстер ответил, что ничего. Позже я услышал другую версию, согласно которой ответ Форстера был: «Я не знаю». Я думал, что правильной была более ранняя версия самого хозяина. Позже, при встрече, я спросил Дирака, помнит ли он об этом случае. Он помнил очень хорошо, и обе версии оказались неточны. В действительности он спросил, не могло ли в пещере находиться третье лицо, что означало бы, что никто из спорящих не сказал неправды, а Форстер ответил: «Совершенно исключается. В пещере не было никого другого».

Как обычно Дирак подумал об интересной возможности, которая не пришла в голову никому другому. Он делал это, конечно, так часто в своих статьях, что нет смысла подбирать к этому случаю специальный пример.

Этих нескольких историй наверное достаточно, чтобы продемонстрировать мою точку зрения, что неожиданные и трогательные повороты в его разговорах были типичной чертой того интеллекта, который внес такой значительный вклад в физику.

П. ДИРАК и П. Л. КАПИЦА *

Письма 1935—1937 гг.

Мне хотелось бы сказать, что Капица и я — друзья с очень давних пор, мы с ним дружим уже 59 лет. Это не совсем обычно для друзей — знать друг друга столько лет. Мы много раз встречались за эти 59 лет.

П. Дирак

Этими словами начал Поль Дирак свой доклад «Жизнь Капицы как я ее знаю»¹. Выступил он с этим «незапланированным» докладом на международном семинаре в г. Эриче, Сицилия, в августе 1982 г.

Среди его слушателей был и Капица, который безуспешно пытался убедить Дирака не выступать с этим докладом. Это была их последняя встреча...

А встретились они впервые в 1923 г. Послушаем снова Дирака: «Капица прибыл в Кембридж в 1921 г., и очень скоро Резерфорд был поражен его дарованиями. Резерфорд стал другом Капицы и оказал ему большую поддержку в его исследовательской работе. Капица был человеком активным, и он организовал небольшую группу физиков в Кембридже, которая состояла наполовину из экспериментаторов, наполовину из теоретиков. Эту группу называли «Клубом Капицы». Он собирался по вторникам вечером, после обеда, и на заседаниях обсуждались проблемы, которые интересовали тогда физиков. ...Я прибыл в Кембридж в 1923 г., два года спустя после Капицы. И скоро стал его близким другом, а затем был принят в Клуб Капицы.

Капица убедил меня заняться экспериментом в его лаборатории, и я стал работать над проблемой разделения изотопов с помощью центрифуги, используя прибор с вращающимся газом без каких-либо механически движущихся частей. Капица показал мне, как сконструировать совершенно простой аппарат, и я взялся за работу. Этим методом я разделения изотопов не добился, но получил неожиданно довольно интересные тепловые эффекты и продолжил работу в этом направлении.

Мы с Капицей сотрудничали также в работе по отражению электронов стоячими световыми волнами. Если световая волна па-

* Публикация, перевод и комментарии П. Е. Рубинина

дает на отражающую поверхность, то существует интерференция между падающей и отраженной волнами. Теперь можно пустить на получившуюся стоячую волну пучок электронов под малым углом к ней. Это был полезный эксперимент, потому что в то время волновая природа электрона была все еще неопределенной и подтверждением волновых свойств электрона мог бы быть тот факт, что электроны отражаются от волны аналогично отражению от кристаллической решетки.

Капица предложил идею такого эксперимента, а я разработал теорию, и мы опубликовали совместную статью об этой работе...²»

Их дружба была очень ровной, без единой ссоры, без единого темного облака... И хотя жизнь порой разлучала их на долгие годы, они никогда не забывали друг друга, и стоило, например, Петру Леонидовичу собраться в Англию или в Венгрию, откуда родом была жена Дирака, как он тотчас же извещал об этом своего друга и спрашивал его: не соберется ли и он туда же? И они встречались — в Советском Союзе, в Англии, в Венгрии, в США, в Италии, в Швейцарии...

В архиве П. Л. Капицы хранятся письма, которые они писали друг другу. Автографы Дирака и отпуски писем Капицы...

Публикуемым в настоящей подборке письмам предшествовал очень драматический год в жизни П. Л. Капицы.

Когда осенью 1934 г. он, по примеру прошлых лет, приехал вместе с женой в Ленинград, чтобы повидать свою мать и друзей, его вызвали в Москву и там официально сообщили, что вернуться в Англию он не сможет, ему предстоит продолжать свою научную работу в СССР. Анна Алексеевна вернулась в Кембридж к сыновьям, Капица остался в Ленинграде без работы, без лаборатории, без своих учеников и сотрудников.

После нескольких месяцев томительной неопределенности Совнарком СССР принимает постановление о строительстве в Москве Института физических проблем. Директором института назначается Капица. Институт проектируется и строится «под» научное оборудование Мондовской лаборатории в Кембридже, созданной и оснащенной П. Л. Капицей. Однако попытки полпредства СССР в Лондоне договориться с Кембриджским университетом о продаже Советскому Союзу этого научного оборудования ни к чему не привели.

Капица нервничает, душевное состояние его очень тяжелое. «Все бы ничего, — пишет он жене, — если бы не научная работа. Ведь я вроде алкоголика закоренелого. Как ему трудно без вина, так [и] мне без того, чтобы не копошиться в лаборатории...» Он серьезно подумывает о том, чтобы «перейти работать в физиологию, или, вернее, в биофизику», которая не требует столь сложного технического оснащения, как исследования в области физики низких температур. И. П. Павлов готов был предоставить ему место в лаборатории Института экспериментальной медицины.

Дирак находился в это время в Америке...



П. Л. Капица и П. Дирак. Кембридж, 1928 г.

14 мая 1935 г. он пишет из Принстона Анне Алексеевне в Кембридж: «Я только что получил письмо от Тамма, который приглашает меня отправиться с ним на Кавказ, чтобы походить там по горам. Мне кажется, что было бы хорошо, если бы К[апица] присоединился к нам. Прежде всего это было бы очень полезно для здоровья К[апицы]. Альпинизм заставляет забыть все свои заботы и сосредоточиться на сиюминутных проблемах. Во-вторых, я буду располагать неограниченным временем и возможностями поговорить с К[апицей]... Тамм хотел бы, чтобы мы отправились в Теберду как можно скорее после моего приезда в Москву, а затем мы отправимся в более дикое место, которое называется Домбай (там живут в основном в палатках). Оттуда мы, вероятно, совершим поход либо к Эльбрусу, либо в Сухум... Если Вы считаете, что это хорошая идея, чтобы К[апица] отправился на Кавказ со мной, то не напишите ли Вы ему об этом? Вы могли бы попросить его поговорить об этом с Таммом. ...Если по какой-либо причине Вы бы предпочли, чтобы я не отправлялся с Таммом на Кавказ, сообщите мне об этом тотчас же. Достаточно будет послать мне телеграмму со словами: «Отмените поход». ...По-видимому, я приеду в Москву 25-го или 26-го июля. Может быть, мне придется задержаться в Москве на несколько дней, чтобы продлить визу, если мне не удастся получить долгосрочную в Токио...»

31 мая 1935 г. Анна Алексеевна пишет Дираку: «Я очень желаю, что должна была послать Вам телеграмму с просьбой отменить Вашу поездку на Кавказ, но Ваше присутствие в Москве в начале августа совершенно необходимо, поскольку в СССР в этом году

будет проходить Международный физиологический конгресс и туда направляется много людей. Поедет секретарь Королевского общества сэр Генри Дейль и, возможно, Эдриан. Королевское общество и другие хотят воспользоваться присутствием членов КО в Москве для обсуждения положения К[апицы] и возможности продолжения его работы. Возможно, к ним присоединится Джон Кокрофт, который будет представлять лорда Резерфорда. И вот важно, чтобы Вы тоже были там...»

Отвечая на телеграмму Анны Алексеевны, в которой она просила его отменить поездку на Кавказ, Дирак пишет 31 мая: «Эта телеграмма пришла 29 мая, на следующий день после того, как я написал Тамму, что принимаю его приглашение. Было глупо с моей стороны не подождать подольше, прежде чем отвечать ему. Я снова ему написал, когда получил Вашу телеграмму, и сообщил ему, что очень сожалею, но выяснилось, что мне нужно вернуться в Англию раньше, чем я думал, и у меня не будет времени отправиться с ним на Кавказ, но я все-таки надеюсь повидать его в Москве...»

29 июля 1935 г. он приехал в Москву — поездом из Владивостока.

«Вчера приехал Дирак, и мы поехали с ним и с Таммом сюда, здесь уже второй день гуляем, катаемся на лодке и разговариваем,— пишет Капица Анне Алексеевне из болшевского санатория «Сосновый бор». — Давно мне так не было приятно проводить время с человеком, как сейчас. Чувствуется, что он просто и хорошо ко мне относится, и он верный, хороший друг, без лишних слов. Мы много о чем болтаем, дорогая моя, и этот разговор освежил меня. Ведь ...тут я совсем почти лишен общения с людьми — многие меня боятся, а многие прямо искренно говорят: пока конфликт с Капицей не решен, нам, как [этого] и ни хочется, лучше с ним не видеться. Никогда в жизни я не был так одинок. ...Приезд Дирака возродил в моей памяти то положение, полное уважения и известности, которое занимал я в Кембридже, [по сравнению] с тем положением загнанной собаки, в которое я поставлен сейчас. ...Дирак собирается пробыть здесь до физиологов, и я буду, конечно, очень рад быть с ним. Мы, по всей вероятности, будем тут в Болшеве гулять и кататься на лодке, и тихо беседовать...»

4 августа Анна Алексеевна пишет Петру Леонидовичу из Кембриджа: «Получила твою телеграмму. Я страшно рада, что Поль с тобой. Я думаю, что за все это время у тебя не было такого удовольствия. Он чудесный человек, и я его нежно люблю, и мне приятно, что именно он с тобой. Я знаю, что ты с ним лучше себя чувствуешь, чем с кем-либо другим. И вы вместе можете гулять, ходить, грести, все, что угодно. Одним словом, сейчас я знаю, что ты в хороших руках. Передай ему от меня большой, большой привет. И скажи, что я буду ждать его возвращения с нетерпением. Вообще, сейчас у тебя будет масса английских посетителей, один за другим. Тебе придется вспомнить весь твой английский».



П. Дирак, П. Л. Капица, А. А. Капица (1956 г.).
Фотография из архива П. Л. Капицы

В каждом почти письме, написанном Петром Леонидовичем жене в августе и первой половине сентября 1935 г., хотя бы несколько строк о Дираке, о беседах с ним, о прогулках...

5 августа. «Мы с Дираком хорошо проводим время в Болшеве. Вчера были на вечере самодеятельности в клубе завода. Дираку очень понравились танцы, и мне трудно было его увести. Он, бедняга, немного простужен, но, несмотря на это, мы совершаем с ним длинные прогулки, часа по три...»

11 августа. «Мы с Дираком очень мило живем, изредка разговариваем и философствуем. Сегодня собираемся съездить к Коле Семенову вместе... Дирак, как всегда, оригинален, но с ним легко.»

16 августа. «Сегодня мы катались на лодке с Дираком. На нас напало человек 40—50 хулиганов в возрасте от 10 до 15 лет. Нас почти что вдребезги забили грязными комьями, палками и камнями. Мы ускользнули после 15—20 минут борьбы с испачканными костюмами, без всяких увечий, прямо чудом. ...Все хорошо, что хорошо кончается, но Дирак несколько ошалел от такого приключения. ...Завтра я еду в город, пробуду там дня три, чтобы повидать физиологов. Дирак едет тоже со мной...»

XV Международный конгресс физиологов, в котором приняло участие 1500 ученых из 37 стран, начал свою работу 9 августа 1935 г. в Ленинграде. Последние два дня заседания конгресса проходили в Москве. 17 августа состоялось торжественное закрытие конгресса в Большом зале консерватории. Делегацию английских физиологов возглавляли лауреаты Нобелевской премии А. В. Хилл и Э. Эдриан.

В письме к Анне Алексеевне от 19 августа 1936 г. Капица пишет: «С Эдрианом я послал план миролюбивого решения. Узнай, что думает об этом решении Резерфорд, и расскажи мне. Мне еще не удалось узнать, что наши думают о нем...»

О том, что представляет собой этот «план миролюбивого решения», можно судить по «памятной записке», написанной рукой Дирака и хранящейся в архиве П. Л. Капицы.

Приводим текст этой записки с некоторыми сокращениями. «3 повода для задержания. а) Необоснованное сообщение из Англии о военной работе... в) Гамов: написал Молотову с просьбой предоставить ему такой же статус, какой был у К[апицы] до октября 1934 г., и выдвинул это условием своего возвращения в Россию. с) Способности, представляющие ценность во время войны.

Он возмущен этими мотивами и просил об отставке. ...Его позиция: никогда не отказывался здесь ни от какой работы — консультирование и т. д., за исключением того, что он не может заново создать кембриджскую аппаратуру, потому что это займет слишком много времени и будет делом очень скучным и угнетающим. Поэтому значительно легче начать новое направление исследований, а именно — в области физиологии...

Вот то направление действий, которое он считает правильным.

а) Его моральный долг по отношению к английским ученым, которые так много ему помогали, будет в какой-то степени погашен, если правительство предоставит ему средства для передачи Англии, чтобы покрыть расходы на его работу в течение последних 14 лет. По его мнению, это будет сумма в пределах от 30 000 до 50 000 фунтов стерлингов. Он хотел бы, чтобы эти деньги были поделены между Королевским обществом и Кембриджским университетом в соответствии с решением комитета Мондовской лаборатории или лорда Резерфорда, но чтобы не менее 12% суммы было предложено Тринити-колледжу.

б) *Необходимы следующие условия, при которых он мог бы возобновить свою работу в России.*

1. Вся аппаратура, которая находится в его кембриджской лаборатории, должна быть отправлена сюда, за исключением аккумуляторов, установки жидкого воздуха и большой старой динамомашины в электростанции. (. . .)

2. *Ассистенты.* Чтобы побудить Лаурмана и Пирсона приехать и помочь ему в первые 3—4 года, он просит, чтобы лорд Резерфорд гарантировал, что в случае, если они захотят вернуться в Кемб-

ридж после 3—4 лет, за ними сохранилась бы их нынешняя работа и пенсионные права. Он рассчитывает, что сможет обеспечить им здесь (в России) благоприятные условия, и он не думает, что они не захотят приехать.

3. Существенно важно, чтобы он смог сохранить звание профессора Королевского общества, или получить звание профессора в Кембриджском университете, или получить какую-нибудь равноценную профессорскую должность. Существенно также, чтобы должность эта была обеспечена окладом в размере примерно 400 фунтов стерлингов в год. В ответ на это он предлагает читать каждый год курс лекций в Англии. Он надеется, что пребывание в подобной должности позволит ему договориться с правительством СССР о ежегодных поездках в Англию сроком на 2—3 месяца. Жалование необходимо для покрытия его расходов в Англии.

Пока все эти условия, перечисленные в п. 1 и 3, не будут выполнены и пока оба ассистента не согласятся приехать, он не видит, каким образом он сможет возобновить свою работу в области физики в России. Если возобновить эту работу окажется невозможным, он собирается начать исследования в области физиологии, вероятно, в лаборатории Павлова.

Дело это весьма срочное и должно быть решено в течение ближайших двух месяцев.»

После того как английские ученые, принимавшие участие в конгрессе физиологов, покинули Москву, Капица и Дирак снова отправились в Болшево.

Вот еще несколько выдержек из писем Петра Леонидовича к Анне Алексеевне:

25 августа. «[Из тех хулиганов, которые] забросали нас камнями и грязью, 12 мальчишек пойманы, и [их] родителей оштрафовали на 100 рублей каждого. Так что, видимо, выдрали их здорово. Мне даже жалко стало этих парней. Когда теперь мы катаемся по реке, то никого из ребят близко нету. Милиционер изловил этих ребят с некоторой хитростью. Он явился в деревню переодетым и сказал: „Я вот слышал, что сюда приезжали два каких-то отдыхающих и избили ваших парней“. Тут возникло общее возмущение: „Как! Не нас избили, а их избили. Я, мы, избивали. . . Вот Степан такой-то камень запустил, а Митька то-то. . . и т. д. Ну, вот, все про себя и рассказали, а на следующий день их в милицию или, вернее, их родителей».

9 сентября. «Дирак уехал вчера. Я его провожал... Было грустно, он очень хороший парень и, нет сомнения, настоящий друг, на которого можно положиться. . .»

11 сентября. «Скучаю по Дираку. Он сейчас в Будапеште. Дорогая моя, он тебе расскажет о моем житье-бытье...»

Дирак вернулся в Кембридж незадолго до того, как Анна Алексеевна отправилась в Москву, чтобы все подготовить для окончательного своего возвращения на родину вместе с сыновьями.

Вскоре в Англию приезжает начальник экспортного управления Наркомвнешторга СССР Филипп Яковлевич Рабинович, который хорошо знал П. Л. Капицу и относился к нему с большой симпатией. Он встречается с Резерфордом, и переговоры о продаже Советскому Союзу научного оборудования Мондовской лаборатории трогаются с места...

В письме от 13 октября 1935 г., которым открывается настоящая подборка писем, Дирак сообщает Капице о том, как идут эти переговоры...

¹ Ст. (190 а).

² Речь идет о работе (39).

П. Дирак — П. Л. Капице

13 октября 1935 г., Кембридж

Дорогой Питер,

несколько дней назад я получил письмо от Анны. Я очень рад, что она приятно проводит время.

Переговоры в Кембридже продвигаются вперед настолько быстро, насколько это возможно.

Боюсь, что не все твои пожелания можно будет полностью удовлетворить. Гелиевый ожижитель работает сейчас с большой нагрузкой — гелий требуется и для физико-химического отделения — и все единодушно здесь считают, что в снабжении жидким гелием не должно быть перерывов. Однако они изготовят копию установки и сделают ее возможно быстрее (Пирсон¹ думает, что он сделает ее за два месяца). Что касается последнего твоего пожелания, то, по-видимому, ничего нельзя будет сделать, по крайней мере сейчас. Резерфорд скоро напишет тебе более подробно².

Я несколько раз покатал ребят в моей машине. Один раз я посадил в машину Питера и Джека, в другой раз — Андрея и Джека³. Машина у меня очень старая и тем она интереснее для ребят, потому что они могут играть всякими шурупами и железяками, которые из нее выпадают.

Наилучшие пожелания тебе и Анне

от Поля Дирака

¹ Пирсон (H. Pearson) — механик Мондовской лаборатории. Эмиль Янович Лаурман (E. Laurman, 1890—1954), который упоминается вместе с Пирсоном в приведенной в предисловии «памятной записке» Дирака, — ассистент П. Л. Капицы. Их сотрудничество началось еще в 1917 г. в Петроградском политехническом институте. В 1921 г. Лаурман, уроженец Эстонии, репатрировался на родину. С 1922 по 1934 г. был ассистентом П. Л. Капицы в Кавендишской и Мондовской лабораториях, в 1936—1938 гг. работал с Капицей в Институте физических проблем в Москве. После возвращения из Москвы до своей кончины работал в Мондовской лаборатории.

² В начале октября 1935 г. в Москву приехала Анна Алексеевна и привезла с собой письмо Резерфорда от 25 сентября. Резерфорд пишет: «Ди-

рак был здесь два дня назад, и его рассказ помог мне составить себе гораздо более ясное представление о Ваших предложениях. Благодаря этому у меня теперь более ясное понимание ситуации».

Рассказав о положении дел в Мондовской лаборатории, руководство которой он взял на себя, Резерфорд пишет: «Если Пирсон или Лаурман позже захотят поехать к Вам, я не буду препятствовать им в этом. Но я не хочу брать на себя ответственность быть им советчиком в этом деле...

В своем письме (речь идет о «памятных записках» Э. Эдриана и П. Дирака с изложением «плана миролюбивого решения» Капицы.— П. Р.) Вы упоминаете, что надеетесь убедить Ваши власти полностью оплатить стоимость Вашей работы в Англии. Должен признаться, что такой ход событий кажется мне крайне маловероятным, хотя Дирак, кажется, придерживается на этот счет другого мнения...

Я должен, как мне кажется, разъяснить Вам отношение университета, Королевского общества и всех прочих к Вашей работе. Я не думаю, что университет, Королевское общество и Тринити-колледж ожидают или хотят получить какую-либо компенсацию. Кроме личного чувства благодарности за оказанную помощь, нет ничего, что могло бы, скажем, помешать Вам принять приглашение в любое другое место, если бы Вы этого захотели. В конце концов эта помощь не была обставлена никакими условиями и имела целью создать общие возможности для прогресса в области исследований, казавшейся перспективной, и, если отвлечься от внезапного и грубого вмешательства в Вашу работу, у нас не может быть оснований для каких-либо претензий. Предоставленными Вам возможностями Вы распорядились наилучшим образом, и, если отвлечься от личных отношений, ни у одного из упомянутых учреждений нет никаких оснований требовать какой-либо компенсации. В Кавендишской лаборатории Вы создали новое направление исследований, которое будет развиваться здесь и в дальнейшем, хотя, несомненно, без того блеска, который ему придали бы Ваше присутствие и Ваше руководство.

Поскольку низкотемпературные исследования в Мондовской лаборатории будут продолжаться, для них необходимы ожижители водорода и гелия. Как я уже сказал, я с радостью организую изготовление копии любой установки из лаборатории, в которой у Вас возникнет нужда. По мере изготовления копий мы сможем наладить пересылку Вам копий или оригиналов по Вашему выбору при условии оплаты их стоимости правительством СССР. ...Большой генератор вместе с его принадлежностями я смогу, вероятно, выслать Вам сразу же, до рассмотрения вопроса об изготовлении копий. Мы могли бы выслать Вам также любые неиспользуемые в установках приборы и личные вещи, представляющие собой ценность для Вас. Мне известно, что Кокрофт будет рад доставить здесь в Англии любую вещь, которая понадобилась бы Вам при оборудовании Вашей лаборатории. Я не считаю реальным предложение о предоставлении Вам здесь профессорской ставки. Я уверен, что оно не найдет поддержки ни в университете, ни в Королевском обществе...

Надеюсь, что Вам удастся преодолеть все Ваши трудности и в скором времени снова включиться в активную экспериментальную работу. Я буду очень рад вестям от Вас...»

- ³ Питер (так в семье «по-английски» звали Сергея) и Андрей — сыновья П. Л. Капицы, Джек — сын Уоддингтонов (Waddington), кембриджских знакомых Капицы и Дирака.

П. Л. Капица — П. Дираку

5 марта 1936 г., Москва

Дорогой Поль,

я давно уже собирался написать тебе, но сначала у нас были заботы с мальчиками — оба болели, Питер провел в постели почти месяц с воспалением среднего уха, а потом заразился грип-

пом Андрей. И наконец, и у меня было воспаление среднего уха, и я даже сейчас все еще несколько глуховат на правое ухо. Довольно скучная история. Но в остальном дела идут не так уж плохо. Мы вполне готовы к установке научного оборудования из Кембриджа.

Все, что прибыло, находится в хорошем состоянии, но нам очень хочется как можно скорее получить дубликаты установок, потому что их отсутствие задерживает начало работы. Я очень устал ждать. Почти два года выброшены из активной работы — какая досада! Библиотека моя приведена в порядок, и я уже получаю все журналы и начал читать. Приступил также к чтению лекций¹.

Но здесь, в Москве, я очень тяжело переживаю отсутствие общения с учеными. У них тут нет настоящего научного общества, все они загружены лекциями и озабочены тем, как заработать денег на пропитание. Я часто думаю о Резерфорде: ведь мог же он в Канаде, совсем один, делать замечательную работу. Это говорит о том, что даже в такой обстановке можно работать.

Анна деятельно помогает мне в моей переписке, и мы рассчитываем получить загородный дом под Москвой, чтобы можно было наслаждаться лесными прогулками.

Жду с нетерпением лета, надеюсь, что ты сможешь приехать, чтобы пожить с нами². Приезжай в любое время и на любое время. Я устрою визы и все проч. для тебя.

Буду рад услышать от тебя о жизни в Кембридже и о том, что происходит в науке.

Кстати, получил ли Бор портрет Резерфорда, выполненный Гиллом?³ Анна сказала мне, что он был ему послан, но от Бора я не получил никаких вестей. А ты? Портрет был послан ему от твоего и моего имени.

Сердечный привет от нас обоих. Надеюсь, что у тебя все в порядке.

Всегда твой П. Капица

¹ П. Л. Капица прочитал в 1936 г. в МГУ факультативный курс лекций о своих работах.

² В своем письме к А. А. Капице от 15 января 1936 г. Дирак писал: «Мне будет очень не хватать Вас и Вашего мужа. Вы были мои самые близкие друзья в Кембридже. Я собираюсь в июне приехать в Россию и надеюсь увидеть вас тогда».

³ Гилл Эрик (1882—1940) — английский скульптор, гравер и художник. Речь в письме идет об авторской копии барельефа Резерфорда, установленного в вестибюле Мондовской лаборатории. Об истории этого портрета см. переписку, опубликованную в кн.: Капица П. Л. Эксперимент. Теория. Практика. М.: Наука, 1987. С. 264.

18 марта 1936 г., Кембридж

Дорогой Питер,

большое спасибо за письмо. Было приятно узнать, как выживаете. Я читал в газетах об эпидемии гриппа в России и с беспокойством думал о том, как эта эпидемия затронула вас.

В феврале в Англию приехал Бор и прочитал две лекции в Лондоне и одну в Кембридже. У меня с ним был длительный разговор, но портрет Резерфорда не был им упомянут. В эти каникулы я собираюсь поехать в Копенгаген (я выезжаю 25 марта), и тогда я спрошу его об этом.

Работа над твоими установками продвигается насколько возможно быстро. Жаль, что это требует столько времени. В подобных вопросах у теоретика большое преимущество перед экспериментатором.

Главное событие в физике сейчас — работа Шенкланда (опубликованная в *Phys. Rev.* от 1 января, с. 8), в которой показано, что эксперимент Боте—Гейгера ошибочен, так что нам следует вернуться к теории излучения с несохранением энергии, предложенной Бором, Крамерсом и Слэтером¹. В Кембридже и ряде других мест в Англии сейчас планируются и даже уже проводятся эксперименты, призванные проверить заключения теории (их ставит Вильямс в Манчестере и Блэкett в Лондоне). Работа Шенкланда заострила вопрос о точности измерений. Эксперименты, которые ставятся здесь, в определенной степени спровоцированы самим Шенкландом, который не привел никаких данных о поправках, которые следовало учесть (например, на неоднородность источника и на возможное рассеяние отраженных электронов в процессе их возвращения назад от рассеивателя), и ставит целью проверить, насколько правильно их учитывал Шенкланд.

У Клуба появились отпечатанные пригласительные билеты². Один из таких билетов прилагаю.

Я собираюсь приехать в Россию в июне (чтобы посмотреть на затмение 19-го) и надеюсь повидать тебя тогда. Спасибо за приглашение. Я, наверное, в июле отправлюсь с Таммом на Кавказ по лазить по горам. Может быть, и ты соберешься?

Самые лучшие пожелания тебе и Анне.

Искренне твой Поль Дирак

¹ Речь идет о работе: *Shankland R. S. An apparent failure of the photon theory of scattering // Phys. Rev. 1936. Vol. 49, N 1. P. 8.* — получившей поддержку П. Дирака (47). Выводы работы Р. С. Шенкланда оказались ошибочными.

² Речь идет о «Клубе Капицы».

9 мая 1936 г., Кембридж

Дорогой Питер,

устрой мне, пожалуйста, русскую визу. Я хотел бы понаблюдать затмение 19 июня на Кавказе. (Я, наверное, примкну к Пулковской экспедиции в Туапсе. Тамм говорил об этом с Папалекси¹.) Я отправлюсь из Кембриджа как можно раньше, возможно 9 или 10 июня, и я хотел бы провести в России около шести недель — частью с вами, частью с Таммом. Будешь ли ты в Москве все лето?

Ты, наверное уже слышал, что Кавендишская лаборатория получила 250 000 фунтов стерлингов в дар от Остина, автомобильного фабриканта². Все очень этим довольны. Несколько дней назад умер Хаусмен³.

По-прежнему основная тема для разговоров — правильны ли эксперименты Боте—Гейгера. Этим вопросом занимается множество людей, однако они не могут дать определенного ответа. Занимающиеся этим в Кавендише столкнулись с таким большим количеством трудностей, связанных с необходимостью избавиться от помех, что они не верят в то, что Боте и Гейгер смогли эти трудности полностью преодолеть. На следующей неделе Эпплтон⁴ начнет читать Скоттовские лекции на тему «Состояние верхней атмосферы».

Борн вернулся из Индии. Раману не удалось получить для него в Индии должность профессора. Там больше интересуются экспериментальными вопросами. Так что Борн, вероятно, надолго останется в Кембридже⁵. Фаулер⁶ все еще в Америке. Он купил машину и отправился на ней в Мексику. Он вернется в Кембридж в конце июня. Во второй половине дня по вторникам в моей комнате в Школе искусств собирается теперь новый коллоквиум по фундаментальным проблемам теоретической физики. Второй этаж Школы искусств превратился теперь в настоящей математический институт. Нам удалось, после некоторых усилий, вытеснить другие факультеты.

Желаю всего хорошего и надеюсь повидать тебя и Анну в июне.

Искренне твой

Поль Дирак

¹ Папалекси Николай Дмитриевич (1880—1947) — физик, академик (1939).

² Остин Герберг Остин (H. A. Austin, 1866—1941) — основатель и первый президент английской автомобильной компании «Остин мотор».

В письме к Кокрофту от 19 мая 1936 г. Капица пишет: «Я пришел в восторг, прочитав в „Nature“ о грандиозном даре Остина Кавендишской лаборатории... Боюсь лишь, что Крокодил положит 3/4 капитала в банк вместо того, чтобы заставить его работать. Тут мы всегда расходились. Я верю в то, что деньги должны оборачиваться. „Чем больше тратишь, тем больше получаешь“ — вот мой девиз».

³ Хаусмен Альфред Эдуард (A. E. Housman, 1859—1936) — английский ученый и поэт, автор сборников стихов «Шропширский парень» (1896), «Последние стихи» (1922), «Еще стихи» (1936).

Вот что пишет о его смерти Капица Резерфорд в своем письме от 15 мая 1936 г.: «Вы, вероятно, слышали, что примерно две недели назад от сердечного приступа внезапно умер Хаусмен. Кажется, я писал Вам, что он таял на глазах и его смерть была лишь вопросом времени. ...Мне кажется, Вы знали его весьма близко, и он был, без сомнения, во многих отношениях выдающейся личностью и одним из самых великих людей у нас в Тринити...»

⁴ Эпплтон Эдвард (1892–1965) – английский физик, лауреат Нобелевской премии (1947).

⁵ Борн Макс (1882–1970) – немецкий физик-теоретик, один из создателей квантовой механики, лауреат Нобелевской премии (1954).

М. Борн был одним из кембриджских друзей П. Л. Капицы. Они подружились после того, как Борн в 1933 г. эмигрировал из нацистской Германии в Англию.

26 февраля 1936 г. Капица пишет Борну в Индию и предлагает ему пост руководителя теоретического отдела Института физических проблем. Предложение Капицы вызвало оживленную переписку, в которой приняли участие и жены Капицы и Борна. Макс Борн собрался уже приехать в СССР на месяц в сентябре 1936 г., чтобы на месте решить, принимать ли ему предложение Капицы, но тут освободилось место профессора в Эдинбургском университете, это место предложили Борну, и он остался в Англии.

⁶ Фаулер Ральф Говард (1889–1944) – английский физик-теоретик, учитель П. Дирака. Вместе с П. Л. Капицей был основателем и главным редактором международной серии монографий по физике издательства «Кларендон пресс» (The International Series of Monographs on Physics. Oxford: Clarendon Press).

П. Л. Капица — П. Дираку

19 мая 1936 г., Москва

Дорогой Поль,

спасибо тебе за письмо. Я сразу же предпринял необходимые шаги и надеюсь, что через несколько дней ты получишь свою визу.

Я очень занят подготовкой всего, что нужно, чтобы начать работу, как только все будет готово и приедут Пирсон и Лаурман.

Мы оба ждем тебя и надеемся, что ты поживешь у нас. Только домик у нас маленький, и, может быть, придется тебя поместить в палатку¹. Но лето будет хорошее (будем надеяться), а место, где мы будем жить, очень сухое и живописное. И прекрасные места для прогулок.

Откладываю разговоры до того времени, когда мы встретимся.

Всегда твой

П. Капица

¹ В письме к Резерфорду от 19 июля 1936 г. Капица пишет: «Мы живем в маленьком загородном доме, нас очень много – кроме нас самих и домашней работницы, с нами живет девушка-англичанка, она помогает Анне присматривать за детьми и вести домашнее хозяйство и сохраняет в семье свежесть английского языка. Тут живет также мой племянник, и в течение нескольких дней у нас гостили Дирак и Джоан Томсон (дочь Дж. Дж. Томсона. – П. Р.). Плотность населения в трех комнатах была столь высокой, что некоторым из нас пришлось спать на террасе, это доставило нам огромное удовольствие, так как лето очень жаркое и по-



**П. Дирак и П. Л. Капица в Институте физических проблем.
Москва, 1973 г.
Фотография из архива П. Л. Капицы**

чи теплые... Мне было приятно услышать разные новости о Тринити от Джоэн. Бор написал мне очень хорошее письмо. Дирак рассказал мне о последних физических новостях...»

Во время пребывания в СССР в июле 1936 г. Дирак совершил вместе с Таммом поездку на Кавказ (см. наст. сб., стр. 177).

П. Дирак — П. Л. Капице

22 сентября 1936 г., Копенгаген

Дорогой Питер,

я обсуждал с Бором вопрос о теоретике для твоего института, и мы думаем, что самый, по-видимому, подходящий человек — это Вайскопф¹. Вайскопф работает уже некоторое время в Копенгагене. Несколько месяцев назад его пригласили работать в Киев, и он принял это приглашение, и с тех пор ждет визы. (Его визы уже пришла, но нет еще визы для его жены.) Мне кажется, что ты его встречал, когда он был в Кембридже, и у тебя есть собственное представление о его достоинствах, так что Бору и мне нет необходимости рекомендовать его. Если ты думаешь, что он тебе подойдет, сообщи мне об этом, пожалуйста. (У него есть некоторые надежды получить место в Лондоне, в этом случае на него нельзя

будет рассчитывать. Я сообщу тебе о результатах по возможности скорее.) Мне стало известно, что Гёрни² получил место где-то в Америке, так что он, наверное, не захочет поехать в Москву.

Письма, которые я написал разным людям, пока жил у тебя, по-видимому, не были отправлены. Посмотри, пожалуйста, не забыл ли твой секретарь отправить их и не лежат ли они все еще где-нибудь в институте?

Здесь в институте я видел барельеф Резерфорда. Он выглядит очень хорошо, и Бору он очень нравится.

Через несколько дней я вернусь в Англию. Бор шлет тебе свои самые теплые приветы, я — тоже.

Искренне твой

Поль Дирак

- ¹ Вайскопф Виктор Фредерик (р. 1908) — американский физик-теоретик. Родился в Вене. В 1932–1934 гг. работал в Копенгагенском университете, в 1934–1937 гг. — в Цюрихском политехникуме. В 1937 г. переехал в США.
² Гёрни Рональд Уилфрид (1899–1953) — английский физик-теоретик.

П. Л. Капица — П. Дираку

19 октября 1936 г., Москва

Дорогой Поль,

большое спасибо за твое письмо. Был бы рад узнать побольше о Вайскопфе и твое личное мнение о нем. Мне кажется, что было бы лучше всего, если бы он поехал в Киев, и тогда я нашел бы случай познакомиться с ним и посмотреть, как ему живется в СССР.

При сем прилагаю официальное объяснение причины невручения твоей телеграммы, следствием чего была твоя бессонная ночь в Москве.

Вот перевод официального письма:

«Центральный телеграф СССР

28 августа 1936 г. и т. д.

В дополнение к письму от 10 августа с. г. касательно невручения по Вашему адресу телеграммы из Нальчика, отправленной 24 июля профессором Полем Дираком, инспекцией установлено, что невручение телеграммы произошло по вине сотрудников Московского телеграфа, которые были строго наказаны.

Инспектор Глухов»

Все поступившие на твое имя письма были отправлены в Сент Джонс-колледж, и если некоторых не хватает, то они потерялись, но не по нашей вине.

Наша поездка на Кавказ с Кокрофтами была не очень удачной, поскольку он заболел, и нам пришлось остаться в Крыму в том самом месте, где несколько лет назад мы жили с тобой¹. После

их отъезда я несколько раз ходил охотиться и подстрелил несколько перепелок.

Сейчас я очень занят приведением института в полный порядок и возобновлением моей работы.

Когда мы снова увидим тебя в России?

Сердечный привет и наилучшие пожелания от нас обоих.

Всегда твой

П. Капица

¹ Капицы отдыхали вместе с Дираком в Крыму в Гаспре в 1932 г. Сохранилось письмо Дирака Капице от 13 октября 1932 г., в котором он описывает перипетии своего путешествия из Севастополя в Харьков. Вот отрывок из этого письма:

«Как ты, наверно, уже слышал, я с трудом добрался до Харькова, поскольку поезд из Севастополя отправился с опозданием на 12 часов, так что мне пришлось ждать на вокзале до 5 утра. И я прибыл в Харьков в 12.30 ночи вместо полудня, и меня никто не встретил из-за недоразумения (обрати внимание — телеграмма-молния из Севастополя в Харьков идет 12 часов, на один час меньше, чем поезд). Я оставил багаж на вокзале и отправился пешком в институт, и был рад удостовериться в том, что 1) знаю дорогу и 2) Обреимов не лег еще спать...»

П. Дирак — П. Л. Капице

30 октября 1936 г., Кембридж

Дорогой Питер,

спасибо за письмо и за окончательное объяснение причины исчезновения телеграммы.

Вайскопф работает в основном по проблемам общего теоретического характера и проявил выдающиеся способности. Некоторое время назад он сотрудничал с Паули и написал статью, которая получила большую известность как статья Паули—Вайскопфа¹. Эта работа показывает, что можно построить релятивистскую квантовую теорию для частиц без спина (что ранее считалось невозможным), если принять во внимание возможность рождения пар. Эта работа не имеет практического применения, поскольку элементарные частицы с нулевым спином не известны, но она играет наиболее важную роль во всех теоретических обсуждениях о первичных частицах материи. В последнее время В[айскопф] делает хорошую работу о ядерных силах, а когда я был в Копенгагене, я видел последнюю его работу о поляризационных эффектах, встречающихся в теории позитрона. Это очень хорошая работа — она дает более физический подход к исследованию этого вопроса, чем это удалось Гейзенбергу и мне.

На мой взгляд, Вайскопф — самый для тебя подходящий человек. Я забыл о нем, когда мы обсуждали с тобой возможных кандидатов. Он более сильный теоретик, чем Гёрни, и в этом отношении почти равен Гайтлеру² или Лондону³. Вайскопф очень приятный человек в личном плане (и у него прелестная жена-датчанка). К тому же, Вайскопф уже бывал в СССР (кажется, он читал лекции в Харькове), и ему там нравится, и он немного выучил



П. Л. Капица и П. Дирак на конференции Нобелевских лауреатов в Линдау,
1979 г.
Фотография из архива П. Л. Капицы

язык. Он не получил места в Лондоне — они взяли вместо него англичанина. А после того как В[айскопфа] настоятельно просили приехать работать в Киев и заставили его долго ждать визу, они назначили на это место другого человека. Но В[айскопф] в любом случае поедет в СССР, чтобы посетить Харьков, и он зайдет к тебе, когда будет проездом в Москве. Я дал ему адрес твоего института.

Я говорил с рядом физиков о предлагаемой в будущем году конференции. Похоже, что предпочтение отдается тому, чтобы она состоялась в июне, июле или сентябре, а не в апреле. Сообщи мне пожалуйста, какое время подходит для тебя. Мне кажется, что сентябрь для тебя не подойдет.

Самые лучшие пожелания тебе и Анне.

Искренне твой

Поль Дирак

¹ Речь идет о работе: *Pauli W., Weisskopf V. F. Über die Quantisierung der skalaren relativistischen Wellengleichung // Helv. phys. Acta. 1934. Vol. 7. S. 709.*

² Гайтлер Вальтер Генрих (1904–1981) — физик-теоретик. Родился в Карлсруэ. В 1933 г. эмигрировал в Англию. Работал в Бристоле, Дублине, Цюрихе.

³ Лондон Фриц (1900–1954) — физик-теоретик. Родился в Бреслау (ныне Вроцлав, ПНР). В 1933 г. эмигрировал в Англию. С 1939 г. профессор университета в Дареме (США).

П. Дирак — П. Л. Капице

29 января 1937 г., Кембридж

Дорогой Питер,

я попросил несколько физиков (в основном из Кембриджа) приехать на твою конференцию и выяснил, что выбрать такое время, которое подошло бы каждому, невозможно. Насколько я могу понять, самое удобное время для большей части — начало июля. Что если мы наметим начало конференции на 1 июля? Если это тебе подходит, я разошлю более определенные приглашения на эту дату.

Слышал ли ты, что во время каникул я женился на венгерской даме, сестре Вигнера? ¹ Сейчас я присматриваю дом.

Хотелось бы знать, решил ли ты что-нибудь насчет Вайскопфа или все еще ищешь теоретика.

Надеюсь, что новая твоя лаборатория сейчас успешно работает. Лучшие пожелания тебе и Анне от

искренне твоего

Поля Дирака

¹ Вигнер Юджин Поль (р. 1902) — американский физик-теоретик. Родился в Будапеште. В 1930—1971 гг. работал в Принстонском университете.

П. Л. Капица — П. Дираку

17 февраля 1937 г., Москва

Дорогой Поль,

я получил твое письмо, но и до него я уже слышал о важных изменениях в твоей личной жизни ¹. Надеюсь, что они принесут тебе счастье. Нам очень хочется познакомиться с твоей женой и подружиться с ней. Мы надеемся, что этим летом вы вместе приедете в СССР и остановитесь у нас так же запросто, как ты это делал, когда был холостяком.

Теперь о конференции. Июль для нас подходит. Мне кажется, что еще 5—6 человек, кроме тебя, будет достаточно. Жить они будут здесь, мы это устроим. Сообщи мне, кто готов приехать, и я пошлю им приглашение.

Что касается теоретика, то я встретился с Вайскопфом, и он сказал, что до осени он будет у Бора, а затем, если у него не будет других перспектив, он вполне готов приехать. Я терпеть не могу людей, которые говорят, что если не найдут ничего лучшего, то приедут сюда.

Тем временем Ландау мне сказал, что он хотел бы приехать сюда, чтобы работать со мной, и я согласился взять его. Он не уступает никому из тех теоретиков, которые собирались к нам приехать, а поскольку он русский, у меня будет меньше с ним хлопот, чем с иностранцем.

Нильс Бор приезжает сюда в мае на пути из США домой. С удовольствием повидаяю его здесь.

Я надеюсь, что ты счастлив и работается тебе хорошо.
Самые лучшие пожелания и сердечные приветы вам обоим от нас обоих.

Всегда твой

П. Капица

¹ Об изменениях в личной жизни Дирака Капице сообщил Резерфорд. В своем письме от 20 января 1937 г. он писал: «Самая последняя наша новость состоит в том, что Дирак не устоял перед чарами венгерской вдовы, матери двух детей, которым, мне кажется, 11 и 13 лет. Они пожелали на рождественские каникулы и теперь ищут в Кембридже подходящий дом. Кажется, она сестра профессора математики из Принстона Вигнера, и познакомились они в Принстоне. Я считаю, что уход за ним потребует всех сил опытной вдовы! Надеюсь, что все это кончится хорошо. Ее я еще не видел...»

Отвечая Резерфорду, Капица пишет 16 февраля: «Новость о женитьбе Дирака была для нас совершенно неожиданной. Как Вы знаете, мы очень любим Дирака, и мы надеемся, что он сделал правильный выбор своего спутника жизни...»

22 марта 1937 г. Резерфорд пишет Капице: «Дирака и его жену я видел только мельком, но она, как мне кажется, женщина очень приятная и компетентная, и она, как Вы знаете, обеспечила его совершенно готовой семьей!..»

П. Дирак — П. Л. Капице

4 марта 1937 г., Кембридж

Дорогой Питер,

большое тебе спасибо за письмо. Из тех, с кем я говорил о твоей конференции, Блэкетт¹, Кокрофт², Олифант³, Пайерлс⁴ и Вустер⁵ сказали, что будут рады приехать, также и Леннард-Джонс⁶, но он не совсем уверен, удастся ли ему приехать. Все хотели бы приехать вместе со своими женами. Все они просили меня передать тебе свою благодарность. На отдельном листке я написал полные их имена и адреса. Некоторые из них хотели бы вернуться в Кембридж к середине июля (Блэкетт, Кокрофт, Пайерлс), и им хотелось бы поэтому, чтобы конференция состоялась в самом начале июля, а Пайерлс хотел бы провести в России неделю или две до конференции.

Моя жена Манси пишет вам отдельно. Она не совсем уверена, сможет ли приехать в Россию со мной, но если даже она не сможет приехать, она не будет возражать против того, чтобы я поехал без нее. Прилагаю две ее маленькие фотографии. К сожалению, у меня нет снимков лучше.

С удовольствием ожидаю встречу с тобой и всей твоей семьей этим летом.

Искренне твой

Поль Дирак

¹ Блэкетт Патрик Мейнард Стюарт (1897–1974) — английский физик.

² Кокрофт Джон Дуглас (1897–1967) — английский физик, лауреат Нобелевской премии (1951). Начал свою научную деятельность в Кавендишской лаборатории под руководством П. Л. Капицы, был его ближайшим



П. Л. Капица и П. Дирак с женами, Эриче (Италия), 1982 г.
Фотография из архива П. Л. Капицы

помощником в магнитной лаборатории Кавендиша и в Мондовской лаборатории.

³ Олифант Маркус Лоренс Элвин (р. 1901) — австралийский физик.

⁴ Пайерлс Рудольф Эрнст (р. 1907) — английский физик-теоретик.

⁵ Вустер Уильям Альфред (р. 1903) — английский физик.

⁶ Леннард-Джонс Джон Эдвард (1894–1954) — английский физик-теоретик.

А. А. Капица — П. Дираку

25 мая 1937 г., Москва

Дорогой Дирак,

Питер просил меня написать Вам и сообщить, какие изменения произошли в организации нашей конференции. Вы же знаете, в России все подвержено изменениям, даже автобусные остановки (что было отмечено одним англичанином, который считал, что самое последнее, что может подвергаться изменениям в этом мире, — это автобусные остановки).

Так вот, физическая группа Академии наук проводит в сентябре конференцию по ядерным проблемам. Мы поэтому решили, конечно, что нет смысла проводить в июле наше маленькое собрание. Насколько Питеру известно (он не состоит в организационном комитете), все те, кто собирался приехать на наше мероприятие, будут приглашены на эту конференцию, все их расходы и расходы

их жен будут оплачены и т. д. Через некоторое время Вы получите официальное приглашение.

Вот о чем. Питер просил меня написать Вам: мы были бы очень рады, если бы Вы и Манси приехали пораньше и погостили у нас до конференции. Это было бы замечательно, и мы все были бы очень рады. У нас есть маленький домик на самом берегу Москвы-реки, в лесу, очень славное местечко, без строгих правил, без милиции, чтобы гонять Вас, как это было прошлым летом. Домик крошечный, но есть достаточно помещения и на террасе, и под крышей, и в палатке, и т. д.

Приезжайте и привозите с собой Вашу жену. Мы принимаем всех — и жену, и столько детей, сколько Вы захотите. Вы же знаете, это меня нисколько не беспокоит.

Наш сердечный привет вам обоим.

Ваша

А. Капица

П. Дирак — П. Л. Капице

6 июня 1937 г., Кембридж

Дорогой Питер,

спасибо большое за твое письмо (вернее, за письмо от Анны) и за телеграмму. Все, кто собирался приехать на твою конференцию, приглашены на ту, что состоится в сентябре, за исключением Леннарда-Джонса и Вустера, не приглашенных, мне кажется, потому, что они не работают в области ядерной физики. Вустер был огорчен, потому что он уже несколько лет собирается поехать в Россию, и я надеюсь, что в будущем он получит такую возможность.

Мы с Манси выезжаем из Кембриджа 9 июня и отправляемся в Будапешт.

Мы хотели бы приехать повидать вас в начале июля. В сентябре мы приехать не сможем, поскольку тогда нам предстоит вселяться в наш дом (мы купили дом на Кавендиш Авеню, у поворота на Хиллс Род) и отправлять детей в школу.

С самыми лучшими пожеланиями и в надежде на скорую встречу с тобой¹

Поль Дирак

¹ В тот год Дирак и его жена гостили у Капиц три недели, большей частью на даче, на Николиной Горе. 13 сентября 1937 г. Капица пишет Резерфорд: «...1 августа мы кончили работу в лаборатории и отправились жить в маленьком домике милях в 35 от Москвы. Это жилье временное, очень примитивное, рядом строится небольшой дом, но дело идет очень медленно, боюсь, будет тянуться еще год или два. Место очень красивое, мы живем у реки, в сосновом лесу... На даче у меня было много физических упражнений — мы очищали наш участок от старых пней и выкорчевали их изрядное количество. Дирак и его жена жили у нас в течение трех недель, и он также увлекся этим занятием. Очень забавно видеть Дирака женатым, в нем появилось больше истинно человеческого, и я рад, что он устроен в своей личной жизни. Его Манси нам понравилась. Мне кажется, она будет ему хорошей женой...»

27 октября 1937 г., Кембридж

Дорогой Питер,

позволь мне выразить тебе, как одному из ближайших друзей Резерфорда, мое самое глубокое сочувствие. Тяжелый удар обрушился на всех нас, и совершенно неожиданно. Резерфорда оперировали по поводу грыжи 15 октября, и хотя сама операция и прошла благополучно, она вызвала непроходимость кишечника. При помощи инъекций сохраняли жизнь до 19 октября, но затем не выдержало сердце.

Бор прибыл в Кембридж 23-го из Болоньи, где он был на торжествах, посвященных Гальвани. До своего отъезда в Копенгаген, до сегодняшнего дня, он был нашим гостем. Он был вместе с семьей Резерфорда на похоронах в Вестминстерском аббатстве (в этой части опубликованный в «Таймс» отчет не точен). На похоронах было около 80 научных работников из Кембриджа, включая меня. Резерфорд был кремирован 23-го, и прах его в маленькой урне был погребен рядом с могилой Ньютона, немного выше и чуть левее изголовья.

Людям сейчас начинает нравиться барельеф Резерфорда в Мондовской лаборатории. Бор сказал, что люди будут тебе очень благодарны за этот портрет. Бор несколько раз посетил леди Резерфорд¹. Она держится очень хорошо, и она сняла в городе квартиру, где будет жить.

С самыми лучшими пожеланиями всему семейству от

Поля Дирака

¹ 4 ноября 1937 г. Нильс Бор пишет Капице: «Дорогой Капица, Вы должны знать, что моя жена и я много думали о Вас и г-же Капице эти недели, и мне просто хотелось бы сказать, что у всех нас, кто так был привязан к Резерфорду, на всю жизнь останется ощущение того, как много у нас общего. Я получил печальное известие в Болонье, на конгрессе, посвященном Гальвани, и я поехал оттуда в Англию, чтобы присутствовать на похоронах в Вестминстерском аббатстве, которые прошли очень торжественно. В Кембридже у меня был длительный разговор с леди Резерфорд, которая держалась очень мужественно и нашла силы говорить обо всем самым прекрасным образом. Она, а также Дирак и его жена говорили о Вас с огромной симпатией, и мне едва ли нужно говорить, что после смерти Резерфорда я чувствую себя еще более благодарным Вам и Дираку за подаренный вами прекрасный скульптурный портрет, который каждый день у меня перед глазами...»

П. Л. Капица — П. Дираку

7 ноября 1937 г., Москва

Дорогой Польш,

большое спасибо за письмо. Ты прав, что смерть Резерфорда — большой удар для меня. Я все время надеялся, что увижу его снова, и даже в последнем письме ко мне он намекал, что его поездку сюда, чтобы повидать меня, нельзя считать невероятной¹.

Как ученый, Резерфорд, конечно, признан повсюду, но Резерфорд как выдающаяся личность был известен лишь тем, кто работал с ним.

Больше всего я любил в Резерфорде его простоту, он всегда избегал всяких сложностей в науке и личной жизни. Он просто не выносил ничего сложного, он терпеть не мог ни сложных приборов, ни запутанной дипломатии, и поэтому жить и работать с ним было так легко и приятно.

С уходом из Кембриджа Ч. Т. Р. Вильсона², Резерфорда и ряда молодых физиков³ создается впечатление, что кембриджская школа экспериментальной физики в Кавендише находится в опасности, и мне кажется, что тебе как одному из ведущих физиков в Кембридже следует обратить особое внимание на поддержание великих традиций Кавендишской лаборатории, имеющих такое большое значение для всего мира.

Этот год оказался для меня очень тяжелым — тяжело потерять в один год и мать и Резерфорда.

Работа в лаборатории идет совсем не плохо. Новый большой [гелиевый] ожижитель дает 4 литра в час. Этого вполне достаточно для нужд лаборатории, хотя это и меньше предполагавшейся производительности. Но я надеюсь, что некоторые усовершенствования, которые мы собираемся внести, без особых трудностей доведут ее до расчетной величины.

Я возобновил свою работу по гальваномангнитным явлениям. Эффект Зеемана закончен и почти готов к публикации. Семейство наше чувствует себя хорошо, Анна более подробно напишет об этом Манси. Мы часто вспоминаем ваше пребывание у нас, и мы все надеемся, что ты по-прежнему будешь навещать нас каждый год, но уже не один, а вместе с Манси.

Сердечный привет Манси.

Всегда твой

[П. Капица]

Р. S. Мой почерк трудно разбирать, поэтому Анна перепечатала это письмо. Мне было очень приятно узнать, что людям начинает нравиться барельеф Резерфорда в Мондовской лаборатории.

¹ В последнем своем письме к Капице от 9 октября 1937 г., написанном за 5 дней до роковой операции, Резерфорд писал: «В настоящий момент я не могу строить планы на будущее, но я надеюсь, что сумею найти возможность повидать Вас».

² 23 марта 1936 г. Резерфорд пишет Капице: «На днях я с огорчением услышал от Ч. Т. Р. Вильсона, что он собирается оставить свой дом в Кембридже и с семьей перебраться под Эдинбург. Как Вы знаете, его сын учится там на медика и начнет, вероятно, практиковать где-то в той же местности. Вильсона нам будет очень нехватать, но я надеюсь, что он сумеет возобновить свою работу на севере, хотя бы частично».

³ В 1935—1937 гг. Кавендишскую лабораторию покинули Дж. Чадвик, Н. Феррер, Ч. Эллис и М. Олифант.

П. ДИРАК и И. Е. ТАММ

Избранная переписка *

Обычно принято считать Дирака молчаливым и не очень общительным человеком. Наверное, так оно и было, но наряду с этим в нем уживалась способность к искренней и глубокой дружбе. Двух своих чуть ли не самых близких друзей нашел Дирак в Советском Союзе. Это были Петр Леонидович Капица ¹ и Игорь Евгеньевич Тамм.

Знакомство Дирака и Тамма состоялось в 1928 г. в Лейдене ². Тамм приехал туда в январе, получив по ходатайству П. Эренфеста стипендию Международного научного фонда им. Г. А. Лоренца. В феврале было опубликовано знаменитое уравнение Дирака для релятивистского электрона ³, и Тамм реферировал эту работу на семинаре у Эренфеста. Вот выдержки из писем, рассказывающие, как развивались события:

«Я вообще в упоении, вчера докладывал Крамерсу, Эренфесту, Фоккеру, Клейну, Кронигу работу Дирака — Эренфест очень доволен... Эренфест не хочет отпускать меня из Лейдена до июня. Во всяком случае, я не оскандалился» (Тамм — жене, Н. В. Тамм, 8.03.1928 г.);

«Я совершенно восхищен последней работой Дирака о спине электрона. Тамм все это нам очень хорошо разъяснил. Он продолжает работать над этим дальше. К радости Тамма, май и июнь Дирак проведет в Лейдене. Фонд Лоренца пригласил Тамма продлить по меньшей мере на это время его пребывание в Лейдене» (П. Эренфест — А. Ф. Иоффе, 13.04.1928 г.);

«Окончательно выяснилось, Дирак придет 23-го апреля на 3 месяца — поучусь у гениальнейшего представителя молодой физики. Правда, говорят, что Дирак великий молчальник, что выудить у него слово стоит громадных трудов и что беседует он только с детьми не старше 10 лет» (Тамм — жене 4.03.1928 г.);

«Завтра вечером приезжает Дирак» (Тамм — жене, 26.04.1928 г.);

«Эренфест поручил своим ассистентам встретить Дирака на железнодорожном вокзале. К встречающим присоединился и Игорь Евгеньевич. Никто из них не знал Дирака в лицо. Поэтому все вооружились оттисками последней работы Дирака о релятивистском электроне... и заняли места у выхода из каждого вагона. Дирак «клянул» на свой оттиск: расчет Эренфеста оказался правильным» (рассказ Тамма в воспоминании В. Я. Френкеля);

«У меня в последнее время состояние похмелья — последняя работа, над которой сидел свыше месяца, не вышла... По вопросу о первых моих работах здесь у меня тоже зарождаются смутные

* Публикация, перевод и комментарии А. Б. Кожевникова и В. Я. Френкеля.



П. Дирак, О. Н. Трапезникова, И. Е. Тамм, И. В. Обреимов. Лейден, 1928 г.

сомнения. Таким образом, почти никаких положительных объективных результатов моего здесь пребывания. Конечно, я очень многому научился, но могло бы быть и больше. Чувствую себя идиотом. Быть может, частичная причина лежит в том, что мои критерии все повышаются — критерий Эренфеста для меня уже недостаточно высок (хотя это вовсе не значит, что я его превысил), теперь критерий — Дирак, а я чувствую себя по сравнению с ним глупым младенцем. Конечно, еще глупей вообще сравнивать себя с гением...

Дирак с большим терпением учит меня уму-разуму; мы с ним подружились, чем я очень горжусь.

Только что без всяких подробностей узнал, что Дирак приглашен на узкую физическую конференцию в Лейпциг 17-го июня. Эренфест уедет в начале июня, так что я двинусь в Германию одновременно с Дираком» (Тамм — жене, Лейден, без даты);

«С Дираком мы так подружились, что он заявил — буду ездить с Таммом из города в город, пока он будет в Германии, а затем вернусь в Лейден» (Тамм — жене, 10.06.1928 г.);

«Ехали мы с Дираком 2-м классом и скорым поездом — иначе выходило очень неудобно, а в нашем поезде 3-го класса вообще не было. Играли почти всю дорогу в шахматы — начертили на бумаге доску, ставили крестики вместо фигур и при каждом ходе стирали их резинкой. Поездка длилась 13 часов» (Тамм — жене Лейпциг, 18.06.1928 г.);

«Приехал в Геттинген вчера... В Лейпциге были очень интересные доклады⁴, но вне докладов я мало общался с физиками —

здесь знаменитости меня, безвестного, в свою среду не приняли. А знаменитостей было тьма и всё такая зеленая молодежь — раньше знал, что все теперешние физические звезды юнны, но поражаешься, когда видишь их воочию» (Тамм — жене, Геттинген, 24.06.1928 г.);

«В воскресенье 29-го думаю выехать в Мюнхен, пробуду там $2\frac{1}{2}$ дня, затем 1-го в Баварских Альпах встречу с Беллом...⁵ На обратном пути мечтаю на один день остановиться в Нюрнберге и числа 8-го быть в Берлине, а примерно 13-го — в Москве...

В последние дни своего пребывания в Геттингене появилась лихорадочная жажда поработать и наверстать последние 2 месяца, когда работал я так мало и плохо. ...последние дни так хочется еще использовать для бесед с Дираком, с которым мы, наконец, после 3 месяцев «совместной жизни» расстанемся и которого я в последнее время совсем не «использовал» по физическим вопросам, хотя мы в Геттингене были еще более неразлучны, чем в Лейдене, — думаю, что нас можно было принять за братьев-Аяксов» (Тамм — жене, Геттинген, 26.07.1928 г.);

«За границей прожил 5 месяцев в Голландии и 2 — в Германии. Лучшие надежды остаются всегда неосуществленными — таков, по-видимому, закон природы, но все же очень доволен, особенно первой половиной пребывания за границей, когда работалось особенно хорошо. Последние же месяца два больше разъезжал по съездам и просто для «sight-seeing», лазал по Баварским «Альпам», бродил по Гарцу, Нюрнбергу, Мюнхену, Гамбургу и т. д. Особенно же рад тому, что близко сошелся и три месяца прожил вместе с истинным гением — Дираком. Не улыбайтесь высокопарному слову — оно точно соответствует действительности, и я знаю, что в старости буду внукам с гордостью рассказывать об этом знакомстве... На наш русский съезд⁶ я опоздал» (Тамм — В. И. Яковлевой, 4.10.1928 г.).

Эти выдержки уже дают представление об отношениях, сложившихся между учеными. С одной стороны, Тамм был совершенно восхищен Дираком как физиком, неизменно связывая с его именем эпитет «гениальный». О себе же он всегда отзывается подчеркнуто самокритично, иногда даже слишком. Но он, действительно, многому учился у Дирака, часто советовался с ним по ряду физических вопросов (см. их позднейшую переписку); зависимость от работ Дирака видна в ряде статей Тамма⁷. Со стороны Дирака мы также должны отметить ту тактичность и скромность, с которыми он в публикующихся письмах высказывает свое мнение о работах других ученых, спорит или поправляет ошибки.

В личном же плане лидером был, безусловно, экстравертивный и более разносторонний человек Тамм. Ему, одному из немногих, удавалось разговорить Дирака⁸, он учил его кататься на велосипеде, лезть по деревьям, повел с собой в горы. В ответ Дирак научил Тамма водить автомобиль, когда Тамм приезжал в Кембридж в 1931 г.

С 1928 г. завязалась их довольно оживленная переписка. К тому

же им удавалось почти каждый год вплоть до 1937 г. видаться — в основном, когда Дирак посещал Советский Союз⁹. В конце 30-х годов получить советскую визу стало трудно, существовали сложности и с перепиской, и она прекратилась. Эта переписка частично публикуется здесь. Оригиналы писем Дирака хранятся в архиве семьи Тамма, оригиналы писем Тамма — в архиве Churchill College, Cambridge.

Мы хотели бы выразить искреннюю благодарность профессорам R. Peierls'у и R. H. Dalitz'у за содействие в получении копий писем И. Е. Тамма.

¹ О дружбе Дирака с Капицей см. в наст. сб. «П. Дирак и П. Л. Капица. Письма 1935–1937 гг.», а также (183).

² Мы использовали воспоминания и письма, опубликованные в статьях: Л. И. Вернский «В кабинете и вне его. (Из разговоров с дедом и из семейного архива)» в сборнике «Воспоминания о И. Е. Тамме» (М.: Наука, 1986. С. 77, 96–98) и В. Я. Френкель «Встречи» (Там же. С. 277–279), а также материалы из архива семьи И. Е. Тамма.

³ См.: (20)

⁴ Доклады «Лейпцигской недели», организованной В. Гейзенбергом и П. Дебаем, в их числе и доклад Дирака (23а), опубликованы в «Quantentheorie und Chemie». Leipzig, 1928.

⁵ James H. Bell — шотландский инженер-химик и альпинист, университетский товарищ Тамма, его спутник по ряду горных путешествий.

⁶ 6-й съезд русский физиков. О нем см. ниже прим. к письму от 4.10.1928 г.

⁷ «О квантовой теории молекулярного рассеяния света в твердых телах» (1930 г.), «О взаимодействии свободных электронов с излучением по дираковской теории электрона и по квантовой электродинамике» (1930 г.), «О формулировке принципа запрета в дираковской теории позитрона» (1934 г.) и нескольких других (см.: И. Е. Тамм. Собр. науч. тр. М.: Наука, 1975. Т. 1–2).

⁸ «...как-то в Кембридже мы с ним шли и довольно оживленно разговаривали, а потом ко мне подошел один физик... и сказал, что видел нас и не может отделаться от изумления, ибо стал свидетелем картины „Говорящий Дирак“! Весьма нетривиальное зрелище...» (разговор Тамма в передаче Д. С. Данина, «Воспоминания о И. Е. Тамме», С. 143).

⁹ Дирак был в СССР в 1928, 1929, 1930, 1932, 1933, 1935, 1936 и 1937 гг., а позже еще в 1956, 1965 и 1973 гг. Приезжая в Москву, он, как правило, останавливался у Тамма.

П. Дирак — И. Е. Тамму

4 октября 1928 г.,
St John's колледж, Кембридж

Дорогой Тамм,

я опять в Кембридже после шести месяцев отсутствия. Я с большим удовольствием провел время в России. Сначала мы вместе с Борном и Полем были два дня в Ленинграде¹. Мы осмотрели достопримечательности, посетили Эрмитаж, музей русского искусства и естественноисторический музей, а также Рентгеновский институт (его полное название я забыл). Ленинград показался мне очень красивым, он произвел на меня большее впечатление, чем любой другой город во время путешествия, особенно когда я поднялся по реке на пароходе и впервые увидел много церквей с золо-

чеными куполами; ничего подобного я раньше не видел. Я хорошо помню некоторые русские картины, а также был очень рад увидеть сохранившегося мамонта, о котором так много читал в газетах, когда его нашли. Мы забрались на верх Исаакиевского собора и оттуда осмотрели город. Очень впечатляют громадные гранитные колонны здания.

Когда мы появились в Москве, съезд уже близился к концу². Согласно программе, я должен был прочитать лекцию вечером после приезда, но не узнал об этом вовремя и вместо этого посетил дворец князя (чье имя забыл), находящийся недалеко от Москвы. В тот вечер я пошел в японский театр, а на следующее утро все участники съезда посетили Кремль. После обеда я предпринял длинную прогулку по московским улицам и чуть не потерялся, но сумел вернуться назад до темноты. Жаль, что я не встретил Вас в Москве. Я надеялся, что Вы сможете приехать раньше, чем говорили³. Мы уехали из Москвы вечером 9 августа, а следующим утром заняли свои места на пароходе на Волге.

Путешествие по Волге было восхитительно и продолжалось неделю. На корабле было несколько лекций; Ландау прочел одну о полувекторах, а я о теории электрона. На пароходе мы дошли до Сталинграда, останавливаясь по пути в Казани и Саратове и в нескольких городах поменьше, а однажды в месте, где никакого города не было, — для купания. Я выполнил Ваши инструкции о купании в Волге. В основном была хорошая погода, только в Саратове весь день лил дождь, что бывает редко в той местности. На пароходе я научился есть арбузы и очень полюбил их. Я никогда не видел их раньше. Я забыл написать выше, что первое, что я съел в Ленинграде, была икра.

Погода на Кавказе была отличная. Ночью, когда мы приехали во Владикавказ, был снегопад, так что утром все окрестные вершины были белыми. Я участвовал в экскурсии на ледник и добрался до высоты 3000 м, много выше моего предыдущего рекорда — Брокена⁴. Экскурсия продлилась 6 часов и нам пришлось заночевать в деревне около Казбека. На следующее утро мы остановились у нарзанового источника, и переходя ручей я поскользнулся на камне и упал в воду, но этот эпизод не отразился на здоровье. Три дня я провел в Тифлисе, в основном отдыхая и отсыпаясь, а потом отправился в Батум попробовать найти корабль в Константинополь. Проф. Дарвин с женой тоже хотели в Константинополь, и когда, приехав в Батум, мы узнали, что есть корабль, отправляющийся туда тем же вечером, и что никакого другого не будет несколько недель, подумали, что нам повезло. Это мнение, однако, изменилось, когда обнаружилось, что мы не можем достать турецкие визы, потому что была пятница (мусульманское воскресенье) и турецкое консульство было закрыто. Хотя Иоффе был так любезен, что позвал нас на помощь руководителя области, но он ничего не мог сделать. Но вечером мы узнали, что бумаги корабля не в порядке и не могут быть приведены в порядок по той причине, что консульство было закрыто. Таким образом, ко-

раблю пришлось дожидаться следующего дня и мы смогли добыть визы и поплыть на нем⁵. Перед отправлением из Батума я смог искупаться в Черном море, а также посетить ботанический сад, где увидел много тропических растений.

Из Константинополя я поплыл на корабле в Марсель, по пути посетив Афины и Неаполь, а потом пересек Францию и закончил эти приятнейшие каникулы.

Иоффе⁶ пригласил меня в Ленинград следующей весной, я еще не решил, поеду ли. Я был бы очень рад узнать, будете ли Вы в Ленинграде или Москве, так как это может повлиять на мое решение. Я очень хочу увидеть Вас опять, если это возможно.

С наилучшими пожеланиями

от П. А. М. Дирака

- ¹ Насколько это можно понять из письма, Дирак приехал в Ленинград 5 или 6 августа, по-видимому, прямо из Геттингена, так как М. Борн и Р. Поль — геттингенские физики. Места, которые он упоминает, — Эрмитаж, Русский музей, Кунсткамера, Исаакиевский собор. Рентгеновский институт — это Ленинградский физтех, который тогда назывался Государственный физико-технический рентгенологический институт.
- ² Шестой съезд русских физиков, организованный А. Ф. Иоффе, был пожалуй, самым удачным из всех съездов. (Подробнее о съезде см.: Природа. 1928. № 10; Телеграфия и телефония без проводов. 1928. № 51; Naturwissenschaften. 1928. N 39; *Соминский М. С.* Абрам Федорович Иоффе. М.; Л.: Наука, 1964. С. 395—406; 6-й съезд русских физиков: Перечень докл. М., 1928. 62 с.) Обширная научная программа, в том числе сообщение Л. И. Мандельштама и Г. С. Ландсберга об открытии ими комбинационного рассеяния света; представительная иностранная делегация, куда входили, в частности, упомянутые Дираком М. Борн, Р. Поль, Ч. Г. Дарвин, нетривиальная организация. Съезд проходил с 5 по 16 августа, сначала в Москве, а потом на борту парохода на Волге. Дирак докладывал свою теорию релятивистского электрона. После закрытия часть участников совершили поездку по маршруту: Сталинград—Владикавказ—Военно-Грузинская дорога—Тбилиси—Батуми.
- ³ Тамм опоздал на съезд, он приехал в Москву из Германии 12 августа.
- ⁴ Восхождение на Брокен Дирак предпринял вместе с Таммом во время их пребывания в Геттингене.
- ⁵ Это было в субботу, 25 августа.
- ⁶ А. Ф. Иоффе — академик, директор Физико-технического института в Ленинграде, президент Российской ассоциации физиков.
Весной 1929 г. Дирак в СССР не приехал, так как принял приглашение прочитать курс лекций в США.

П. Дирак — И. Е. Тамму

15 апреля 1929 г.,
Висконсинский университет, Мэдисон,
факультет физики

Дорогой Тамм,

большое спасибо за Ваше письмо и копию Вашей заметки в C[omptes] R[endus]¹. Мне было очень интересно прочесть эту заметку, я также обсудил ее с Гейзенбергом, которого посетил в Чикаго несколько дней назад². Основная идея этой работы хороша, а именно, что электромагнитные потенциалы не должны

вводиться в теорию двумя способами, сначала в волновом уравнении электрона, а потом через эйнштейновское уравнение $\Lambda_{\mu}^{\lambda} = a\Phi_{\mu}$, как это сделано в последней статье Вигнера в *Zeits. f. Phys.*³, а должен остаться только второй способ. В Вашей теории есть трудность, на которую указал мне Гейзенберг. В случае отсутствия гравитационного поля Ваши уравнения не превращаются в уравнения моей теории⁴, и прежде чем можно будет принять Ваши уравнения, нужно будет посмотреть, дадут ли они также правильную формулу для тонкой структуры водорода, что на первый взгляд не кажется очень вероятным. Гейзенберг сам занимается вопросом о согласовании квантовой теории электрона с новой теорией Эйнштейна, и то же делает Вейль (его я встретил в Принстоне⁵), так что Вам будет с кем соревноваться, если Вы продолжите работу, но пусть это Вас не останавливает⁶.

Я приехал в Мэдисон недели две тому назад, после того как провел несколько дней в Нью-Йорке и Принстоне. Я останусь здесь до конца мая и прочту курс лекций по квантовой механике, а потом уеду в Мичиганский университет в Анн-Арборе.

Я думаю, что уеду из Америки в середине августа, приблизительно в то же время уедет и Гейзенберг, так что мы вместе отправимся в Японию⁷. После этого Гейзенберг будет возвращаться через Индию, а я через Сибирь. Из Японии я надеюсь уехать около 20 сентября. Я бы хотел узнать, что нужно делать, чтобы получить русскую визу, и был бы очень рад, если бы Вы смогли помочь мне в этом деле. Здесь, в университете есть один англичанин, который тоже думает, что, может быть, поедет через Сибирь, и хочет узнать, как достать визу. Еще я был бы очень рад любой информации, которую Вы могли бы сообщить о поездках через Сибирь и об относительных преимуществах поездки через Владивосток или через Мукден⁸.

Надеюсь увидеть Вас в Москве в начале октября,

искренне Ваш

П. А. М. Дирак

Я не знал, что Вы можете так хорошо писать по-французски⁹.

¹ Статья И. Е. Тамма «О связи эйнштейновской единой теории поля с квантовой теорией» (*Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 1929. Vol. 32. P. 288–291). С просьбой о публикации Тамм обратился к Эренфесту, а тот представил ее не в парижский *Comptes Rendus*, а в Доклады Амстердамской академии, где она и была опубликована. Идентичный текст опубликован также в «Журнале прикладной физики» (1929. Т. 6. С. 130–133). О содержащейся в статье ошибке и ее исправлении см. письмо от 27.05.1929 г.

Содержание статьи связано с двумя статьями Эйнштейна, вышедшими в свет в январе 1929 г. в «*Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. (Berlin)*». Эйнштейн предпринял попытку создать новую единую полевую теорию гравитации и электромагнетизма, основанную на понятии о «дальнем параллелизме». (Подробнее см.: *Визгин В. П. Единые теории поля в первой трети XX века*. М.: Наука, 1985. 303 с.) Этот вариант единой теории привлек внимание многих квантовых теоретиков, поскольку, казалось, существовала заманчивая возможность включить в эту геометрическую теорию уравнение Дирака для электрона. Тамм откликнулся одним из

первых, кроме него работы на эту тему опубликовали в 1929 г. Е. Вигнер, Н. Винер, М. С. Валларта, Г. Вейль, М. А. Леонтович, В. А. Фок, Д. Д. Иваненко. Эта проблема даже стала основной темой теоретической конференции в Харькове (примеч. 1 к письму от 27.05.1929 г.). Теория Эйнштейна вскоре была забыта, но все же это направление не оказалось бесплодным: положительным результатом стало то, что в конце 1929 г. Фок и Вейль записали уравнение Дирака в общей теории относительности.

Можно высказать предположение о том, как Тамм обратился к этой проблеме. В письме от 24.02.1929 г. Джеймс Белл прислал Тамму вырезку из английской газеты (точное название газеты установить не удалось), озаглавленную: «Einstein's new theory. A Hint of its meaning» (выпуск газеты от 22.02.1929 г.). В ней анонимный корреспондент популярно излагает суть программы единой теории поля. Указав, что изобретенная Эйнштейном «Вселенная» включает в себя все эффекты гравитации и электромагнетизма, автор заканчивает следующими словами: «Но есть еще другая Вселенная, а именно та, которая согласованно удовлетворит квантовым явлениям наряду с гравитацией и электромагнетизмом. Кто изобретет ее? Дирак, возможно», а Белл, переправляя заметку Тамму, пишет: «Я прилагаю также вырезку из обычной прессы относительно последней работы Эйнштейна, которая, возможно, заинтересует тебя, поскольку именно от Дирака ожидают великие дела». Не исключено, что именно эта заметка с именем Дирака послужила Тамму поводом для знакомства с теорией Эйнштейна. Если да, то его статья была написана за 10 дней — с 4 марта, когда он получил письмо Белла, и до 14 марта, когда статья была представлена в «Журнал прикладной физики».

² Одновременно с Дираком в Америке находились также В. Гейзенберг и Г. Вейль, они читали лекции соответственно в Чикаго и Принстоне. История контактов Гейзенберга с Дираком и их совместной поездки в Японию изложена в ст.: *Braun L., Rechenberg H. Paul Dirac and Werner Heisenberg — A partnership in science* // Paul Adrien Maurice Dirac: Reminiscences about a great physicist. Cambridge: Univ. press, 1987. P. 117–162; они, правда, считают, что Гейзенберг приезжал в Мэдисон, а не Дирак в Чикаго, как написано в этом письме. Из чикагских лекций Гейзенберга возникла потом кн.: *Heisenberg W. The physical principles of quantum theory*. Chicago: Univ. Chicago press, 1930. XII+186 p.

³ *Wigner E. Eine Bemerkung zu Einsteins neuer Formulierung des allgemeinen Relativitätsprinzips* // *Ztschr. Phys.* 1929. Bd. 53. S. 592–596.

⁴ Т. е. в уравнение Дирака, на основе которого была рассчитана тонкая структура спектра водорода.

⁵ См. примеч. 2.

⁶ Гейзенберг ничего не опубликовал на эту тему. Статья: *Weyl H. Gravitation and the electron* // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 1929. Vol. 15. P. 323–334 — и еще две аналогичные, следовавшие за ней.

⁷ См. примеч. 2.

⁸ В это время дипломатические отношения Англии с СССР были разорваны, и поэтому для Дирака существовали некоторые дополнительные трудности при получении русской визы. Тамм смог помочь ему в этом. Дорога через Владивосток шла целиком по территории СССР, а через Мукден — частично по китайской территории, по Китайско-Восточной железной дороге (КВЖД), находившейся тогда в совместном управлении СССР и Китая. Как раз осенью 1929 г. на КВЖД произошел военный конфликт между двумя странами и сообщение было прервано. Дирак поэтому поехал через Владивосток.

⁹ Заметка Тамма (см. примеч. 1) была в итоге опубликована на немецком языке, но Дираку Тамм прислал рукопись на французском. Она находится сейчас в архиве Дирака в Chirchill College.

27 мая 1929 г., [Москва]

Дорогой Дирак,

я ужасно рад, что Вы приедете в Москву. Меня не было в Москве почти месяц (часть этого времени я был в Харькове на конференции теоретиков¹, куда Вас приглашали и где я познакомился с Йорданом), недели за две я соберу всю информацию о визах, лучшем пути и т. д. и напишу Вам об этом.

Несколько человек указали мне, что я сделал ошибку: не симметризовал волновое уравнение, которое предложил в статье, копию которой послал Вам (она появилась не в *Comptes Rendus*, но в «*Amsterd. Proceed.*»). Теперь я нашел, что правильная форма уравнения такова: $(kA^{\nu}p_{\nu} + \bar{k}p_{\nu}A^{\nu} + mc)\psi = 0$, где k — число, удовлетворяющее условию $k + \bar{k} = 1$ (черта означает комплексное сопряжение). Если положить $k = (1 + in)/2$, то n будет пропорционально заряду частицы. Собственные значения и четырехвектор тока будут действительными².

Ваш

Иг. Тамм

¹ Первая в СССР конференция по теоретической физике состоялась в Харькове 19–25 мая 1929 г. В ней участвовали практически все советские теоретики, а также несколько иностранных, в их числе П. Йордан и В. Гайтлер из Германии. Доклады конференции опубликованы в «*Phys. Zeitschr.*» (1929. Jg. 30, N. 19, 20). Тамм сделал два доклада (один — совместно с М. А. Леонтовичем) об эйнштейновской единой полевой теории. Подробнее о конференции см.: *Обреимов И. В.* Развитие естествознания за 50 лет: Препр. Харьк. физ.-техн. ин-та, 1973. 50 с.

² Об этой ошибке см. также письмо Тамма Эренфесту в «Воспоминаниях о Тамме» (С. 297). Одним из тех, кто указал Тамму на ошибку, был Х. Казимир. Исправление дано Таммом в апреле в ст. «Новая теория Эйнштейна и теория квантов» (*Comptes Rendus*. 1929. T. 188. P. 1598–1600), а также в ст. «Эйнштейновская единая теория поля и квантовая теория» (*Phys. Zeitschr.* 1929. Jg. 30. S. 652–654), отсюда и взяты уравнения этого письма.

И. Е. Тамм — П. Дираку

5 февраля 1930 г., Киев

Дорогой Дирак,

благодарю Вас за отклик¹, который я получил несколько дней назад, проезжая через Москву. Проф. Эренфест, который был в Москве в конце декабря, показал мне копию Вашего письма проф. Бору от 26.11.², так что основную идею я уже знал. Идея поставить на голову весь вопрос об отрицательной энергии и из предположительной трудности создать единую теорию электричества — как только с ней познакомишься — молниеносно становится очевидной! Я искренне надеюсь, что Вам удастся вычислить массу протона и тем самым подтвердить всю теорию.

Обсуждение комптоновского рассеяния, которого еще не было в Вашем письме к Бору, было для меня особенно интересным.

Ведь в последнее время я работал именно над этим затронутым Вами вопросом³. И я также нашел, что промежуточные состояния с отрицательной энергией играют при комптоновском рассеянии очень важную роль (что доказывает физическое значение этих состояний), но не мог разрешить обсуждаемое в Вашей статье относящуюся к этому трудность, так что Ваши объяснения были для меня особенно желанными. Я пока что не могу как следует понять, почему очень важное вообще взаимодействие электронов отрицательной энергии можно не учитывать при расчете переходов с промежуточным состоянием, имеющим отрицательную энергию⁴.

Что касается моей работы, то я использовал данные Вами и Гейзенбергом с Паули методы квантования (дираковское волновое уравнение электрона, квантование ψ -волн и световых волн, статистику материи Дирака—Ферми)⁵. Но я вычислял с обычными (без дополнительного ϵ -члена) максвелловскими уравнениями и положил $\phi = \Phi_4 = 0$. Далее, вычислял я не со стоячими, а с бегущими волнами света и материи; а чтобы спектр оставался дискретным, я ввел (согласно Борну) условие «циклической решетки»⁶, т. е. условие пространственной периодичности поля*.

Окончательные результаты: формула рассеяния отличается от данной Клейном и Нишиной⁸ в члене не только второго, но уже *первого* порядка по $\alpha = hv/(mc^2)$. В экспериментально исследованной области γ -лучей (приблизительно от $\lambda = 2 \cdot 10^{-10}$ см до $\lambda = 0.5 \cdot 10^{-10}$ см) разница между новой формулой рассеяния и формулой Клейна — Нишины остается малой (где-то $< 5\%$), так что согласие с экспериментом сохраняется. Но эта разница растет с ростом ν , так что для проникающего космического излучения вычисленные по новой формуле длины волн получаются раза в 3—3,5 меньше, чем вычисленные по Клейну — Нишине (может быть нужно поэтому космическое излучение, вслед за Боте, трактовать как корпускулярное излучение?)⁹.

Хотя, конечно, часть моих выкладок нужно еще раз критически просмотреть, но вообще-то все они закончены, и я собираюсь подготовить работу к печати. Мне, однако, кажется, что из замечания в Вашей статье можно заключить, что эти вопросы уже исследованы Валлером. Если это так, то, быть может, мою работу не нужно публиковать?

С ноября я, наконец, живу в новой квартире — в ней 3 комнаты (и кухня) вместо одной, и я счастлив. Мой адрес: ул. Герцена, 5, кв. 12. Москва, СССР.

В этом году каникулы у нас были не на рождество, а во второй половине января. Я сначала поехал к моему брату¹⁰ неподалеку от Нижнего, где катался на лыжах и научился водить мотоцикл. Это было очень весело, сначала шло плохо, но потом вполне хорошо, пока, наконец, не произошла авария: лошадь вдруг испу-

* В Zs. f. Ph. скоро появится моя работа⁷, в которой я, используя те же методы, распространил Вашу теорию на рассеяние света в твердых телах.

галась мотоцикла и бросилась с санями в сторону так далеко и неожиданно, что я врезался в сани и повредил машину. Но на следующий день катание на мотоцикле опять началось.

Я сейчас нахожусь у родителей в Киеве, но завтра должен поехать назад в Москву.

Как дела с Вашей книгой¹¹? Если Вы ее еще не закончили, то, наверное, потому, что не имели времени из-за работы над новой теорией. Однако это действительно правда, что Вы свои лучшие работы всегда делаете зимой¹².

Простите, что я пишу по-немецки, а не по-английски. Это мне намного проще.

Искренне Ваш

Иг. Тамм

Как прошел перелет из Ленинграда в Берлин? И как себя чувствует человек, вернувшийся на родину после кругосветного путешествия?

¹ Только что опубликованная работа Дирака (26). Уравнение Дирака имеет класс решений, соответствующих отрицательной энергии электрона, и с самого начала интерпретация этих решений вызвала трудности. В своей статье Дирак предложил следующее решение проблемы. Практически все состояния с отрицательной энергией заполнены («море» электронов), а принцип Паули запрещает электронам с положительной энергией переходить в эти, уже занятые, состояния. Незанятые состояния с отрицательной энергией («дырки») будут вести себя, как частицы с положительным зарядом, Дирак предложил интерпретировать их как протоны. Разницу в массах электрона и протона он надеялся объяснить, утягивая взаимодействие «отрицательных» электронов.

Тамм был одним из немногих физиков, решительно поддерживавших идею Дирака. Он опубликовал русский перевод статьи Дирака в «Успехах физических наук» (1930. Т. 10. С. 5), снабдив его своим предисловием.

Отождествление дырок с протонами оказалось ошибкой. Накапливающиеся возражения побудили Дирака в 1931 г. объявить их новым видом частиц и тем самым предсказать позитрон, что было триумфально подтверждено открытием позитронов Андерсоном в 1932 г. (Подробнее см.: Кобзарев И. Ю. К истории позитрона // Наст. сб.)

² В этом письме, текст которого недавно опубликован (*Moyer D. F. Evaluations of Dirac's electron, 1928-1932 // Amer. J. Phys. 1981. Vol. 49. P. 1055-1062*), Дирак впервые изложил идею своей статьи (26).

³ Вопрос о том, как оказывается возможным описать комptonовское рассеяние в теории дырок, обсуждается Дираком в конце его статьи без вычислений. Дирак, в частности, указывает (ссылаясь на сообщение, полученное им от И. Валлера), что существенную роль при этом будут играть процессы, при которых в промежуточном состоянии электрон принимает отрицательное значение энергии, а в конечном — опять положительное. (Сам Валлер в своей статье пишет, что первым этот результат получил Гейзенберг, но не опубликовал его.)

Вычисление комptonовского рассеяния и строгий вывод полученной ранее полуклассическим методом формулы Клейна-Нишины для сечения рассеяния (*Klein O., Nishina Y. Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac // Ztschr. Phys. 1929. Bd. 52. S. 853-868*) содержится в трех статьях: И. Валлера (примеч. 1 к письму от 21.02.1930 г.), П. Дирака (27) и Ч. Е. Тамма (примеч. 5 к настоящему письму).

⁴ Трудность Тамм видел в том, что при расчетах учитывалось только взаимодействие электрона и дырки, а не электрона со всем «морем от-

рицательных электронов». Между тем последнее взаимодействие в теории дырок считалось очень важным — ведь именно к нему Дирак надеялся свести разницу масс протона и электрона. При расчете же комpton-эффекта правильный результат получился и без него, как будто оно не влияло на процесс.

Впоследствии выяснится, что «море электронов» действительно никак не проявляет себя и надо принимать в расчет только дырки-позитроны, да и вообще всю теорию можно переформулировать без введения моря. Здесь и далее речь идет о ст.: *Тамм И. Е. О взаимодействии свободных электронов с излучением по дираковской теории электрона и по квантовой электродинамике // Ztschr. Phys. 1930. Bd. 62. S. 545–568. Тамм основывается на аппарате ст.: Heisenberg W., Pauli W. Zur Quantendynamik der Wellenfelder // Ztschr. Phys. 1929. Bd. 56. S. 1–61.*

Упомянутый им дополнительный ϵ -член — член, добавленный Гейзенбергом и Паули в лагранжиан поля, для того чтобы к электромагнитному полю можно было применить развитый ими последовательный способ квантования. Этот член использовался в промежуточных выкладках, а в окончательных результатах полагался равным нулю. Введение ϵ -члена всем показалось слишком искусственным приемом, и в следующей статье (*Ztschr. Phys. 1930. Bd. 59. S. 168*) Гейзенберг и Паули обошлись без него. Для квантования излучения его можно было вообще не вводить, что Тамм и делает.

⁶ Чтобы квантовать поле, его надо превратить из системы с континуумом степеней свободы в систему с хотя бы счетным числом степеней свободы. Это можно сделать или рассматривая поле в замкнутом объеме (тогда его можно разложить по собственным колебаниям этого объема) либо наложив условие, что поле периодически в пространстве. Эти так называемые циклические условия Борна–Кармана впервые были использованы для квантования упругих волн в твердом теле.

Тамм также сначала применил их в теории твердого тела в своей предыдущей статье (см. примеч. 7).

⁷ О квантовой теории молекулярного рассеяния света в твердых телах // *Ztschr. Phys. 1930. Bd. 60. S. 345–363*, датирована декабрем 1929 г. В этой статье Тамм дал квантовомеханическую теорию комбинационного рассеяния света в твердых телах, открытого в 1928 г. Г. С. Ландсбергом и Л. И. Мандельштамом, ввел понятие о квантах упругих колебаний, названных позже «фононами». Он использовал при этом теорию излучения и дисперсии света, предложенную Дираком в статьях (17, 18).

⁸ Эти результаты ошибочны, после их исправления получилась в точности формула Клейна–Нишины (см. письма от 21.02. и 3.03.1930 г.).

⁹ Речь идет о работе: *Bothe W., Kolhörster W. Das Wesen der Höhenstrahlung // Ztschr. Phys. 1929. Bd. 56. S. 751–755*, — в которой вопреки общепринятому тогда мнению утверждалось, что космические лучи имеют не электромагнитную, а корпускулярную природу. (Подробнее см.: *Дорман И. В. Космические лучи. М.: Наука, 1981. Гл. 3*).

¹⁰ И. Е. Тамм (1901–1942) — инженер-химик.

¹¹ Книга Дирака (30).

¹² Дирак основные свои работы в эти годы писал зимой, а летом путешествовал, читая лекции или просто отдыхая.

П. Дирак — И. Е. Тамму

21 февраля 1930 г.,
St John's колледж, Кембридж

Дорогой Тамм,

большое спасибо за Ваше письмо.

Я думаю, что было бы очень удивительно, если бы у Вас получилась другая формула для рассеяния излучения свободным электроном. Я сам недавно рассмотрел этот вопрос, и моя работа под-

тверждает формулу Клейна—Нишины. И я думаю, что Вы тоже должны получить ту же формулу с помощью метода квантования волн. Уверены ли Вы, что не ошиблись? Валлер, насколько я знаю, работает со связанными, а не со свободными электронами (там возникает такая же трудность с промежуточными состояниями отрицательной энергии)¹.

Недавно я вычислял вероятность того, что электрон падает в дырку и одновременно испускает два кванта света². Математически это очень похоже на проблему рассеяния — в одном случае два испускания, а в другом одно испускание и одно поглощение. Я получил следующий результат: когда электрон встречается с протоном, то эффективная область, в которую нужно попасть, чтобы они скомбинировали и излучили, имеет порядок величины классического размера электрона или протона.

Я кончил книгу и теперь должен заниматься корректурами³. У меня это не отнимает так много времени, как у вас в Лейдене⁴. Гамов⁵ тут катался на мотоцикле (я думаю, он написал об этом) и также учил этому меня.

Перелет из Ленинграда в Берлин был очень приятным. Разве Вы не получили моего предыдущего письма?

Искренне Ваш

П. Дирак

¹ Первая часть статьи Валлера (*Waller I. Die Streuung von Strahlung durch gebundene und freie Elektronen nach der Diracschen relativistischen Mechanik // Ztschr. Phys. 1930. Bd. 61. S. 837–851*) посвящена рассеянию света на электронах атома, во второй он по совету Паули рассмотрел рассеяние на свободных электронах, т. е. комптоновское рассеяние.

² Статья Дирака (27), где посчитана вероятность аннигиляции электрона и дырки.

³ *The principles of quantum mechanics. Oxford, 1930 (30).*

⁴ Речь идет о первом издании книги И. Е. Тамма «Основы теории электричества» (М.; Л.: Госизд., 1929. Т. 1. XII+473 с.). Тамм потратил много времени на чтение ее корректур сначала в Лейдене, а потом еще в Москве.

⁵ Г. А. Гамов — советский, с 1934 г. американский физик-теоретик. В 1930 г. был в зарубежной командировке в Копенгагене и Кембридже в качестве стипендиата рокфеллеровского фонда (International Education Board).

И. Е. Тамм — П. Дираку

3 марта 1930 г., Москва

Дорогой Дирак,

большое спасибо за письмо: я опять должен признать Ваше всеведение — уже в открытке от 23.2 я написал Вам, что действительно сделал ошибку в вычислениях (неправильный знак у сигуса!) и что формулу Клейна—Нишины изменять не нужно.

То, что Вы написали о вероятности процесса аннигиляции. было для меня очень интересно, особенно потому, что я сам занимался вычислениями этой вероятности, когда получил Ваше письмо¹. Рассмотрев в объеме v свободный электрон с положительной энер-

гией и «дырку», я с помощью вычислений, аналогичных вычислениям рассеяния * нашел, что вероятность аннигиляции в единицу времени равна $Z = (\pi d^2 c/v) f(\beta)$ (1), где d означает классический диаметр электрона ($d = e^2/(mc^2)$), а $f(\beta)$ — функция относительной скорости $\beta = v/c$ электрона и дырки:

$$f(\beta) = \frac{\gamma}{1+\gamma} \left[\frac{1+4\gamma+\gamma^2}{2p} \lg \frac{1+\beta}{1-\beta} - 1 - 3\gamma \right] = \\ = 1 - \frac{3}{20} \beta^4 + \dots; \quad \gamma = \sqrt{1-\beta^2}.$$

Тот факт, что выражение (1) соответствует классической вероятности столкновения между электроном и протоном, имеющим относительную скорость c , вероятно, можно понять в связи с тем фактом, что «скорость»² ca_k имеет собственные значения $\pm c$. Но основные трудности таковы: 1) если (пробно и приближенно) применить формулу (1) к случаю связанного электрона, то получится смехотворно короткое время жизни атома³ и 2) частота излучения, когда электрон падает в дырку, имеет порядок величины mc^2/h , где m — масса электрона, а не протона, и это нельзя согласовать с существованием космического излучения⁴.

Конечно, это трудности того же типа, что и трудность с массой протона, и связаны с необходимостью учесть взаимодействие электронов отрицательной энергии, исчезновение поля электрона и дырки, когда электрон падает в нее, и т. д. Но я не могу понять, почему, несмотря на пренебрежение всеми усложняющими обстоятельствами такого типа, связанными с переходами электрона через состояния с отрицательной энергией, получается правильная формула рассеяния⁵.

Впрочем, совесть подсказывает мне, что стыдно беспокоить Вас всякими ребячьими вопросами⁶.

В этом году у нас исключительно мягкая зима, так что я не мог как следует пользоваться «skies» (я не знаю правильного английского названия для «snow-shoes»), которые я купил.

Я не получал Вашего предыдущего письма, о котором Вы писали в последний раз, — это было первым, полученным мной с лета. Я знаю, что часть моей переписки была утеряна из-за того, что я в прошлом ноябре переехал на новую квартиру.

С наилучшими пожеланиями и искренними приветствиями

Иг. Тамм

¹ В статье Тамма (см. примеч. 5 к письму от 5.02.1930 г.), кроме сечения рассеяния, посчитана вероятность аннигиляции электрона и дырки. Здесь Тамм излагает результаты своей работы.

² В теории электрона Дирака классической скорости можно сопоставить

* Эти вычисления сильно упрощаются, если объединить в одну матрицу (с четырьмя строками и столбцами) четыре набора амплитуд четырех независимых ψ -функций, описывающих возможные состояния электрона с определенным значением импульса p .

оператор с α , но оказывается, что он имеет собственные значения, равные скорости света, хотя электрон движется, конечно, с меньшей скоростью. Как раз в 1930 г. этот вопрос стоял достаточно остро и породил целый ряд статей. Наиболее распространенная интерпретация этого факта основывается на статье Э. Шредингера (Über die kraftfreie Bewegung in der relativistischen Quantenmechanik // Sitz. Preuss. Akad. Wiss. Berlin, 1930. S. 418–428), показавшего, что на усредненное движение волнового пакета накладываются «дрожания», происходящие со скоростью света.

³ Порядка 10^{-3} с, если в выражение для сечения поставить массы протона и электрона.

⁴ Популярная в 20-е годы гипотеза Эддингтона–Джинса о том, что космическое излучение возникает вследствие аннигиляции в звездах протонов и электронов. (Подробнее см.: *Bromberg J. Concept of particle creation before and after quantum mechanics // Historical Stud. in Physical sciences. 1976. Vol. 7. P. 161–182.*) Тамм здесь имеет в виду, что если будут аннигилировать две частицы с массой электрона, то выделившейся энергии будет недостаточно для того, чтобы образовать излучение очень высокой частоты, из которого, тогда считалось, и состоят космические лучи. Это вряд ли серьезный аргумент, так как ни Тамму ни Дираку не было ясно, какую именно массу надо подставлять в выражение для сечения. См. статьи Тамма (примеч. 5 к письму от 5.02.1930 г. С. 547), Дирака (27. С. 375) и письмо от 20.03.1930 г.

⁵ См. примеч. 4 к письму от 5.02.1930 г.

⁶ Это совсем не «ребяческие» вопросы – Дирак и сам не имел ответа на них. Упоминаемые Таммом трудности – одни из тех, что в конце концов привели Дирака к признанию, что дырка не может быть протоном, и к предсказанию позитрона в статье (33).

II. Дирак — И. Е. Тамму

20 марта 1930 г.,
St John's колледж, Кембридж

Дорогой Тамм,

большое спасибо за письмо. Я рад, что Вы теперь получили правильную формулу Клейна–Нишины. Ваш результат для вероятности аннигиляции также согласуется с моим (в случае, если под вероятностью в единицу времени Вы на самом деле понимаете эффективную область, в которую нужно попасть), так что это тоже, вероятно, правильно¹. Я не понимаю, почему Вы пишете, что m в формуле должна быть массой электрона, а не протона. Я бы подумал, что она должна быть чем-то средним, так как теория симметрична для электрона и протона², и это даст правильную энергию космического излучения. В настоящее время теория предсказывает, что электрон и протон должны иметь одинаковую массу, и, следовательно, она неточна и ненадежна во всех вопросах, где нужно принять во внимание это различие. Я думаю, что формула Клейна–Нишины правильна, потому что в процессе участвует только одна, а не две взаимодействующие частицы.

В моем прежнем письме, которое Вы не получили, я написал, что послал 75 R. M. в книжный магазин Hirschwald⁴, а на Ваш счет³, как мы и договорились в Москве. Надеюсь, что они Вам пригодятся.



П. Дирак (30-е годы).
Фотография из архива П. Л. Капицы

Как дела с ездой на мотоцикле? Я ездил на гамовском мотоцикле, и меня засняли на пленку за этим занятием (так что у меня есть положительное доказательство).

С наилучшими пожеланиями,
искренне Ваш

П. А. М. Дирак

Прочитав еще раз Ваше письмо я увидел, что v — это объем, а не скорость, так что все правильно¹.

¹ Имеется в виду формула (1) из письма от 3.03.1930 г. В начале письма Дирак считал v скоростью, а не объемом, поэтому делал оговорки, признавая правильность формулы.

² Эту идею Тамм вставил в свою статью (см. примеч. 5 к письму от 5.02.1930 г. С. 547) со ссылкой на Дирака.

³ Книжный магазин в Берлине. R. M. — немецкие марки (Reichsmark).

П. Дирак — И. Е. Тамму

9 июля 1930 г., Харьков¹

Дорогой Тамм,

спасибо за открытку. У меня также имеются трудности, препятствующие планируемой нами экскурсии на Кавказ. По советским законам, если я буду в России больше месяца, то при

отъезде я не смогу взять с собой никаких зарубежных денег (и конечно, русских тоже), так что обратный путь мне придется проделать без денег. Чтобы этого избежать, я должен уехать из России в течение месяца, то есть не позже 27 июля. Завтра Эльзассер² и я направляемся в Гагры, откуда сделаем несколько вылазок. Иваненко возвращается в Ленинград. Я думаю уехать из России на корабле из Одессы в Венецию 22 июля, так как позже нет никаких рейсов до августа. Чтобы написать мне, Вы можете использовать адрес: Gargri, Poste restante (переведя на русский).

С наилучшими пожеланиями

от П. А. М. Дирака

Я был бы очень рад, если бы Вы смогли прислать мне марки с портретом Заменгофа³. Лучше отправьте их в Англию.

¹ В самом конце июня — начале июля Д. Д. Иваненко организовал небольшую встречу теоретиков в Харькове, в Украинском физико-техническом институте. Полный список участников нам не известен. Кроме упомянутых Дирака, Эльзассера, Тамма и Иваненко, там были также В. А. Фок, Я. И. Френкель. Дирак привез в Харьков корректуры своей книги по квантовой механике (30) и передал их Иваненко для перевода на русский язык. Перевод вышел в 1932 г.

По дороге в Харьков с Дираком случился известный инцидент. Он приехал в СССР не через тот пограничный пункт, который был указан в визе, и поэтому был задержан на границе дня на три, пока вопрос выяснялся.

Из Харькова Тамм вернулся в Москву, чтобы готовиться к давно запланированному горному путешествию совместно со своим шотландским другом, альпинистом Джеймсом Беллом. В Харькове он обсуждал с Дираком возможность того, что Дирак присоединится к ним, но это организовать не удалось.

² В. Эльзассер — немецкий теоретик, ученик М. Борна. В 1928 г. был ассистентом Эренфеста в Лейдене, где и познакомился с Таммом.

³ В 1927 г. в СССР были выпущены марки, посвященные эсперанто с портретом изобретателя этого языка доктора Заменгофа. Тамм прислал их Дираку со следующим письмом.

И. Е. Тамм — П. Дираку

13 сентября 1930 г., Москва

Дорогой Дирак,

я был очень расстроен, что не смог встретиться с Вами во время Вашего пребывания в России. Ничего нельзя было сделать — у меня были обязанности перед моими английскими друзьями, которых я пригласил в горы. С другой стороны, оказалось невозможным устроить все так, чтобы встретиться с Вами в горах, в конце наиболее напряженного участка маршрута, поскольку были основания предполагать, что уже в походе нам может быть придется изменить предполагаемый маршрут, не имея возможности связаться с Вами, — так в действительности и случилось, и вместо пути через Баксан в Абхазию нам пришлось идти через Чегем

в Сванетию. И, last but not least,— когда я вернулся в Москву из Харькова и обдумал ситуацию, то трудности и опасности путешествия предстали передо мной в ином свете, чем это было в Харькове, и я, честно говоря, не почувствовал себя вправе склонять Вас к этому мероприятию, хотя мне и трудно было отказаться от удовольствия общения с Вами ¹. <...>

На физическом съезде в Одессе ² я встретил Паули и был очень рад познакомиться с ним. Паули рассказал нам, что он строго доказал, что система, состоящая из m электронов положительной энергии и n «дырок» в распределении электронов отрицательной энергии обладает точно той же энергией, что и система из m дырок и n электронов, если электроны имеют скорости, которыми раньше обладали дырки, и наоборот. Паули заключил, что, по Вашей теории протонов, взаимодействие электронов не может нарушить равенство масс электрона и протона ^{*}. Я был бы очень рад услышать, что Паули ошибается ³.

В Харькове я обсуждал с Вами возможность рассеяния излучения парой электронов, когда один электрон поглощает налетающий фотон, а другой — излучает рассеянный ⁴. Теперь я увидел, что такие процессы невозможны, поскольку члены суммы

$$\left| \sum_{\alpha''} \frac{(\alpha' | v | \alpha'')(\alpha'' | v | \alpha')}{E_{\alpha''} - E_{\alpha'}} \right|^2$$

попарно сокращаются, если конечные состояния электронов отличаются от их начальных состояний. Только в случае, рассмотренном Вами в «Теории протонов», т. е. когда начальное состояние одного электрона совпадает с конечным состоянием другого, такие процессы могут происходить. Мне было очень интересно обнаружить, что Ваше утверждение: «... тот факт, что промежуточное состояние при двойном переходе, будучи занятым вторым электроном, не влияет на вероятность перехода» — может быть доказано только, если учесть, что волновые функции электрона содержат знаковый множитель («Vorzeichenfactor») Йордана—Вигнера $v_m = \pi (1 - 2N_k)$ ⁵. Почему Вы не отметили это в Вашей статье? $k \leq m$

Я сейчас кончаю статью о теории селективного фотоэффекта в металлах и думаю, что его механизм совсем не такой, какой предложил Фаулер в своей последней работе ⁶.

Прошу прощения за такое длинное и плохо написанное письмо. С наилучшими пожеланиями, искренне Ваш

Иг. Тамм

Р. S. Извините, пожалуйста, что так поздно посылаю Вам марки. Есть только один тип марок с портретом доктора Заменгофа — марки, которые я посылаю, отличаются только водяными знаками.

^{*} Конечно, еще остается выход в предположении, что число электронов в мире не равняется числу дырок, но это выглядит очень искусственным.

Новая Советская Энциклопедия заказала мне написать биографический очерк о Вас. Не могли бы Вы прислать мне небольшую автобиографическую заметку с разрешением использовать ее в этой статье? ⁷

И еще одна просьба — нельзя ли прислать мне оттиски Ваших последних статей в «Cambridge Proceedings»? ⁸

Ваш *Иг. Тамм*

- ¹ Поход, действительно, был трудный, в частности его участники совершили первое советское восхождение на вершину Башиль-Тау на Центральном Кавказе.
- ² VII съезд русских физиков, он же — Первый Всесоюзный съезд русских физиков, состоялся в Одессе 19–24 августа. (Подробнее о нем см.: Сообщения о научно-технических работах в республике. Вып. XXIX. Л., 1930. С. 1–97; Френкель В. Я. К ранней истории нейтринно // Физика: Проблемы, История, Люди. Л.: Наука, 1986. С. 232–242.
- ³ Паули был очень критически настроен по отношению к дираковской теории дырок. Кроме него, на то, что массы электрона и дырки должны быть равны, указал также Вейль (*Weyl H. Gruppentheorie und Quantenmechanik* 2. Aufl. Leipzig, 1931. Kap. IV, § 6).
- ⁴ В теории дырок комптоновское рассеяние могло происходить так, что в промежуточном состоянии электрон имел отрицательную энергию. Будет ли проходить процесс, если это промежуточное состояние занято другим электроном? Дирак в статье (26) разъяснил этот вопрос. Просто в этом случае сначала электрон фона поглотит фотон и перейдет в область положительных энергий, а потом в образовавшуюся дырку свалится начальный электрон, испустив при этом рассеянный квант. В процессе, таким образом, участвуют как бы два электрона, причем конечное состояние излучающего электрона совпадает с начальным состоянием поглощающего.
- Тамм исследует вопрос, возможен ли процесс, когда эти состояния не совпадают, и получает отрицательный ответ.
- ⁵ Как было указано, рассеяние в теории дырок физически понималось поразному в зависимости от того, занято промежуточное состояние или нет. Дирак в своей статье написал, что, хотя процессы различны, вероятности их одинаковы и в итоге вероятность рассеяния не зависит от занятости промежуточного состояния. Тамм явно доказывает это утверждение, используя «знаковый множитель» из аппарата вторичного квантования для фермионов. (Этот аппарат был развит в ст.: *Jordan P., Wigner E. Über das Paulische Äquivalenzverbot* // *Z. f. Phys.* 1928. Bd. 47. S. 631–651.) Все эти результаты Тамма, упомянутые им в этом письме, вошли в ст.: *Tamm Ig. Eine Bemerkung zur Diracschen Theorie der Lichtzerstreuung und Dispersion* // *Ztschr. Phys.* 1930. Bd. 65. S. 705–708. В ответном письме Дирак справедливо отмечает, что не обязательно пользоваться вторичным квантованием и тот же результат можно вывести из симметричности волновых функций.
- ⁶ Ст.: *Tamm Ig., Schubin S. Zur Theorie des Photoeffektes an Metallen* // *Z. f. Phys.* 1931. Bd. 68. S. 97–113, — ставшая классической в теории твердого тела. Фаулер Р. Г. — кембриджский теоретик, учитель Дирака. По видимому, имеется в виду ст. *Fowler R. H. A possible explanation of the selective photoelectric effect* (*Proc. Roy. Soc. L.* 1930. Vol. A. 128. P. 123–130).
- ⁷ Присланная Дираком в ответном письме краткая автобиография послужила основой для статьи И. Е. Тамма и Д. Д. Иваненко о Дираке в Большой Советской Энциклопедии (М., 1935. Т. 22. С. 505).
- ⁸ Статьи Дирака (27; 28).

29 декабря 1930 г., Москва

Дорогой Дирак,

с Новым годом, желаю Вам всего наилучшего в 1931!

Большое спасибо за автобиографию и оттиски и простите, что только сейчас благодарю Вас. Как-то получается, что я в основном пишу Вам по какому-то специальному делу, так и на этот раз.

Есть причины надеяться, что я смогу поехать за границу в следующем году в апреле, месяца на 4, хотя вопрос этот еще совсем не ясен. Вы конечно поймете, что в случае, если поездка состоится, я был бы очень рад поработать часть времени (может быть, 1,5 — 2 месяца?) в Кембридже. Напишите мне пожалуйста, удобно ли это будет для Вас. Если да, не мог бы я попросить Вас прислать мне письмо, подтверждающее возможность моего приезда в Кембридж¹.

Каждую осень я надеюсь в будущем году больше времени посвятить научной работе, и каждый год оказывается все менее благоприятным в этом смысле, чем предыдущий. С прошедшей осени у меня было достаточно времени для статьи о фотоэффекте в металлах, которая уже закончена². Вообще я понял, что фундаментальные проблемы квантовой теории слишком сложны для меня, и теперь занимаюсь более легкими приложениями³. В последнее время я особенно интересуюсь теорией металлов и был бы очень рад лично познакомиться с проф. Фаулером, если вообще приеду в Кембридж.

Хотя мы все жалуемся на недостаток времени, мы живем сейчас в России очень насыщенной жизнью, и становящейся с каждым месяцем все более напряженной и насыщенной. Вот Вам вполне случайная иллюстрация тенденций нашей жизни. Я никогда не думал, что столько студентов могут так много работать, как они делают это сейчас. Наши студенты последнего года обучения по собственному почину разделились на «бригады»⁴ человек по пять в каждой и работают и учатся вместе 9 дней из 10 (они решили работать во второй выходной декады)⁵ с 9 утра до 9 вечера с перерывом на 2 часа для еды (в это входит исследовательская работа, которая, конечно, индивидуальна для каждого студента). Разговаривая вчера с бригадой, я обнаружил, что они озабочены тем, что «потеряли без пользы» шесть из 270 рабочих часов прошлого месяца! Это, конечно, преувеличение, студенты переутомляются, и мы, преподаватели, стараемся их образумить, но в целом эта история может дать Вам впечатление об основном настроении нашей жизни.

С наилучшими пожеланиями от искренне Вашего

Иг. Тамма

¹ О поездке Тамма в Кембридж в 1931 г. см. ниже.

² См. примеч. 6 к письму от 13.09.1930 г.

³ К фундаментальным вопросам теории элементарных частиц Тамм возвращается в 1934 г.

- ⁴ В 1930 г. в СССР в широкую практику был введен так называемый бригадный метод обучения, при котором основная роль отводилась коллективной самостоятельной проработке студентами учебного материала, а преподаватель намного меньше, чем обычно, занимался объяснением и контролем. Вскоре, однако, произошел возврат к более традиционным методам преподавания.
- ⁵ Рабочая неделя в СССР состояла тогда из 5 дней с одним выходным.

ПОЕЗДКА И. Е. ТАММА В КЕМБРИДЖ

Наш рассказ мы опять составим из цитат из писем Тамма к жене и из отчета, опубликованного в «Воспоминаниях о Тамме», с. 99, 100.

Выехал из Москвы Тамм 29 апреля.

«Берлин — 1—2 мая, Лейден (Голландия) — 3—7 мая. В Лейдене, где я задержался по просьбе Института теоретической физики для доклада на коллоквиуме института и для бесед с сотрудниками... ознакомился с работами по теории металлов, ведущимися как в Лейдене, так и в Гронингене (проф. Р. Л. де Крониг приезжал повидаться со мной)...» (Из отчета).

«Лондон — 8 мая, Кембридж — с 9 мая по 3 июля с отлучками для поездки в Лондон и т. п.» (Из отчета).

«Занятия мои пока идут туговато — как-то ничем определенным еще не увлекся; да и вообще на теоретическом фронте сейчас затишье. Впечатлений же бытовых много.

14-го Дирак возил меня на своем автомобиле (он хорошо правит) в Лондон на заседание Королевского общества... В начале заседания «вводились» в общество вновь избранные члены и в торжественной обстановке вписывали свои имена в старинный фолиант, в который первый вписал свое имя Карл 2-й. Очень понравился мне Ретзерфорд...¹

Постоянные распросы о России... 13.5 Дирак пригласил меня на завтрак к себе в комнату для разговоров о России с одним из Fellow'ов колледжа (античная философия и литература). Разговор вертелся главным образом на том, почему мы не желаем платить довоенных долгов. Потом вообще о политике. Проспорили 4½ часа, так что я даже охрип. Кончилось — как и в случае одного разговора в Лейдене с Эренфестом — шуткой: «тут русские приезжают будто бы для поездки, а на самом деле занимаются пропагандой». Но и кроме шуток, мне кажется, что Дираку не очень нравятся мои речи и, в частности, предстоящее — теперь уже окончательно — 29-го выступление в Лондоне о «Высшем образовании в Советской России», хотя я, прежде чем дать согласие, спросил, не возражает ли он. Показал ему на днях присланное мне из Лондона печатное приглашение-объявление о моем докладе. Дирак спросил: надеюсь, что будет об образовании, а не о политике.

О том же вопросе 5.6 буду говорить здесь в Университет[ском] Обществе по Народн[ому] Просвещен[ию].

Вообще моя поездка пока более содержательна с общественно-политической стороны, чем с научной» (Тамм — жене, 18.05.1931 г.)

«Я все последние дни чувствовал себя очень виноватым в том, что не написал тебе очередное письмо в воскресенье 24-го — но я был вправду очень занят. В четверг вечером Дирак предложил мне сделать одно спешное вычисление в связи с его новой работой², и я «как скаженный» считал $3\frac{1}{2}$ дня без перерыва и кончил его как раз вовремя — Дирак ссылается на меня в своей работе, и я напечатаю небольшую заметку страницы в 4—5. Эта работа чисто математическая, а не физическая, но сейчас у меня есть ряд дальнейших соображений, уже физических, которые могут быть очень интересны, хотя Дирак относится к ним довольно скептически, вернее, не к ним, а к возможности фактически провести соответствующие вычисления (слишком трудно).

С работой разделался в понедельник, а вчера во вторник... докладывал подробно в Физич[еском] обществе свою работу (вместе с Шубиным)³, которую уже докладывал в Лейдене перед большой и избранной аудиторией (помимо кембриджск[их] физиков было 4 американских), и, по-видимому, с успехом.

А послезавтра мой доклад в Лондоне <...> о нем сообщается в «Nature». Между прочим, я, по-видимому, преувеличил недовольство Дирака моим предстоящим докладом — все, по-видимому, в порядке.

И ты неправа, что ко мне плохо относятся. Здесь, в университете, напротив, очень хорошо. Я дважды был на дому у Мотта (за отъездом Фаулера в Америку лучший здешний теоретик — после Дирака, конечно). Со мной «жаждет» совершить прогулку Dr. Чарльзуорт⁴ — необычайно приятный и веселый специалист по римской истории, совсем не похожий на англичанина.

Дирак очень часто... заезжает за мной после «ланча» (в 2 ч) на своем автомобиле, и мы едем далеко за город; бросаем автомобиль в поле и гуляем. Я учу его лазать по трудным деревьям, он прогрессирует, но мажусь я каждый раз как черт.

Белл очень уговаривает меня посетить Шотландию и побывать в горах. Я уговорил Дирака... и надеюсь, что мы вдвоем поедem в Шотландию на неделю после 20-го июня.». (Тамм — жене, 27.05.1931 г.)

«Ты не думай все же, что я только развлекаюсь... В научном отношении мне эта поездка даст меньше, чем прошлая, но работать я, конечно, работаю. Правда, вторая работа, на которую ухлопал $1\frac{1}{2}$ недели целиком, не удалась. Сейчас пишу для печати математическую работу, о которой писал... и, конечно, переделываю и дополняю в чистовике — как всегда! До отъезда из Кембриджа я, помимо отсылки в печать этой статьи, хочу написать еще статью о Высшем Образовании в Сов[етской] России (заделался специалистом в этом вопросе волею судеб) для либерального

еженедельника «New Statesman» — мне предложили ее написать после моей лекции в здешнем студенческом обществе⁵.

Из лиц, с которыми здесь познакомился, наиболее интересные — физик-экспериментатор Блакетт⁶ и его жена итальянка — самые милые приятные и умные из всех (не считая, конечно, Дирака)... Об историке Чарльзуорте уже писал. С Дираком же отношения у меня совсем дружеские — мне кажется, что я чуть ли не самый близкий ему человек в Кембридже.

Уеду я из Кембриджа между 22-м и 26-м июня, вернее последнее... Дирак сегодня предложил, чтобы мы поехали в Шотландию... на его автомобиле, — я, конечно, сразу за это ухватился.

В Шотландии, думаю, всего — в горах, у Белла в Эдинбурге — пробыть около недели и потом, вероятно, прямо из Эдинбурга пароходом на континент. Возможно, что в Голландию не заеду — Эрэнфеста и никого из теоретиков вообще в это время там не будет. Между прочим, когда был в Лейдене, предложил Ретгерсу⁷ поехать в июле со мной в Росток. С другой стороны, Йордан почему-то не ответил на мое письмо к нему в начале мая. На днях написал ему второе. Если почему-нибудь к Йордану не удастся — хотя это и маловероятно, — поеду в какое-нибудь другое место в Германии — Лейпциг (Хейзенберг)⁸ или Геттинген. Но в последнее время мне очень, очень хочется хоть ненадолго к Бору в Копенгаген — мне всегда это хотелось, но я считал это недосыгаемым. Копенгаген — Мекка теоретич[еской] физики, а теперь рассказы Дирака о Боре совсем меня раззадорили. Бор единственный, по-видимому, человек, которого Дирак сам считает выше и крупнее его самого. Впрочем, это, конечно, неосуществимо в этот раз — может быть, в следующий», (Тамм — жене, 12.06.1931 г.)

«Дорогая Наташенька, пишу впопыхах — Белл и Дирак ждут меня — пора отправиться в путь. Позавчера выехали из Кембриджа с Дираком и вчера приехали к Беллу. В Эдинбурге провели 5 часов — можешь себе представить, я не узнал своего университета — ходил около него и, наконец, Дирак спросил полисмена — только тогда опознал.

Сейчас едем на Гебридские острова — красивейший из них — о-в Скай. Вернемся сюда дней через 5—6 и потом на континент.» (Тамм — жене, Auchtermuchty, Шотландия, 25.06.1931 г.)

«После Кембриджа мне здесь и люди и город — хоть он и очень старинный — кажутся серыми, скучноватыми и холодными. Сам Йордан и его семья очень милы, но весь тон жизни здесь несколько чопорный, как в довоенной Германии, непосредственно-ощутительно чувствуется, что Росток — город юнкерски-фашистский...

В городе как-то натолкнулся на магазин, все витрины которого заняты антисемитскими книгами, одни заглавия которых ничем не уступают литературе Союза Русского Народа.

В общем, я напрасно, по-видимому, приехал сюда — кроме Йордана, здесь абсолютно никого нет, Йордан же сам, конечно, интересен, но в последнее время не много работает... В четверг буду докладывать в коллоквиум о работе Дирака и своей, но у меня са-

мого особого рабочего настроения нет. Вообще, мне начинает надоедать за границей.» (Тамм — жене, Росток 12.07.1931 г.)

«Всеми мыслями я уже в Москве, остановка в путанице с деньгами. Передал в банк мою просьбу не пересылать денег в Росток, а задержаться в Берлине, куда я сегодня днем и выезжаю. Если деньги удастся получить, скажем, завтра, то выеду 2-го и приеду в Москву 4-го утром или днем...

В Берлине повидаюсь с Хайкиным и Хаутермансами, которые мне очень нравятся, зайду к Мизесу⁹» (Тамм — жене, Росток, 29.07.1931 г.)

«В Кембридже вошел в курс практически ведущихся там работ по теоретической физике. Особенное значение имело для меня тесное общение с д-р[ом] Дираком — одним из руководящих современных физиков — и беседы с ним по принципиальным проблемам теории квантов и актуальным задачам, стоящим перед ней. В связи с его последней работой я в Кембридже сделал одну работу — «Об обобщенных шаровых функциях и т. д.» Задача ее — математическое исследование движения электрона в поле изолированного магнитного полюса, возможность существования которого отрицается классической теорией, но в последнее время вновь приобрела вероятность в связи с новой работой Дирака, доказавшего, что существование подобных полюсов не противоречит квантовой теории, и полагающего, что они могут играть существенную роль в построении ядер тяжелых атомов <...>

Я много беседовал по научным вопросам с проф[ессором] Капицей, д-рами Моттом, Блэкетом, Гэрри, с бывшими в Кембридже американскими физиками Морсом, Хустоном, Деннисоном и Дикэ¹⁰.

Росток — с 8-го июля по 29. В Ростке <...> основное значение для меня имела совместная работа с проф[ессором] Йорданом по вопросам теории квантов. К сожалению, ограниченность имевшегося в моем распоряжении времени позволила развить только математическую сторону вопроса, наиболее важное и интересное применение разработанных математических методов к интересовавшей нас физической проблеме остается делом будущего. Физическая проблема заключается в разыскании реального, а не формального только синтеза теории квант и теории относительности, выполненная же нами математическая работа состояла в построении неассоциативной алгебры (вернее, алгебры «смягченной ассоциативности»), которая, будучи интересной с чисто математической точки зрения, может, как нам представляется, оказаться необходимой при разрешении указанной физической проблемы <...>¹¹.

Со стороны всех я встретил самое внимательное и предупредительное отношение, а со стороны Дирака и Йордана — прямо заботливое.» (Из отчета, 21.10.1931 г.)

¹ Э. Резерфорд. Здесь и далее по тексту современная транскрипция фамилий известных физиков дается по: Храмов Ю. А. Физики: Биографический справочник. М.: Наука, 1983. 400 с.

- ² Статья Дирака (33). В ней сформулирована знаменитая гипотеза о существовании магнитного монополя и построена теория монополя. Тамм в своей статье «Обобщенные шаровые функции и волновые функции электрона в поле магнитного полюса» (Zeitschr. f. Physik. 1931. Bd. 71. S. 141–150) решил волновое уравнение для электрона, движущегося в поле монополя.
- ³ См. примеч. 6 к письму от 13.09.1930 г.
- ⁴ М. Р. Charlesworth.
- ⁵ В библиографии работ Тамма «Материалы к библиографии ученых СССР, сер. Физики, вып. 16. «Игорь Евгеньевич Тамм 1895–1971». М.: Наука, 1974. 56 с. — такой статьи нет.
- ⁶ П. Блэккетт.
- ⁷ А. Rutgers — голландский физик, в 1928 г. был аспирантом Эренфеста в Лейдене, где и познакомился с Таммом и Дираком.
- ⁸ В. Гейзенберг.
- ⁹ Хайкин С. Э. — московский физик из группы Мандельштама. Ф. Хоутерманс — немецкий физик. Р. фон Мизес — математик.
- ¹⁰ Р. Гёрни, У. Хаустон. Г. Дике (G. Dieke) — немецкий физик, работал в США с 1926 г.
- ¹¹ Поскольку квантовая электродинамика Гейзенберга—Паули (см. примеч. 5 к письму от 5.02.1930 г.) натолкнулась на ряд существенных трудностей, Йордан пытался найти кардинально новый путь к построению релятивистской квантовой теории. Он надеялся, что аналогично тому, как при создании математического аппарата квантовой механики пришлось отказаться от коммутативного закона умножения $AB=BA$, так для создания адекватного формализма релятивистской квантовой теории надо отказаться от строгого выполнения ассоциативного закона $A(BC) = (AB)C$. Эту идею он обосновывал физическими соображениями, связанными с трудностями измерений в релятивистской области (статьи Йордана—Фока и Ландау—Пайерлса 1930–1931 гг.). Тамм принял участие в самом начале его исследований по этому вопросу. Вскоре после возвращения Тамма в Москву Йордан пришел к мнению, что хотя математически теорию с неассоциативной алгеброй построить можно, физического смысла, применимого к указанной проблеме, она не содержит. Он тем не менее продолжил исследования и опубликовал в середине 30-х годов несколько статей, которые заложили основы нового направления в математике: теории так называемых алгебр Йордана. Физического применения эта теория пока не нашла.

И. Е. Тамм — П. Дираку

31 декабря 1931 г., Москва

Дорогой Дирак,

с Новым годом, будьте счастливы!

Мне очень стыдно, что я посылаю Вам поздравления в последний день старого года и еще больше стыдно, что совсем ничего не написал Вам после Кембриджа. Я не понимаю, как это случилось. Не о чем было писать после моего возвращения в Москву в августе. У меня было очень много дел в университете, где число студентов и аспирантов в этом году сильно возросло, и где, кроме лекций, у меня было много общей административной работы¹. Я ненавижу эту работу, но все равно кто-то должен ее выполнять. Как следствие — у меня не было времени на физику, все что я сделал — несколько незначительных рассуждений о металлах². Кроме этого, мне надо было подготовить новое, переработанное и дополненное издание моей книги по электричеству, правка которой давала Вам

повод для шуток надо мной в 1928 г.³ У меня даже не было времени на спорт, и я в этом году еще не ходил на лыжах.

Я надеюсь, что будет больше времени весной, так как значительное число моих лекций кончается 1 февраля.

Я думаю, что Вы уже вернулись в Кембридж⁴. Как Вам понравилась поездка в Америку и особенно Скалистые горы? Стали ли Вы уже опытным альпинистом и возросло ли Ваше увлечение восхождениями? Также я был бы очень рад узнать, что Вы сейчас делаете в физике.

Мне очень понравилось в Ростке. Йордан и его жена были очень добры ко мне, и я принял участие в йордановских исследованиях по «алгебре со смягченным ассоциативным законом $A(BC) \neq (AB)C$ ». Это йордановская идея, что эта новая алгебра будет адекватным видом математики для разработки проблем релятивистской квантовой механики, так как она отвечает неопределенности в измерении отдельной динамической величины (сопряженная при этом не рассматривается). Неизвестно, окажется ли эта идея правильной или нет, но сама по себе математическая работа мне понравилась.

Тем не менее поездка в Росток после Кембриджа была все же моей ошибкой, потому что после Кембриджа любое другое место должно было оказаться несколько скучным. Я всегда буду с удовольствием вспоминать мою жизнь в Кембридже и хотел бы поблагодарить Вас за прекрасно проведенное там время.

Надеюсь, что Вы простите мне долгое молчание. Пожалуйста, передайте привет от меня м-ру и м-с Капица, м-ру Чарльзуорту и всем, кто помнит меня.

Искренне Ваш

Иг. Тамм

¹ С 1930 г. Тамм стал профессором, заведующим кафедрой теоретической физики физико-математического факультета МГУ.

² По-видимому, имеется в виду ст. «Некоторые замечания о теории фотоэлектрического эффекта в металлах» (Physical Review. 1932. Vol. 39. P. 170–172).

³ Основы теории электричества. 2-е изд. соверш. перераб. М.; Л.: ГТТИ, 1932. Т. 1, ч. 1. См. также прим. 4 к письму от 21.02.1930 г.

⁴ Вторую половину 1931 г. Дирак провел в Принстоне в Institute for Advanced Study.

И. Е. Тамм — П. Дираку

5 июня 1933 г., Москва

Дорогой Дирак,

я всегда был плохим корреспондентом, но с годами становлюсь все хуже и хуже. Я очень остро ощущаю, какой вред приносит этот недостаток, поскольку теряю контакт со всеми, даже с самыми дорогими и интересными людьми.

В этом году я много раз собирался написать Вам, особенно после появления статьи Блэкетта и Оккиалини¹. Я хотел бы сказать, что

Ваше предсказание антиэлектрона не имеет себе равных в истории науки. Можно вспомнить Лаверье и Адамса², но Ваш случай отличается от их. Ваше теоретическое предсказание о существовании антиэлектрона, который нестабилен в «обычном пространстве» вне ядра³, представлялось настолько экстравагантным и совершенно новым, что Вы сами не отважились поверить в него и предпочитали скорее отказаться от теории. А теперь эксперимент неожиданно доказал, что Вы были правы и даже подарил Вам нейтрон, с которым «дырка» становится стабильной и образует протон⁴.

Часто приходится слышать, что ненаблюдаемая отрицательная электризация мира, вызванная электронами отрицательной энергии, является метафизическим понятием. Лично я тоже склонен думать, что это понятие в его теперешней форме не найдет места в будущей структуре физики, но тем не менее я думаю, что его надо использовать и с ним надо работать⁵. Понятие о неподвижном и ненаблюдаемом эфире, сформулированное Лоренцом около 1890 г. через 15 лет было изгнано из физики Эйнштейном, но преобразование Лоренца и другие предпосылки работы Эйнштейна вряд ли были бы установлены, если бы это понятие было отброшено с самого начала.

Сам я очень недоволен заканчивающимся сейчас академическим годом. Было много внешних обстоятельств, мешавших работе. Среди прочего мы организовали прошлой осенью новый теоретический отдел в нашем институте⁶, и я должен был много заниматься с рядом аспирантов (research students), которые в будущем, возможно, окажутся полезными, но сейчас требуют внимания и работы. Но помимо внешних, следует признать существование и некоторых внутренних причин, чтобы объяснить мое практически полное научное бесплодие в течение всего года. Я нахожусь в каком-то подавленном состоянии и надеюсь только на то, что экспедиция, в которой я принимаю участие, как-нибудь оживит меня.

В этом году я, наконец, пойду на Тянь-Шань (Центральная Азия), о чем я мечтал много лет⁷. Экспедиция должна изучить практически неизвестный горный район у китайской границы к югу от Хан-Тенгри. Она состоит из двух геологических партий и альпинистской группы, куда я вхожу. Работа в основном будет состоять в трудных подъемах на скалы, но также планируется исследование и, если окажется возможным, восхождение на два высоких пика приблизительно по 6500 м, и я приму участие в одном из восхождений. Мы, альпинисты, должны также выполнить и некоторые работы для геологов. Я уеду из Москвы с последней группой в начале июля и вернусь около 15 сентября. Я полон энтузиазма в связи со всем этим.

В январе я съездил с женой на две недели в Кола Пенингула⁸ и Мурманск за полярный круг. Нам не посчастливилось увидеть северное сияние, но Крайний Север мне очень понравился и среди прочего я прекрасно покатался там на лыжах со снежных гор.

Наилучшие пожелания Фаулеру, Блэккетту, Капице и особенно Чарльзуорту. Помните ли Вы с ним, как мы втроем сыграли

роль странствующих рыцарей и спасли прекрасную даму с плачущим ребенком из потерпевшего аварию автомобиля и из рук шайки безжалостных цыган?

Искренне Ваш

Иг. Тамм

¹ В этом абзаце речь идет о теоретическом предсказании и о последующем экспериментальном открытии позитрона (см. статьи И. Ю. Кобзарева и И. В. Дорман в наст. сб.).

Надо отметить, что предсказание Дирака прошло незамеченным. Даже Тамм, который был в 1931 г. в Кембридже и работал с Дираком, обходит молчанием в своих статьях и письмах вопрос об античастице. Вспомнили о предсказании лишь после того, как позитрон был открыт в космических лучах.

Первым об открытии сообщил Андерсон, но значительная часть советских физиков связали открытие с появившейся позже работой Блэкета и Оккалини.

² Имеется в виду предсказание Нептуна и теоретический расчет его орбиты, сделанные в 1845–1846 г. независимо Дж. Адамсом и У. Ж. Леверье.

³ Эти высказывания неправильны и непонятны с современной точки зрения — позитрон как раз стабилен в вакууме и только в присутствии обычной материи аннигилирует с электроном. Может быть, именно это Тамм называет «нестабильностью в обычном пространстве».

Под «стабильностью антиэлектрона в ядре» Тамм имеет в виду популярную тогда гипотезу о том, что протон (который стабилен) состоит из нейтрона и позитрона. Тамм был ее сторонником, подробно обсуждал ее в письме к Дираку от 21.11.1933 г. (в стой подборке не публикуется) и, в частности, искал способы обойти основную трудность, связанную со спинными частиц. Дирак считал это невозможным (см. письмо от 19.06.1933 г.).

⁴ См. примеч. 3.

⁵ См. также критику понятия о «море отрицательных электронов» В. А. Фоком на 1-й Всесоюзной ядерной конференции в Ленинграде в сентябре 1933 г. (Атомное ядро. Л.; М., 1934. С. 144–145).

Тамм оказался прав в своей оценке этого понятия и в прогнозе на будущее. В частности, в 1933 г. Фок и в 1934 г. Гейзенберг нашли такую формулировку теории позитронов, в которой не было необходимости в «море отрицательных состояний».

⁶ Может быть, имеется в виду Научно-исследовательский институт физики МГУ.

⁷ Об этой экспедиции см. воспоминания В. П. Сасорова «Альпинистский этюд» («Воспоминания о Тамме». С. 202–205). Хан-Тенгри — вершина неподалеку от пика Победы. 6995 м.

⁸ По-видимому, г. Кола под Мурманском.

П. Дирак — И. Е. Тамму

19 июня 1933 г.,
St John's колледж, Кембридж

Дорогой Тамм,

большое спасибо за письмо. Мне следовало написать Вам, но я тоже плохой корреспондент (худший, чем Вы) и постоянно откладываю писание писем.

Чарльзурт и я очень хорошо помним Ваш визит в Кембридж и надеемся, что Вы опять приедете. Помните ли Вы наше лазанье по деревьям? Мне теперь никак не удастся заставить Чарльзурта

лазить вместе со мной. Он говорит, что не будет этого больше делать, пока Вы не приедете опять в Кембридж.

Физика в настоящее время развивается больше с экспериментальной стороны, чем с теоретической, но я продолжаю надеяться, что скоро снова наступит очередь теоретиков. Как и Вы, я не удовлетворен моей исследовательской работой за минувший год, но в отличие от Вас не могу обвинить в этом внешние обстоятельства.

Очень хорошо снова иметь в экспериментальной физике симметрию между положительным и отрицательным электричеством. Большинству теоретиков, например Паули и Бору, совсем не нравится моя теория дырок¹. Эта теория теперь получила дополнительное подтверждение после экспериментального обнаружения возникновения антиэлектронов просто при падении жестких γ -лучей на тяжелый атом². Процесс настолько прост, что кажется, что ядро в нем не участвует и что это просто вариант фотоэлектрического эффекта, когда один из электронов отрицательной энергии, движущийся по гиперболической орбите около атома, поднимается в состояние с положительной энергией и оставляет дырку, или антиэлектрон, на первоначальной гиперболической орбите. Пайерлс, который теперь в Кембридже³, исследовал этот эффект теоретически и получил правильный порядок величины, согласующийся с наблюдениями.

В Вашем письме Вы пишете об антиэлектроне и нейтроне, образующих протон. Этого в действительности не произойдет, так как спин для этого *неправильный*, и он точно также *неправильный* и для образования нейтрона из протона и электрона⁴.

Я надеюсь, что Вы хорошо проведете время в экспедиции и что Вам удастся взойти на вершину 6500-метровой горы. (Экспедиции на Эверест в настоящее время не достигают особенно больших успехов).

С наилучшими пожеланиями от

П. А. М. Дирака

¹ См. переписку Паули (*Pauli W. Wissenschaftlicher Briefwechsel*. N. Y. etc.: Springer, Vol. 2. 1985. 783 p.), в частности: «я не верю в дираковские «дырки», даже если положительный электрон существует» (письмо Паули Блэкетту от 19.04.1933 г.).

² Если γ -квант имеет энергию, достаточную для образования пары, то она может возникнуть при его рассеянии в поле ядра. На возможность рождения антиэлектронов в таком процессе впервые указали Блэкетт и Оккалини (см. примеч. 1 к письму от 5.06.1930 г.). Они работали в Кембридже, и результаты их исследований были известны Дираку.

Экспериментальные исследования, в которых этот эффект был зарегистрирован, были проведены в марте—мае 1933 г. несколькими группами исследователей: Дж. Чедвиком, П. Блэкеттом, Дж. Оккалини в Кембридже, Л. Мейтнер и К. Филиппом в Берлине, И. Кюри и Ф. Жолио в Париже и К. Андерсоном и С. Неддермейером в Пасадене, чуть позже сообщил об аналогичных результатах Д. В. Скобельцын (Ленинград). Вычисления Пайерлса, относящиеся к рождению пары γ -квантом, насколько нам известно, не были опубликованы, но Дирак ссылается на них в своем докладе на ядерной конференции в Ленинграде в сентябре 1933 г. (Атомное ядро. М.; Л.: ОНТИ, 1934. С. 137). Эффект был расчи-

тап сначала приближенно Р. Оппенгеймером и С. Плессетом, затем точный результат получили к концу 1933 г. В. Гайтлер и Ф. Заутер.

³ Р. Пайерлс — немецкий физик-теоретик, не вернулся в Германию после прихода к власти нацистов.

⁴ См. примеч. 3 к письму от 5.06.1933 г.

И. Е. Тамм — П. Дираку

13 мая 1934 г., Москва

Дорогой Дирак,

я только позавчера вернулся из Ленинграда, где провел 3 недели в институте Иоффе¹, и обнаружил здесь Ваше дружеское письмо. Я очень признателен Вам за него, но к сожалению, у меня нет никакой возможности поехать за границу этим летом. Я попробую приехать на атомную конференцию в октябре, но Ваше отсутствие на ней сильно понижает в моих глазах ее привлекательность². В любом случае это очень спорно, что я вообще смогу приехать.

Бор вместе с женой и Розенфельд приехали в Ленинград 30.IV, и я имел возможность познакомиться с ними. Бор произвел на меня очень большое впечатление; его улыбка — очаровательна. Я надеюсь обсудить с ним некоторые физические вопросы в Харькове — в Ленинграде он был очень занят. Теоретическая конференция начинается в Харькове 18-го³.

Я случайно вспомнил в разговоре с Бором нашу с Вами дискуссию прошлой осенью⁴ о боровской теории об отсутствии каких-либо интеллектуальных и психологических различий между национальностями; он рассуждал об этом около часа и, как Вы и предсказывали, полностью убедил меня.

Письмо о теории элементарных частиц, которое я упомянул в своем предыдущем письме от 31.12, не было написано, точнее, оно было написано, но не отослано, так как в последний момент я обнаружил, что моя теория практически совпадает с теорией магнитного нейтрона Паули и ее развитием Оппенгеймером⁵.

Плохо, когда ты не знаком основательно с литературой! С тех пор я послал 2 небольшие заметки в «Доклады» нашей Академии наук (одну из них я прилагаю к этому письму)⁶. Далее, я развил одну неверную теорию и пришел в конце концов к некоторым здравым заключениям — и все это только для того, чтобы убедиться в том, что они практически совпадают с фермиевской теорией β -радиоактивности⁷.

Каково Ваше мнение об этой теории Ферми? Мне очень не по душе представление о нейтрине, но в настоящее время, кажется, нет другого выхода из трудностей. Я прилагаю к письму заметку о некоторых следствиях из теории Ферми⁸. Если Вы найдете ее достаточно интересной, не могли бы Вы направить ее в «Nature»? Не делайте этого, если у Вас возникнут какие-то возражения. Если она окажется слишком длинной, вычеркните из нее, пожалуйста, столько слов и фраз, сколько сочтете нужным.

Все же проблема тяжелых частиц представляется очень трудной. Не кажется ли Вам, что эксперименты Ли и Оже о «возбуждении протонов» могут оказаться очень важными и помочь прояснить вопрос⁹?

Я не поеду этим летом в Китай, как предполагал, — в западном Китае беспокойно¹⁰, а только на Кавказ — в Теберду. Надеюсь ползать по скалам. Иоффе сказал мне, что Бор собирается провести месяц в Теберде со своим сыном. Он возвращается в Копенгаген 27 мая, но, как говорит Иоффе, снова придет сюда в августе. Но я не знаю, насколько это точно.

Я слышал, что Вы занимаетесь опытами по центрифугированию газов. Ну что ж, Ферми и Бор тоже начали проводить эксперименты¹¹.

Иваненко сказал мне, что Вам удалось избавиться от бесконечностей в вычислениях поляризации вакуума¹². Не могли бы Вы написать мне несколько слов о Вашей текущей работе?

Искренне Ваш

И. Тамм

Наилучшие пожелания Чарльзуорту.

¹ Ленинградский Физико-технический институт, директором которого был А. Ф. Иоффе.

² Атомная конференция проходила в Кембридже и Лондоне 1–6 октября 1934 г. Тамм туда приехать не смог, из советских физиков в ней участвовали А. И. Алиханов, А. Ф. Иоффе, Д. В. Скобельцын. Дирак с лета 1934 и до лета 1935 г. был в США, в Принстоне. Труды конференции см.: International Conference on Physics. L., 1935. Vol. 1–2.

³ Конференция по теоретической физике состоялась в Харькове 18–22 мая 1934 г. В ней приняли участие несколько иностранных ученых, в их числе были Н. Бор и Л. Розефельд. Подробнее см. отчет в: УФН. 1934, Т. 14. С. 516–520.

⁴ В сентябре 1933 г. Дирак и Тамм встречались в Ленинграде на 1-й Всесоюзной ядерной конференции, а потом Дирак побывал у Тамма в Москве, прежде чем поехать на Сольевский конгресс (октябрь 1933 г.). О ядерной конференции см.: Атомное ядро. Л.; М.: ОНТИ, 1934. 226 с.; Фронт науки и техники. 1933. № 10–11. С. 139–144; УФН. 1933. Т. 13. С. 768–778; Френкель В. Я. 1-я Всесоюзная ядерная конференция // Чтения памяти Иоффе. Л., 1985. С. 74–94.

⁵ Летом 1931 г. Паули прочел в США ряд лекций, где содержалось, в частности, уравнение для нейтральной частицы со спином 1/2. (Это было еще до открытия нейтрона.) Теория такой частицы развита в ст.: Carlson J. F., Oppenheimer J. R. The impact of fast electrons and magnetic neutrons // Phys. Rev. 1932. Vol. 41. P. 763–792.

⁶ Статьи «Магнитный момент нейтрона» (совм. с С. А. Альшулером) и «К теории элементарных частиц» Докл. АН СССР. 1934 г. Т. 1. С. 455–460; Т. 2. С. 151–155).

⁷ Созданная в начале 1934 г. теория слабых взаимодействий: Fermi E. Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I. // Z. f. Phys. 1934. Vol. 88. P. 161–171.

⁸ Tamm I. g. Exchange forces between neutrons and protons and Fermi's theory // Nature. 1934. Vol. 133. P. 981. В статье Тамм показал, что вследствие обменных эффектов из теории Ферми можно получить взаимодействие между нейтронами и протонами, но оно будет существенно слабее, чем реально существующие силы взаимодействия. В том же номере «Nature» опубликована аналогичная статья Д. Д. Иваненко «Interaction of neutrons and protons».

⁹ Наверное, речь идет об обнаружении γ -излучения при неупругом рассеянии нейтронов на протонах: *Lea D. F. Combination of proton and neutron // Nature. 1934. Vol. 133. P. 24* (опубл. 6.01.1934 г.). *Auger P. Sur les rayons γ produits par le passage des neutrons à travers les substances hydrogénées // Comptes Rendus. 1934. Vol. 198. P. 365–368* (22.01.1934 г.). Ли считал, что процесс происходит через промежуточное связанное состояние – дейтон, а Оже – что промежуточным состоянием является «возбужденный протон» (состоящий из n и e^+).

¹⁰ По-видимому, имеются в виду уйгурские волнения.

¹¹ В 1933 г. Дирак предложил метод разделения изотопов во вращающемся потоке газа и совместно с Капицей начал эксперимент, который, однако, остался незавершенным, так как Капица в 1934 г. вынужден был остаться в СССР. Об этом методе вспомнили потом в годы войны в связи с урановым проектом. (Подробнее см.: *Dalitz R. H., Peierls R. P. A. M. Dirac 1902–1984 // Biogr. Mem. Roy. Soc. 1986. Vol. 32. P. 152–153.*)

Ферми начал публиковать свои знаменитые эксперименты с нейтронами в начале 1934 г.

¹² Дирак предложил процедуру вычитания бесконечностей при вычислении поляризации вакуума в статическом поле в статье (45).

П. Дирак — И. Е. Тамму

7 июня 1934 г.,
St John's колледж, Кембридж

Дорогой Тамм,

я послал Вашу заметку в «Nature», и редактор принял ее вместе с заметкой Иваненко¹. Я прочитаю корректуру.

Я думаю, что теория Ферми удовлетворительна как начало очень сложной темы. Нейтрино, похоже, обеспечивают единственную возможность избежать несохранения энергии, и пока не произойдет чего-нибудь нового, не стоит относиться к ним плохо.

Я еще не решил, поеду ли на Кавказ. Я собирался в августе отправиться в Америку и побывать в горах там. В любом случае я должен быть в Америке в конце сентября, а Кавказ находится совсем в другом направлении. Но перспектива оказаться вместе с Вами и Бором очень соблазнительна. Я написал Бору и прямо спросил, собирается ли он ехать, и если да, то, думаю, поеду и я².

Я вкладываю в конверт оттиски³. Я сожалею, что Вы не можете приехать в Англию.

С наилучшими пожеланиями

искренне Ваш

П. А. М. Дирак

¹ См. примеч. 8 к письму от 13.05.1934 г.

² Бор не смог пойти – в его семье случилось несчастье, утонул его сын Христиан. Дирак также не был в СССР перед поездкой в Америку.

³ В том числе статья «О поляризации вакуума» (см. примеч. 12 к письму от 13.05.1934 г.).

27 апреля 1935 г., Москва

Дорогой Дирак,

я ужасно рад, что Вы приезжаете ¹, и я покажу Вам Днепрогэс, советскую фабрику и Кавказ. Я предполагаю взять Вас в Теберду, расположенную на северо-западной стороне главного хребта. Мы можем комфортабельно устроиться там в Доме отдыха для ученых и совершать всевозможные путешествия в окрестности. Теберда находится на расстоянии 20—25 км от главного хребта, и горы в ее окрестности ниже уровня снега. Но в 20 км от Теберды находится одно из чудеснейших мест, известных мне на Кавказе, — Домбай.

<...>

Начиная с января прошлого года я был полностью поглощен работой по нейтрон-протонному взаимодействию. Прошлой весной я доказал, что теория Гейзенберга — обменные силы между p и n — несовместима с фермиевской теорией β -распада ². Конечно можно попробовать изменить форму фермиевских уравнений, не меняя его основную идею, но я склонен думать, что взаимодействие тяжелых частиц можно было бы лучше объяснить из предположения, что они способны испускать и поглощать нейтрино *паррами* (без всяких электронов и позитронов) и что нейтрино связано с полем взаимодействия тяжелых частиц таким же образом, как фотон связан с электромагнитным полем. Я опубликовал очень короткую заметку об этом в «Nature» (27.XII.34) ³. Основные следствия из гипотезы такие: 1) что кроме очень малых расстояний потенциал меняется как $1/r^5$, т. е. намного медленнее, чем принимается обычно (напр. как $e^{-\alpha r}$), и 2) что нейтроны и протоны полярны по отношению к этим силам, т. е. если пренебречь кулоновскими силами, два протона или два нейтрона отталкивают друг друга с такой же силой, с какой притягивают друг друга нейтрон и протон. Оба следствия не только совместимы с нашим знанием о ядре, но большое количество новых фактов, открытых в последние 2—3 месяца, кажется, свидетельствуют в пользу этой гипотезы. Напр.: а) сечение рассеяния нейтрона на протоне для медленных нейтронов в 8 раз больше, чем для быстрых; б) для медленных нейтронов дейтон-нейтронное сечение в (...раз меньше), чем для быстрых; в) в протон-протонных столкновениях отклонения от закона Кулона хорошо (заметны) уже при подходе на расстояние $5 \cdot 10^{-13}$ см ⁴.

Я сталкиваюсь с большими трудностями в выводе количественных следствий из гипотезы, но надеюсь преодолеть их.

Я с нетерпением жду встречи с Вами в Москве, искренне Ваш

Иг. Тамм

- ¹ Дирак провел почти год в США и возвращается в Европу через Японию, Китай и Сибирь, и они с Таммом опять планируют поход на Кавказ.
- ² См. примеч. 8 к письму от 13.05.1934 г.
- ³ Взаимодействие нейтронов и протонов // *Nature*. 1934. Vol. 134. P. 1010–1011. К концу 1935 г. Тамм понял, что эта гипотеза не согласуется с экспериментальными данными, и отказался от нее (письмо Дираку от 2.01.1936 г., здесь не публикуется).
- ⁴ Возможно, имеются в виду результаты из ст.: а) *Dunning J. R., Pegram G. B., Fink G. A., Mitchell D. P.* Interaction of low energy neutrons with atomic nuclei // *Phys. Review*. 1935. Vol. 47. P. 416–417 (опубликована 1.03.1935 г.), где даны, в частности, такие данные о сечениях рассеяния нейтронов (в единицах 10^{-24} см):

Материал	Медленные нейтроны	Быстрые нейтроны
H	13,3	1,68
D	3,4	1,71

б) *White M. G.* Collisions of high energy protons in hydrogen // *Phys. Review*. 1935. Vol. 47. P. 573–574 (опубликована 1.04.1935 г.), где проводится такое же число: $5 \cdot 10^{-13}$ см.

П. Дирак — И. Е. Тамму

29 мая 1935 г.,
Пасадина, Калифорния

Дорогой Тамм,

мне очень жаль, но оказалось, что мне надо будет вернуться в Англию раньше, чем я ожидал, и я боюсь, что у меня не будет времени поехать с Вами на Кавказ¹. Я очень огорчен всем этим и сделаю все возможное, чтобы приехать в другой раз, как можно скорее. Я думаю, что смогу провести несколько дней в Москве, и был бы очень рад увидеть Вас там, но, пожалуйста, не тратьте из-за меня Ваши каникулы, ожидая меня слишком долго.

Я посылаю это письмо авиапочтой, чтобы оно пришло к Вам раньше, чем мое письмо, написанное вчера, когда я все еще думал, что смогу быть с Вами на Кавказе. Я бы не хотел, чтобы мои изменившиеся планы серьезно помешали исполнению Ваших. Я надеюсь, что Вы хорошо проведете время на Кавказе.

С наилучшими пожеланиями

искренне Ваш

П. А. М. Дирак

¹ Причина отказа в действительности была другая, но Дирак не писал о ней, так как опасался, что переписка контролируется (письма Дирака А. А. Капице от 27.04 и 9.05.1935 г.).

Дирак ехал в Советский Союз для того, чтобы попытаться помочь П. Л. Капице. Осенью 1934 г. Капице не было разрешено вернуться в Англию, в лабораторию, которой он заведовал, и он вынужден был остаться в СССР поначалу без возможности для научной работы.

Эта проблема подробно обсуждается в переписке между женой Капицы — Анной Алексеевной, которая была тогда в Кембридже, и Дираком. (Сейчас эти письма хранятся в архиве П. Л. Капицы в Москве.) Дирак в тот год читал лекции в США. Он попытался помочь Капице, собирал

подписи под коллективным письмом американских физиков правительству СССР, вместе с Р. Милликоном нанес визит в советское посольство.

Собираясь в СССР, Дирак намеревался взять Капицу с собой в поход на Кавказ, но Анна Алексеевна попросила его остаться в августе в Москве (см. ее письмо от 31.05.1935 г. в наст. сб.).

П. Дирак — И. Е. Тамму

7 октября 1935 г.,
St John's колледж, Кембридж

Дорогой Тамм,

очень жалко, что я так мало виделся с Вами, когда был в Москве. Я провел несколько недель в Болшево с Капицей, ведь он был так одинок¹. Надеюсь, что я не испортил Ваши каникулы и что Вы хорошо провели время на Кавказе. Я тихо и с удовольствием пожил в Болшево, несколько раз приезжал в Москву. Однажды я совершил прыжок с парашютом с вышки в парке. Это было здорово. Я думаю, что Вы уже прыгали несколько раз.

Я надеюсь приехать, чтобы увидеть затмение 19 июня 1936 г. Кажется, что место с наиболее вероятной хорошей погодой находится на Кавказе². Начнутся ли Ваши каникулы так рано?

Я еще не начал ни над чем работать здесь в Кембридже. Продвигаются ли Ваши идеи о нейтронах и протонах?³

Наилучшие пожелания от

П. А. М. Дирака

¹ Дирак приехал в Москву 29 июля и пробыл в СССР до 10 сентября, основную часть времени проведя в подмосковном Болшево вместе с Капицей. Тамм был с ними приблизительно до 1 августа, а потом уехал на Кавказ. Подробнее об этом приезде Дирака в СССР см. в опубликованной в наст. сб. переписке Дирака с Капицей.

² Полное солнечное затмение, которое можно было наблюдать с территории СССР.

На Кавказе оно было рано утром, поэтому Тамм сначала посоветовал Дираку поехать в район нижней Волги, где ожидалось и лучшие погодные условия, но потом узнал, что все астрономические экспедиции отправляются дальше на восток (Урал и Сибирь), но зато на Кавказе (Туапсе) будет работать физическая экспедиция во главе с Н. Д. Папалекси. Тамм договорился об участии в ней Дирака, но Дирак не смог поехать туда из-за смерти отца (см. письмо от 17.06.1936 г.).

³ См. письмо от 27.04.1935 г. и примеч. 3 к нему.

П. Дирак — И. Е. Тамму

6 декабря 1935 г.,
St John's колледж, Кембридж

Дорогой Тамм,

большое спасибо за письмо. Мне было очень приятно узнать о Ваших путешествиях по Кавказу. Некоторые из описанных Вами деревень напомнили мне доисторические скальные постройки в Mesa Verde, Колорадо, где дома также построены друг на

друге на обрыве скалы. И там тоже всю работу делают женщины. Что касается затмения, то лучше я поеду туда, где лучше погода — в район Волги, и, может быть, после — на Кавказ¹.

Не могли бы Вы сообщить мне, если появятся какие-либо новости от Иваненко? Многие люди здесь интересуются его судьбой². Не знаете ли Вы, что можно сделать, чтобы пригласить Веблена будущим летом; и Энсона в любое время³? Не могли бы Вы сообщить мне адрес Энсона из письма, которое я оставил у Вас?

Самое интересное в физике сейчас — это перспектива того, что теория Бора—Крамерса—Слэтера (которая принимает, что в процессах излучения нет детального сохранения энергии, а только статистическое) все же верна. Считалось, что эта теория опровергнута экспериментами Боте—Гейгера. Но Шэнкленд в Чикаго недавно повторил этот эксперимент более тщательно и получил отрицательный результат. Если эта новая работа правильна, то она, возможно, означает, что нет точного сохранения энергии во всех процессах, где скорости сравнимы со скоростью света. Тогда не будет больше нужды в нейтринно. Мы оставим сохранение энергии для процессов с небольшими скоростями, так что нерелятивистская квантовая механика останется в силе, но от квантовой электродинамики надо будет отказаться⁴.

С наилучшими пожеланиями от

искренне Вашего

П. А. М. Дирака

¹ См. примеч. 2 к письму от 7.10.1935 г.

² В 1935 г. Д. Д. Иваненко был выслан из Ленинграда во время волны репрессий после убийства Кирова.

³ О. Веблен — американский математик, работал в Принстоне. Энсон — вероятно, физиолог M. L. Anson, работавший в Принстоне в Rockefeller institute for medical research.

⁴ Теория Бора—Крамерса—Слэтера 1924 г. (*Bohr N., Kramers H. A., Slater J. C. The quantum theory of radiation // Philos. Mag. 1924. Vol. 47. P. 785—802*).

Авторы, пытаясь сохранить классическую волновую теорию света, предложили, что законы сохранения энергии и импульса выполняются не в каждом отдельном микроскопическом процессе, а только в среднем, статистически. В 1925 г. эксперименты Боте—Гейгера и Комптона—Саймона показали, что при комптоновском рассеянии законы сохранения выполняются в каждом индивидуальном процессе.

Появившаяся в январе 1936 г. ст.: *Shankland R. An apparent failure of the photon theory of scattering // Phys. rev. 1936. Vol. 49. P. 8—13.* — вызвала бурное обсуждение. Дирак был одним из немногих, кто поддержал эту статью (47).

Вскоре, однако, результаты Шэнкленда были опровергнуты новыми опытами, в частности сам Шэнкленд в статье «The scattering of Gamma-rays» (*Phys. rev. 1936. Vol. 50. P. 571; опубликована 15.09.1936 г.*) признал их ошибочность.



П. Дирак на Кавказе, 1936 г.

И. Е. Тамм — П. Дираку

10 февраля 1936 г., Москва

Дорогой Дирак,

большое спасибо за Ваше дружеское письмо, а также за письмо с приглашением, составленным в таких лестных выражениях, что оно наверняка поможет мне получить возможность поехать за границу¹.

Я получил Ваше письмо только вчера, вернувшись домой после 2-недельного пребывания в Болшево, где Вы жили летом. Мне там нравится больше зимой, когда много снега и можно совершать прекрасные прогулки на лыжах. Однажды я ходил на лыжах к озеру вместе с Капицей (он провел там 2 дня), причем мы выбрали обычный маршрут Ваших летних прогулок.

Несколько недель назад Веблену было отправлено приглашение с предложением приехать весной. Что касается Энсона, я попросил своего друга найти возможность, чтобы пригласить его в институт Баха, и надеюсь в ближайшие дни получить ответ². Я рад сообщить, что я получил письмо от Иваненко из Томска, где он



П. Дирак и И. Е. Тамм на Кавказе, 1936 г

недавно устроился в качестве профессора теоретической физики (в конце концов это оказался совсем не волжский университет). В Томске имеется университет и физический исследовательский институт, второй по значимости из наших провинциальных институтов (после Харькова) ³.

Я напишу сегодня письмо директору Пулковской обсерватории ⁴, он одновременно является председателем советской комиссии по затмению, чтобы узнать все о наших экспедициях по изучению затмения и о возможностях для Вас присоединиться к одной из них. Я сообщу Вам ⁵, как только получу ответ.

Я прочитал статью Шэнкленда в *Phys. Rev.*, о которой Вы мне писали ⁶. Она кажется очень убедительной, но ведь имеется так много фактов, относящихся к области энергий порядка mc^2 (но меньше $137 \cdot mc^2$) ⁷, которые укладываются в современную схему квантовой механики, что я нахожусь в совершенной растерянности. Неужели в физике опять будет катаклизм?

С наилучшими пожеланиями от искренне Вашего

Иг. Тамма

¹ Там надеялся поехать за границу весной 1936 г., чтобы посетить Кембридж, Копенгаген и, возможно, Париж, но эти его планы не осуществились.

² См. примеч. 3 к письму от 6.12.1935 г. Институт Баха — Физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, директором которого был академик А. Н. Бах.

³ Сибирский физико-технический институт в Томске, начавший работать с 1932 г., был, так же как и УФТИ в Харькове, одним из дочерних институтов, отпочковавшихся от Ленинградского физико-технического института.

⁴ Б. П. Герасимович (1889—1937).

⁵ См. примеч. 2 к письму от 7.10.1935 г.

⁶ См. примеч. 4 к письму от 6.12.1935 г.

⁷ Это ответ на предложение Дирака отказаться от квантовой электродинамики — при энергиях порядка mc^2 уже начинаются релятивистские эффекты, и тем не менее они вполне описывались уже существовавшей теорией. Что касается верхнего предела $137 mc^2$, то он связан с широко бытовавшим тогда убеждением, что при этих энергиях квантовая электродинамика становится неприменимой (см., в частности, заключительный параграф кн.: *Гайтлер В.* Квантовая теория излучения. М.; Л.: ГИТТЛ, 1940. 272 с.; книга написана в 1936 г.).

Точно такие же пределы применимости теории были указаны и самим Дираком в его докладе «Теория позитрона» (Атомное ядро, М.; Л.: ОНТИ, 1934. С. 131—132).

П. Дирак — И. Е. Тамму

14 мая 1936 г.,
St John's колледж, Кембридж

Дорогой Тамм,

большое спасибо за письмо. Я очень огорчен, что возникают трудности с Вашей заграничной поездкой. Я уверен, что Бор был бы очень рад, если бы Вы смогли приехать на Копенгагенскую конференцию. Ее начало планируется на 12 июня ¹. Я сам бы тоже хотел приехать в Копенгаген к началу конференции или, если позволит время, на день-два раньше. Не могли бы Вы сообщить мне последний день, когда надо выехать из Москвы, чтобы успеть вовремя в Туапсе? ² Можно ли добраться до Сочи самолетом? Я попросил Капицу устроить мне визу. Из Кембриджа я уеду, скорее всего, 9 июня.

Я пока еще не построил теорию с несохранением. Не всегда удается создать совершенно новую теорию, когда этого хочется. Надо подождать, пока возникнут идеи.

Наилучшие пожелания от

П. А. М. Дирака

¹ На эту конференцию Н. Бор пригласил четырех советских теоретиков: Л. Д. Ландау, И. Е. Тамма, В. А. Фока и Я. И. Френкеля. Их поездка не состоялась. См.: *Френкель Я. И.* Воспоминания, письма, документы. Л.: Наука, 1986. С. 344.

² См. примеч. 2 к письму от 7.10.1935 г.

17 июня 1936 г., Бристоль

Дорогой Тамм,

мой отец умер до моего возвращения¹. Я не думаю, что пробуду здесь очень долго, и надеюсь вернуться в СССР в конце июня и ехать с Вами на Кавказ в июле². Я не могу сообщить точной даты приезда, так как сначала нужно получить визу. Я напишу или протелеграфирую Вам, когда буду знать это более точно. Пожалуйста, сообщите тогда об этом Капице.

Искренне Ваш

П. А. М. Дирак

¹ Дирак, вероятно, успел приехать в СССР, но вернулся в Англию в связи с известием о болезни отца.

² Дирак приехал в СССР в самом конце июня и в июле пошел с Таммом на Кавказ. См.: *Вульфсон К.* Несколько дней на Кавказе с Полем Дираком и И. Е. Таммом // Наука и жизнь. 1979. № 5. С. 68–70.

ПЕРЕПИСКА ДИРАКА с В. А. ФОКОМ

Материалы к истории статьи Дирака—Фока—Подольского*

Дирак и Фок познакомились летом 1928 г. в Геттингене. Фок находился там в командировке, будучи стипендиатом International Education Board, Дирак вместе с Таммом приехали в Геттинген после Лейпцигской конференции (см. наст. сб., переписка Дирака с Таммом).

Научные интересы ученых часто пересекались. Так, в 1929 г. Фок опубликовал ряд статей по теории дираковского электрона, в 1930 г. Дирак и Фок публикуют близкие работы по теории многоэлектронного атома. В 1932 г. Фок энергично поддержал предложенную Дираком новую формулировку релятивистской квантовой теории. История этого эпизода рассказана в статье «Квантовая электродинамика Дирака» в настоящем сборнике. Публикуемые ниже письма содержат важный материал к истории совместной работы Дирака—Фока—Подольского (37).

Дирак очень высоко ценил талант Фока. Их переписка завязалась в 1930 г. Мы публикуем здесь большую часть из сохранившихся довоенных писем.

Письма Дирака Фоку, а также связанные с этой перепиской письма Подольского Фоку и письмо Дирака Подольскому от 2.11.1932 г. хранятся в Ленинградском отделении архива АН СССР (фонд 1034), письма Фока и Подольского Дираку —

* Перевод, публикация и комментарии подготовлены А. Б. Кожевниковым, В. Я. Френкелем, Н. И. Невской, Т. И. Ефремидзе.

в архиве Churchill College, Cambridge. Мы выражаем благодарность профессорам Р. Пайерлсу и Р. Х. Далитцу за содействие в получении копий.

В. А. Фок — П. Дираку

12 февраля 1930 г., Ленинград

Уважаемый д-р Дирак!

Я очень благодарен Вам за отклик Вашей последней статьи¹. Я прочитал ее с огромным интересом, но не могу сказать, что я полностью удовлетворен Вашей новой теорией.

Позвольте мне сообщить Вам некоторые, возникающие в этой связи, сомнения.

Первое: можно ли применять принцип запрета Паули к непрерывному множеству состояний (с непрерывными собственными значениями)? Я всегда думал, что его можно применять только к счетному множеству состояний (дискретные собственные значения), поскольку в формулировке этого принципа необходимо, кажется, нумеровать состояния. Ведь если состояния могут отличаться друг от друга на бесконечно малую величину, никогда нельзя сказать, что заполнены все состояния в некоторой области собственных значений, даже малой. Вы в Вашей теории тем не менее применяете принцип запрета ко всем состояниям, и непрерывным и дискретным.

Второе: бесконечное число электронов отрицательной энергии в единичном объеме вызовет во всем мире бесконечную отрицательную плотность массы. Это должно будет иметь астрономические следствия и, возможно, не будет согласовываться с общей теорией относительности².

Я был бы рад узнать Ваше мнение по этому вопросу.

Я написал статью об обобщении метода Хартри самосогласованного поля, которое учитывает «обменные» эффекты³. Если Вас это интересует, я с удовольствием пришлю Вам копию рукописи.

С наилучшими пожеланиями и дружеским приветом

Ваш В. Фок

¹ Речь идет о статье (26), в которой Дирак предложил свою теорию дырок. О теории дырок см. статьи И. Ю. Кобзарева и А. Б. Кожевникова в наст. сб.

² Аналогичное соображение опубликовано также Р. Оппенгеймером в статье «On the theory of electrons and protons» (Phys. Rev. 1930. Vol. 35. P. 562–563).

³ Речь идет о так называемом методе Хартри—Фока, приближенном методе самосогласованного поля для решения задачи многих тел. Свою идею об обобщении метода Хартри на частицы со статистикой Ферми Фок впервые изложил в письме к П. Йордану от 14.11.1929 г. (ЛОА АН СССР, ф. 1034, оп. 3, д. 72), а затем в ст.: Приближенный способ решения квантовой задачи многих тел // Тр. ГОИ. 1931. Т. 5, вып. 51. С. 1–28, опубликованной также в «Zeitschr. f. Phys.» (1930. Bd. 61. S. 126–148).

21 февраля 1930 г., Кембридж

Дорогой Фок,

я не думаю, что трудности, о которых Вы упоминаете, очень серьезны. Относительно первой из них: всегда можно сделать состояния дискретными, если рассмотреть полость конечного объема. Этого будет достаточно для всех практических применений, и дает возможность придать вполне *определенное* математическое значение всем занятым состояниям с отрицательной энергией.

Вторая трудность с бесконечной плотностью массы может быть преодолена таким же путем, как и трудность с бесконечной плотностью заряда. Просто надо предположить, что вызывает гравитационные эффекты только та масса, которая связана с отклонениями от плотности в *нормальном состоянии*, в котором заняты все состояния с отрицательной энергией и свободны состояния с положительной энергией. Это *нормальное состояние* представляет собой то, что мы называем абсолютным вакуумом, заряд и масса его ненаблюдаемы.

Я буду очень рад познакомиться с Вашей работой о самосогласованном поле с обменными эффектами. Последнее время я сам работал над этим вопросом и получил простую общую формулировку условий для самосогласованного поля¹. Я полагаю, что Ваша работа эквивалентна моей.

С наилучшими пожеланиями

искренне Ваш

П. А. М. Дирак

¹ Статья Дирака (23).

П. Дирак — В. А. Фоку

16 марта 1930 г., Кембридж

Дорогой Фок,

большое спасибо за присланную Вами статью о самосогласованном поле с обменным эффектом, которую я прочел с большим интересом. Ваши результаты согласуются с моими с тем только отличием, что:

(1) — я рассматривал только антисимметричный случай, вводя спиновую переменную вместе с x, y, z , и (2) — в уравнениях я все время использовал d/dt вместо параметра энергии. d/dt -теория работает вполне хорошо даже для системы, которую возмущают извне. Например, легко проверить, что если первоначально все волновые функции были ортогональны, то они всегда останутся ортогональными при любом возмущении, которое симметрично по отношению ко всем электронам.

Что касается Ваших затруднений с непрерывным спектром отрицательных энергий электрона, то я предложил использовать по-

лость лишь в качестве некоего математического приема — для того, чтобы получить возможность решать частные задачи, не пользуясь функциоалами. Могут ли такие полости с непроницаемыми стенками существовать в действительности — не имеет никакого значения. Нет никаких *физических* трудностей при рассмотрении непрерывного спектра занятых состояний, больших чем в случае непрерывного спектра незанятых состояний, поскольку между этими двумя случаями имеется симметрия.

Искренне Ваш

П. А. М. Дирак

П. Дирак — В. А. Фоку

9 ноября 1930 г., Кембридж

Дорогой Фок,

теория фотонов, набросок которой Вы дали в Вашем письме ко мне от 27 сентября¹, представляется вполне самосогласованной и не вызывающей возражений, но я думаю, что это не единственная возможная удовлетворительная теория фотонов. Пока мы рассматриваем только фотоны сами по себе и пренебрегаем их взаимодействием с материей, мы будем знать о них так мало, что, думается, окажется возможным построить много теорий, которые в равной мере были бы удовлетворительными. Я не считаю, что волновая функция фотона совершенно определенно должна удовлетворять уравнениям Максвелла, потому что если бы это было так, то она должна была бы быть нормирована относительно энергии, тогда как все другие волновые функции в квантовой механике нормированы относительно числа частиц. Я думаю, что в настоящее время нельзя сказать ничего определенного о волновой функции фотона. Нужно иметь теорию, которая учитывает взаимодействие фотонов с материей, прежде чем можно будет решить, правильно это или нет.

Я недавно был в Брюсселе на Сольвеевском конгрессе², встретил там великое множество физиков и хорошо провел время.

С наилучшими пожеланиями

искренне Ваш

П. А. М. Дирак

¹ В статье «La mécanique des photons» (Compt. Rend. 1930. Т. 190. Р. 1399–1401) Фок предложил волновое уравнение для фотона, связав его с уравнениями Максвелла. В упомянутом письме от 27 сентября он пишет Дираку о дальнейшем развитии своей теории и о выводе, что координата фотона не является наблюдаемой.

Об этой теории Фока см.: *Кожевников А. Б.* В. А. Фок и метод вторичного квантования // Исследования по истории физики и механики, 1988. М.: Наука, 1988. С. 315–338. Там же опубликованы два письма Фока Дираку от 27.09.1930 г. и 18.11.1930 г.

² Шестой Сольвеевский конгресс проходил с 20 по 25 октября 1930 г.

Дорогой Дирак!

Большое спасибо за отгиск Вашей «Релятивистской квантовой механики»¹. Я изучил ее с огромным интересом. Я рассчитал (вместе с Б. Подольским из Харькова) трехмерный случай и получил в первом приближении (пренебрегая всеми релятивистскими поправками) кулоновское взаимодействие с правильным знаком². Но есть еще и лишние члены, а именно бесконечные константы, умноженные на ϵ_1^2 и ϵ_2^2 . Я рассчитал также случай с Вашим волновым уравнением для электрона³. Я надеялся получить что-то вроде уравнения Брейта для двух электронов. Я нашел, что если пренебречь запаздыванием (чего, правда, в этом случае делать нельзя), то получаются кажущиеся разумными члены взаимодействия, а именно кулоновская сила из скалярного потенциала и члены:

$$-\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{16\pi c} \left[\frac{\sigma_2}{m_1} \left(p_1 \frac{1}{r} + \frac{1}{r} p_1 \right) + \frac{\sigma_2}{m_1} \left(h\sigma_1 \times \text{grad}_1 \frac{1}{r} \right) \right],$$

$$-\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{16\pi c} \left[\frac{\alpha_1}{m_2} \left(p_2 \frac{1}{r} + \frac{1}{r} p_2 \right) + \frac{\alpha_1}{m_2} \left(h\sigma_2 \times \text{grad}_2 \frac{1}{r} \right) \right]$$

(в единицах Хевисайда) из векторного потенциала.

Но запаздывание, кажется, получается в неправильной форме. Кроме этого, есть еще нежелательные мнимые и логарифмические члены. Тем не менее я думаю, что идея Вашей работы имеет фундаментальное значение, и надеюсь, что с некоторыми поправками теория станет правильной.

Начальным пунктом моих (с Подольским) вычислений был вывод коммутационных соотношений между амплитудами четырехмерного потенциала. Никольский⁴ сказал мне, что у Вас были сложности с этими соотношениями, и я был бы рад узнать, свободны или нет от этих трудностей использованные мной соотношения. Я записываю функцию Лагранжа для поля в виде

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{1}{c} \dot{Q}_i + \frac{\partial Q_0}{\partial x_i} \right)^2 - \frac{1}{2} \sum_{i>l=1}^3 \left(\frac{\partial Q_i}{\partial x_l} - \frac{\partial Q_l}{\partial x_i} \right)^2 -$$

$$- \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c} \dot{Q}_0 + \text{div } Q \right)^2,$$

где $Q_i = A_i$ и $Q_0 = A_0$ — компоненты векторного и скалярного потенциалов. Тогда получаются уравнения Лагранжа в виде

$$\square Q_i = 0, \quad \square Q_0 = 0$$

(никакого условия типа $(1/c)\dot{Q}_0 + \text{div } Q = 0$ здесь не используется!). А уравнения Гамильтона с $E_i = -cP_i$, $H = \text{curl } Q$, $(1/c)\dot{Q}_0 + \text{div } Q = -cP_0$ будут тождественны уравнениям Максвелла, если рассматривать только такие состояния поля, для которых $P_0 = 0$.

Если записать разложение Фурье полевых величин в виде

$$Q_l = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int q_l(\mathbf{k}) \exp(-ic|k|t + i\mathbf{k}\mathbf{r}) d\mathbf{k} + \\ + \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int q_l^+(\mathbf{k}) \exp(ic|k|t - i\mathbf{k}\mathbf{r}) d\mathbf{k}, \\ l = 0, 1, 2, 3; d\mathbf{k} = dk_x dk_y dk_z.$$

и аналогично для величин P_l , то получится, что коммутационные соотношения

$$(i/\hbar) [P_l(\mathbf{r}) Q_m(\mathbf{r}') - Q_m(\mathbf{r}') P_l(\mathbf{r})] = \delta_{lm} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$$

ведут к формулам

$$q_l(k) q_m^+(k') - q_m^+(k') q_l(k) = -e_l \delta_{lm} (\hbar c/2|k|) \delta(k - k'),$$

где $e_0 = 1$, $e_1 = e_2 = e_3 = -1$. Эти соотношения также можно вывести из (проинтегрированного) гамильтониана:

$$H = \int (q_1^+ q_1 + q_2^+ q_2 + q_3^+ q_3 - q_0^+ q_0) k^2 dk + \\ + \int (q_1 q_1^+ + q_2 q_2^+ + q_3 q_3^+ - q_0 q_0^+) k^2 dk.$$

Это и есть условия, которые мы использовали с Б. Подольским (наша статья будет опубликована в Физическом журнале Сов. Союза). Я думаю, что они вполне недвусмысленны.

Я очень рад, что Вы намереваетесь приехать в Ленинград в сентябре!⁵

С дружеским приветом

Ваш В. Фок

¹ Статья (36), вышедшая в свет 2 мая 1932 г. Дирак предложил в ней новый подход к построению квантовой электродинамики. Об этой статье и последующих событиях см. статью «Квантовая электродинамика Дирака» в наст. сб.

² См. ст.: Fock V. A., Podolsky B. Zur Diracschen Quantenelektrodynamik // Phys. Zeitschr. d. Sow. Union. 1932. Bd. 1. S. 798-800. ϵ_1 , ϵ_2 - заряды частиц.

³ Далее Фок излагает результаты ст.: Fock V. A., Podolsky B. On the quantization of electromagnetic waves and the interaction of charges on Dirac's theory // Phys. Zeitschr. d. Sow. Union. 1932. Bd. 1. S. 801-817. Формула для потенциала взаимодействия электронов оказалась неправильной (см. письма от 26.09, 1 и 16.10.1932 г.), а метод квантования электромагнитного поля с одной поправкой вошел и в последующую статью Дирака-Фока-Подольского (37).

Поправка связана с дополнительным условием при квантовании. Фок записывает его в виде $P_0 = 0$ или $\text{div } A + (1/c) \dot{\Phi} = 0$, но такое условие, в действительности, противоречит его коммутационным соотношениям в случае, когда в поле имеются заряды. Дирак впоследствии предложил обобщенное дополнительное условие вида

$$\left\{ \text{div } A + \frac{1}{c} \dot{\Phi} - \sum_s \frac{\epsilon_s}{4\pi} \Delta (R - R_s) \right\} \psi = 0,$$

которое и вошло в (37). (См. письма от 19.07 и 16.10.1932 г.).

⁴ Никольский К. В.— ленинградский физик-теоретик.

⁵ В сентябре 1932 г. в Ленинградском физико-техническом институте прошла конференция по теории твердого тела и Дирак приехал на нее. Из иностранных ученых на ней были также Р. Фаулер, Р. Пайерлс, Л. Брэгг (Воспоминания о Тамме. М.: Наука, 1986. С. 109).

Дирак сделал два доклада о своей квантовой электродинамике — 14 и 16 сентября. 17 сентября был доклад Фока. В обсуждении участвовали И. Е. Тамм, С. П. Шубин, Б. Подольский.

После окончания конференции Дирак вместе с П. Л. Капицей отдыхал в Крыму, в местечке Гаспра под Ялтой. На обратном пути он провел два дня (приблизительно 6 и 7 октября) в Харькове, в Украинском физико-техническом институте. Там он договорился с Подольским о подготовке совместной статьи (37). Потом Дирак приехал в Москву к Тамму, и улетел в Берлин, вероятнее всего 10 октября.

П. Дирак — В. А. Фоку

19 июля 1932 г., Кембридж

Дорогой Фок,

большое спасибо за Ваше письмо. Можно было ожидать, что члены с ϵ_1^2 и ϵ_2^2 войдут также и в трехмерный случай¹, потому что они встречаются в одномерном случае, хотя я и опустил их в своей статье. Розенфельд из Копенгагена сделал некую работу² (еще не опубликованную), которая, вроде бы, показывает, что моя новая работа математически эквивалентна теории Гейзенберга—Паули для волновых уравнений, линейных относительно $\partial/\partial t$.

Ваши перестановочные соотношения для потенциалов являются, я думаю, такими же, как соотношения Ферми³. Сложность с этой схемой состоит в условии $[(1/c) \dot{Q}_0 + \text{div } Q = 0$.

Если имеем $\psi = \psi_0 + \epsilon \psi_1 + \epsilon^2 \psi_2 + \dots$ то можно условиться, что $((1/c) \dot{Q}_0 + \text{div } Q) \psi_0 = 0$, но тогда в общем случае не получится

$$[(1/c) \dot{Q}_0 + \text{div } Q] \psi_1 = 0, \text{ (не так ли?)}$$

так то я не вижу, как Вы использовали это условие в Ваших вычислениях. Я был бы рад, если бы Вы смогли рассказать мне определенно, что Вы делаете с этим условием.

Надеюсь встретить Вас в сентябре.

Искренне Ваш

П. А. М. Дирак

¹ Эти бесконечные члены в энергии взаимодействия, пропорциональные квадратам зарядов частиц, соответствовали взаимодействию электрона с самим собой, и их надо было отбросить для проведения дальнейших вычислений.

² Ст.: *Rosenfeld L. Über eine mögliche Fassung des Diracschen Programms zur Quantenelektrodynamik und deren formalen Zusammenhang mit der Heisenberg — Paulischen Theorie // Zeitschr. f. Physik. 1932. Bd. 76. S. 729—734.* (см. о ней в статье «Квантовая электродинамика Дирака» в наст. сб.)

³ *Fermi E. Sopra l'elettrodinamica quantistica // Rend. Lincei. 1929. Vol. 9. P. 881—887; 1930. Vol. 10. P. 431—435.*

Именно Ферми принадлежит трактовка, согласно которой дополнительное условие нельзя рассматривать как операторное равенство $\text{div } A + (1/c) \dot{\Phi} = 0$, а только как условие на волновую функцию: $(\text{div } A +$

+ (1/c) Φ $\psi=0$. Фок и Подольский первоначально не учли этого, соответствующая интерпретация появилась только в статье (37).

Что касается конкретного вида дополнительного условия, то последнее сделанного в (37) уточнения (см. примеч. 3 к письму от 7 июля) оно совпадало с фермиевским только для случая поля без зарядов.

Б. Подольский — В. А. Фоку

7 сентября 1932 г., Харьков.

Дорогой друг,

в результате всех наших хлопот обе статьи¹ вышли в шестом номере журнала. Отписки Вы вскоре получите, пока я посылаю по одному экземпляру каждой статьи. Пока что я нашел только одну опечатку: на стр. 802 в уравнении (7) должно стоять $H=1/2(H^2+E^2)$ —...

Чтобы статью полностью напечатали в этом номере, пришлось действовать очень быстро, и не было времени послать Вам корректуру.

Вы наверное заметили статью Розенфельда в Zs. f. Phys., 76, 729 (1932). Я очень хотел бы знать Вашу реакцию. Я думаю, мы должны написать что-то в ответ, так как либо он неправ, либо мы². Вот мои соображения: пусть

$$D = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial t} + \sum_n (c\alpha_n p_n + m_n c^2 \alpha_n^4),$$

индекс n означает номер частицы,

$$V = \sum_n \epsilon_n [\alpha_n A(r_n, t) - \Phi(r_n, t)] = \sum_r \{ H_r^- e^{-2\pi\nu_r t} + H_r^+ e^{2\pi\nu_r t} \} = V(r, t),$$

$\bar{H}^{(s)} = \int H^{(s)} dv$ — гамильтониан излучения (между прочим, он разный у Гейзенберга—Паули, Ферми (ср. Zs. f. Phys. 59, 171) и у нас). Но какой бы $H^{(s)}$ ни взять, уравнение Гейзенберга—Паули (Г. П.) сводится в конфигурационном пространстве частиц к

$$[D + \bar{H}_s - V(r, t)] \psi = 0. \quad (1)$$

Уравнение, полученное Розенфельдом, в тех же обозначениях можно записать как

$$[D + \bar{H}_s - \Sigma(H_r^- + H_r^+)] \psi = 0, \quad (2)$$

или

$$[D + \bar{H}_s - V(r, 0)] \psi = 0. \quad (2')$$

Таким образом, Г. П. ур. содержит $V(r, t)$ вместо $V(r, 0)$ у Розенфельда. Но коммутационные соотношения отличаются. У Г. П. амплитуды, выраженные как $N^{1/2} e^{i\theta/\hbar}$ и т. д. содержат временной множитель $e^{\pm 2\pi i \nu t}$, а у Розенфельда — нет. Тогда, выраженные через $N^{1/2} e^{i\theta/\hbar}$ и т. д. $V(r, 0) \sim V(r, t)$. Итак, хотя \bar{H}_s различны, но выраженные через числа квантов $N_1, N_2, \dots, N_r, \dots$ кажется, сов-

падают. Зато, я думаю, небольшая ошибка содержится в утверждении Розенфельда, что и дополнительные условия совпадают. Я этого не вижу, ведь Г. П. берут $\operatorname{div} E = \rho = \epsilon \psi^* \psi$, а мы (и, очевидно, Ферми) $\operatorname{div} A + (1/c) \Phi = 0$ или $\operatorname{div} E = 0^3$. Я также думаю, хотя мне это не очень ясно, что Розенфельд путает ϕ из ур[авнения] (2), которая является оператором, с ϕ из ур[авнения] (1), которая есть просто волновая функция.

Я бы очень хотел обо всем этом поговорить с Вами, но я не знаю, смогу ли приехать в Ленинград. Я собирался приехать (и по этой причине не писал), но похоже никто не намерен оплатить мое пребывание в Ленинграде. Наш институт оплатит билеты, но за само пребывание мне придется платить самому, а это, кажется, мне не по карману. Может быть, Ваш институт сможет это сделать?⁴

Кстати, я забыл сказать, что я согласен с Вашими поправками к нашей статье. Мои возражения основывались на недоразумении.

Я думаю, что дираковская теория заслуживает серьезного рассмотрения, поскольку она устраняет одну из главных трудностей квантовой теории. Прежде потенциал U в ур[авнении] Шрёдингера всегда задавался как что-то внешнее по отношению к системе. Если же его надо было рассмотреть как создаваемый чем-то в самой системе, то $U = f(\psi)$ и ур[авнение] нелинейно относительно ψ . На этой трудности настаивал Эйнштейн как на причине того, что ур[авнение] Шрёдингера не может быть самым последним законом физики⁵. Это та же проблема, что и выбор определенной формы оператора смещения в Вашем обобщении уравнения Дирака.

Пожалуйста, напишите скорее.

Ваш друг

Б. Подольский

¹ О первых двух статьях Фока и Подольского см. примеч. 2 и 3 к письму от 7.07.1932 г. и статью «Квантовая электродинамика Дирака» в наст. сб.

² Розенфельд действительно доказал эквивалентность теорий Дирака и Гейзенберга—Паули, хотя его доказательство было достаточно темным, obscure — по выражению Подольского (см. письма от 19.07 и 24.11.1932 г.)

³ Впоследствии Фок докажет, что дополнительные условия в работах Дирака—Фока—Подольского (37) и Гейзенберга—Паули (*Heisenberg W., Pauli W. Zur Quantentheorie der Wellenfelder. II // Zeitschr. f. Physik. 1930. Bd. 59. S. 168—190.*) эквивалентны (см. письмо от 16.10.1932 г.)

⁴ Подольский был в Ленинграде в сентябре 1932 г. на конференции по теории твердого тела.

⁵ Эйнштейн, стремясь к единой теории поля, хотел, чтобы движение поля определялось не внешним потенциалом, а самим полем. Соответствующие уравнения движения должны быть нелинейными.

В теории Дирака—Фока—Подольского действительно можно усмотреть что-то похожее: в системе из двух электронов каждый из них движется под воздействием поля другого электрона.

Дорогой друг,

я согласен с Вашим письмом, но думаю, что тем не менее нужно получить эрмитовский оператор¹. Это должно быть так, потому что у нас две частицы и мы интересуемся, поскольку берем только те матричные элементы, где нет излучения, только переходами в которых сохраняются энергия и импульс, т. е.

$$p_1 + p_2 = p_1^0 + p_2^0, \quad (1^*)$$

$$W_1 + W_2 = W_1^0 + W_2^0 \quad (2^*)$$

(ср. вывод ур. Мёллера и Брейта у Бете—Ферми Zs. f. Phys. 77, 296). Итак, если возьмем наше ур. (41), то оно даст, без пренебрежений:

$$\begin{aligned} (W - ih \frac{\partial}{\partial t}) \varphi_2 &= K \varphi_0 + \\ &+ \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 c}{2(2\pi)^3 \hbar} \left\{ \frac{\delta(p_1 - p_1^0 + p_2 - p_2^0) e^{-\frac{i}{\hbar} W_0 t}}{[W_2 - W_2^0 - c |p_2 - p_2^0|] |p_2 - p_2^0|} + \right. \\ &\left. + \frac{\delta(p_1 - p_1^0 + p_2 - p_2^0) e^{-\frac{i}{\hbar} W_0 t}}{[W_1 - W_1^0 - c |p_1 - p_1^0|] |p_1 - p_1^0|} \right\}, \end{aligned}$$

что приведет к

$$\begin{aligned} (p_1 p_2 | V | p_1^0 p_2^0) &= - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 c}{2(2\pi)^3 \hbar} \frac{\delta(p_1 - p_1^0 + p_2 - p_2^0)}{|p_1 - p_1^0|} \times \\ &\times \left\{ \frac{1}{W_2 - W_2^0 - c |p_1 - p_1^0|} + \frac{1}{W_1 - W_1^0 - c |p_1 - p_1^0|} \right\}. \quad (3^*) \end{aligned}$$

(3*) как он есть — неэрмитов, (1*) выполняется автоматически с учетом $\delta(p_1 - p_1^0 + p_2 - p_2^0)$. Если использовать (2*), мы получим

$$\begin{aligned} (p_1 p_2 | V | p_1^0 p_2^0) &= \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2(2\pi)^3 \hbar} \frac{\delta(p_1 - p_1^0 + p_2 - p_2^0)}{|p_1 - p_1^0|^2} \times \\ &\times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{c |p_1 - p_1^0|}{W_1 - W_1^0}} + \frac{1}{1 - \frac{c |p_1 - p_1^0|}{W_1 - W_1^0}} \right\} = \\ &= \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \delta(p_1 - p_1^0 + p_2 - p_2^0)}{(2\pi)^3 \hbar |p_1 - p_1^0|^2 \left[1 - \frac{(W_1 - W_1^0)^2}{c |p_1 - p_1^0|^2} \right]} = \overline{(p_1^0 p_2^0 | V | p_1 p_2)}. \end{aligned}$$

Это похоже на то, что нужно ожидать в правильной теории. Однако когда я попытался применить подобные вычисления в ур[авнении] (61), я столкнулся со значительными трудностями.

Я склонен думать, что наше уравнение (64) неверно, но я не уверен в этом. Если рассмотреть для начала только члены, возникающие из скалярного потенциала, мы получим (я думаю) аналогично (3*):

$$(p_1 p_2 | V | p_1^0 p_2^0) = -\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 c}{2(2\pi)^3 \hbar} \frac{\delta(p_1 - p_1^0 + p_2 - p_2^0)}{|p_1 - p_1^0|} \times \\ \times \left\{ \frac{1}{D_2 - W_2^0 - c|p_1 - p_1^0|} + \frac{1}{D_1 - W_1^0 - c|p_1 - p_1^0|} \right\},$$

но равенство $D_1 + D_2 = W_1^0 + W_2^0$ не имеет смысла. Очевидно, трудности связаны с операторами α и ψ . Если Вам удастся прояснить этот вопрос, напишите, пожалуйста.

Ваш искренний друг

Борис Подольский

Роза передает Вам привет и благодарит за тот прекрасный день, который Вы провели с нами в Детском Селе.

¹ В своей второй статье Фок и Подольский неудачно посчитали взаимодействие двух электронов по теории Дирака — в энергии взаимодействия были мнимые члены, соответствующий оператор был неэрмитов.

Подольский пытается исправить результат, настоящее письмо отражает промежуточный этап его вычислений — пока что здесь фигурирует только скалярное взаимодействие электронов. Об успешном окончании его расчетов свидетельствует письмо от 1.10.1932 г. Исправление — вывод из теории Дирака формулы Мёллера — будет опубликовано в третьей статье Фока и Подольского (*Podolsky B., Fock V. A. Derivation of Möller's formula from Dirac's theory // Phys. Zeitschr. d. Sow. Union. 1932. Bd. 2. S. 275–277*).

Другие работы, относящиеся к этому вопросу: формула Брейта — взаимодействие электронов со спином с точностью до $(v/c)^2$, вывод нестрогий (*Breit G. The effect of retardation on the interaction of two electrons // Phys. Rev. 1929. Vol. 34. P. 375, 553–573*).

Формула Мёллера — взаимодействие электронов с учетом запаздывающих потенциалов — вывод нестрогий (*Möller Chr. Über den Stoß zweier Teilchen unter Berücksichtigung der Retardation der Kräfte // Zeitschr. f. Physik. 1931. Bd. 70. S. 786–795*).

Вывод формул Брейта и Мёллера из квантовой электродинамики Ферми (*Bethe H., Fermi E. Über Wechselwirkung von zwei Elektronen // Zeitschr. f. Physik. 1932. Bd. 77. S. 296–306, опубликована 2 августа 1932 г.*).

Вывод формулы Брейта из теории Дирака (*Nikolsky K. The interaction of charges in Dirac's theory // Physikal Zeitschr. d. Sow. Union. 1932. Bd. 2. S. 447–452*).

Б. Подольский — В. А. Фоку

1 октября 1932 г., Харьков

Мой дорогой друг ¹,

в моем вчерашнем письме я неправильно списал результат Мёллера из статьи Бете — Ферми, *Zs. f. Phys.* **77**, 269 (1932). Сам Мёллер дает следующую формулу в своей статье *Zs. f. Phys.* **70**,

786 (1931), уравнение (9):

$$\Phi = \frac{e_1 e_2 \hbar^5}{\pi} \frac{(\bar{a}'_2 a_2^0)(\bar{a}'_1 a_1^0) - (a'_2 a_2^0)(a'_1 a_1^0)}{|p_1^0 - p_1^{\prime 0}|^2 - [(E_1^0 - E_1^{\prime 0})/c]^2} \delta(p_1^{\prime 0} - p_1^0 + p_2^{\prime 0} - p_2^0).$$

Это в точности наш результат, если вспомнить, что $\hbar = 2\pi\hbar$, $e_1 e_2 = 4\pi\epsilon_1 \epsilon_2$, $a_i^0 = (1/\hbar)^{3/2} \psi_{00}(p_i^0)$ и т. д. И не нужно никаких дополнительных условий.

Искренне Ваш

Борис Подольский

¹ Подольский сообщает, что ему удалось вывести формулу Мёллера. (См. также примеч. 1 к письму от 26.09.1932 г.)

Б. Подольский — В. А. Фоку

9 октября 1932 г., Харьков.

Дорогой друг,

Дирак провел здесь два дня и был у нас. У меня была возможность как следует поговорить с ним и лучше понять его идеи. Он обещал Иваненко написать статью в *Sov. Phys.* о том, что он говорил в Ленинграде¹, но поскольку большую часть этого я уже написал в нашей с Вами статье, мы договорились, что я напишу статью для *Sov. Phys.* под именем Дирак—Подольский—Фок, если Вы согласны. Копии статьи я пошлю Вам и Дираку для согласования перед публикацией. Статья будет содержать следующее: 1) дираковскую модификацию его теории; 2) наши добавления и расширения, как они даны, например, в Вашем письме; 3) нашу поправку к предыдущей работе с объяснением, почему не нужно использовать дополнительные условия. Каково Ваше мнение?

Если Вы согласитесь, я хотел бы, чтобы Вы написали мне сразу и подробно Ваши соображения о пунктах 2) и 3). Мне не все понятно в Вашем письме; напишите, пожалуйста, более полно. Я думаю, нам не нужно использовать дополнительные поправки по следующим причинам². <...>

¹ См. примеч. 5 к письму от 7.07.1932 г. Д. Д. Иваненко — физик-теоретик, в 1929—1931 гг. работал в Харькове в Украинском физико-техническом институте. Там же в 1932—1933 гг. работал Подольский. *Sov. Phys.* — употребительное сокращенное название для издававшегося в Харькове «*Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*».

² Письмо публикуется частично.

В. А. Фок — П. Дираку

16 октября 1932 г., Ленинград.

Дорогой Дирак!

Подольский, возможно, рассказал Вам, когда Вы были в Харькове, что он вывел из Вашей теории формулу Мёллера. Ошибка в статье Подольского и моей была в том, что уравнение (66) не-

следовало из предшествующих уравнений (61) и (65). Я рад, что вопрос теперь решен, хотя мне и стыдно за ту ошибку¹.

Я с тех пор получил доказательство эквивалентности Ваших дополнительных условий для волновой функции с условиями Гейзенберга и Паули. Поскольку Подольский написал мне, что он собирается написать статью вместе с Вами о новой формулировке Вашей теории, я сообщил ему мое доказательство и хочу также рассказать его Вам в этом письме².

Обозначая как t время светового кванта и как t_1, t_2, \dots, t_n времена частиц и используя обозначения из статьи «О квантовании и т. д.» мы можем ввести оператор

$$C(k) = ikA(k) - i|k|\Phi(k) + \frac{i}{2|k|(2\pi)^{3/2}} \sum_{s=1}^n \varepsilon_s e^{ic|k|t_s - ikr_s}.$$

Тогда дополнительные условия будут

$$C(k)\psi=0, C^+(k)\psi=0,$$

а волновое уравнение

$$(H_s - ih\partial/\partial t_s)\psi=0,$$

где

$$H_s = cp_s\alpha_s - mc^2\alpha_s^{(4)} - \varepsilon_s \alpha_s A(r_s t_s) + \varepsilon_s \Phi(r_s t_s).$$

Операторы $C(k)$, $C^+(k)$ и $H_s - ih\partial/\partial t_s$ коммутируют друг с другом.

Перейдя от амплитуды $C(k)$ к полевой величине $C(r, t)$, мы получим

$$C(r, t) = \text{div } A + \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \sum_{s=1}^n \frac{\varepsilon_s}{4\pi} \Delta(R - R_s),$$

где $R - R_s = x - x_s, y - y_s, z - z_s, t - t_s$ и Δ — так называемая четырехмерная δ -функция Иордана

$$\Delta(R) = (1/r) [\delta(r+ct) - \delta(r-ct)].$$

Поскольку мы имеем $E = -(1/c)\partial A/\partial t - \text{grad } \Phi$, $H = \text{curl } A$, то уравнения Максвелла в Вашей теории будут

$$\left(\text{curl } H - \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} \right) \psi = \text{grad} \sum_{s=1}^n \frac{\varepsilon_s}{4\pi} \Delta(R - R_s) \psi, \quad (1)$$

$$(\text{div } E) \psi = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{s=1}^n \frac{\varepsilon_s}{4\pi} \Delta(R - R_s) \psi. \quad (2)$$

Задача состоит в том, чтобы показать, что уравнения Гейзенберга—Паули следуют из (1) и (2).

Если мы положим все времена t, t_1, t_2, \dots, t_n равными общему времени T , то для каждой переменной поля F мы получим

$$\partial F / \partial T = \partial F / \partial t + \partial F / \partial t_1 + \partial F / \partial t_2 + \dots + \partial F / \partial t_n,$$

где $\partial F / \partial t_s = (i/h)(H_s F - F H_s)$.

Поскольку $\partial A / \partial t_s = 0$, то, следовательно, связь между E, H и A, Φ остается той же. Далее, для $t = t_s$ мы имеем $\Delta(R - R_s) = 0$, $-(1/c) \partial / \partial t [\Delta(R - R_s)] = 4\pi \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s)$.

Следовательно:

$$(\operatorname{div} A + (1/c)(\partial \Phi / \partial T)) \psi = 0,$$

и вместо (2)

$$(\operatorname{div} E) \psi = \sum_{s=1}^n \varepsilon_s \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s) \psi,$$

что совпадает с условиями Гейзенберга и Паули.

Ур. (1) принимает вид

$$(\operatorname{curl} H - (1/c)(\partial E / \partial t)) |_{t=T} \psi = 0. \quad (2')$$

Но мы имеем

$$\begin{aligned} -(1/c)(\partial E / \partial T) &= -(1/c)(\partial E / \partial t) - (1/c)(\partial E / \partial t_1) + \dots \\ &\dots + [-(1/c)(\partial E / \partial t_n)], \end{aligned}$$

или

$$-(1/c)(\partial E / \partial T) = -(1/c)(\partial E / \partial t) + \partial P / \partial t_1 + \dots + \partial P / \partial t_n,$$

где $P = -(1/c)E$ — переменная поля, канонически сопряженная к $Q = A$. Следовательно:

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial T} = -\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} + \sum_{s=1}^n \varepsilon_s \alpha_s \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s),$$

и ур. (2') принимает вид

$$\left(\operatorname{curl} H - \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial T} \right) \psi = \sum_{s=1}^n \varepsilon_s \alpha_s \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s) \psi,$$

что тоже совпадает с соответствующим уравнением теории Гейзенберга—Паули. Это все.

Напишите мне, если у Вас будут какие-то замечания к этому доказательству.

Как Вы провели время в Гаспре? Понравилось ли Вам там? ³

Я посылаю Вам очень плохую фотографию, снятую перед Вашим отъездом из Ленинграда.

С дружеским приветом.

Ваш В. Фок

Передайте мой искренний привет проф. Фаулеру ⁴.

¹ См. примеч. 1 к письму от 26.09.1932 г.

² Об обобщенном дополнительном условии см. примеч. 3 к письму от 7.07.1932 г. Доказательство Фока вошло в § 6 статьи (37).

³ См. примеч. 5 к письму от 7.07.1932 г.

⁴ Р. Фаулер — кембриджский физик — теоретик, учитель Дирака. Он участвовал в Ленинградской конференции.

П. Дирак — В. А. Фоку

11 ноября 1932 г., Кембридж

Дорогой Фок,

большое спасибо за Ваше письмо и фотографию, глядя на которую мне будет очень приятно вспоминать о Ленинграде.

Я получил от Подольского копию нашей совместной статьи¹ и отослал ему обратно небольшое число поправок. Довод, приведенный в Вашем письме, кажется мне совершенно правильным.

Я только что послал Иваненко маленькую статью о лагранжиане в квантовой механике², которую я написал для советского журнала. Кажется, что обращение со всем существенным в классическом лагранжиане можно перенести и в квантовую теорию, возможно в слегка замаскированном виде.

Мы очень приятно провели время в Гаспре, хотя Капица и я, мы оба, начали с того, что простудились. Погода все же была превосходной. Я думаю, что Вы увидите с Капицей снова.

Народ в Кембридже очень интересуется космическими лучами³ — в связи с новыми успехами в их экспериментальном исследовании.

С наилучшими пожеланиями всем ленинградским физикам.

Искренне Ваш

П. А. М. Дирак

¹ Поправки Дирака см. в письме от 2.11.1932 г.

² Ст. (38), написанная по заказу Д. Д. Иваненко для «Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion». В ней Дирак предложил идею интеграла по траекториям.

³ Возможно, это указание на работу П. Блэккетта и Дж. Оккиалини. В то время они ставили эксперименты, в которых наблюдался позитрон.

П. Дирак — Б. Подольскому

2 ноября 1932 г.,
St John's колледж, Кембридж

Дорогой Подольский,

я бы хотел сделать следующие замечания к статье.

1. Я думаю, что это плохо, если имя автора появляется в заголовке одной из его работ¹. Нельзя ли изменить заголовок на «К квантовой электродинамике»? Это кажется достаточно точно. Я бы также не хотел, чтобы мое имя так часто появлялось в тексте. Ваше и Фока появляются только один раз.

2. Что касается математики, моя часть работы изложена очень хорошо и вполне точно, за исключением § 4². Я пони-

мал уравнения (8) как

$$\frac{\partial q_b^*}{\partial t} = \frac{i}{\hbar} (H_b q_b^* - q_b^* H_b),$$

где $\partial/\partial t$ слева соответствуют временной переменной t , появляющейся в экспонентах (7) и больше нигде. Уравнения (8) подтверждаются просто дифференцированием (7) по этому t , считая q_b и p_b независимыми от t . Это t , в сущности, время поля, появляющееся позже в статье. Сделанное в § 4 эквивалентно принятию t равным общему времени T и образованию $\partial q_b^*/\partial T$, $\partial p_b^*/\partial T$, которые отличаются от $\partial q_b^*/\partial t$, $\partial p_b^*/\partial t$ вследствие зависимости q_b , p_b от T . Эти процедуры относятся к § 7, где мы переходим к обычной теории с единым T . Я боюсь, что сделанное в § 4 вообще не имеет смысла, поскольку \dot{q}_b^* , введенное в ур. (20), означает $(dq_b/dt)^*$, а нам нужно $d/dt (q_b^*)$, и эти две величины не совпадают. Я предлагаю заменить § 4 утверждением, что t в экспонентах (7) — это новая временная переменная (позже она станет специальным временем поля), и затем элементарным доказательством (8), где \dot{q}_b^* означает $\partial(q_b^*)/\partial t$.

3. В § 1 в конце первого абзаца вместо «другое доказательство» написать «упрощенное доказательство», поскольку это доказательство не является фундаментально отличным от розенфельдовского.

4. Может быть, лучше озаглавить часть II «Максвелловский случай», § 5 мог бы тогда начинаться «В максвелловском случае...»

5. Утверждение в начале § 7 о том, что полная электродинамика вакуума сохраняется в присутствии частиц, не является абсолютно точным, поскольку уравнение $[\text{div } A + (1/c) \partial \Phi / \partial t] \psi = 0$ должно быть изменено. Это утверждение справедливо, поскольку оно касается уравнений движения, выводимых из гамильтониана или лагранжиана. Дополнительное условие $[\text{div } A + (1/c) \partial \Phi / \partial t] \psi = 0$ это не уравнение движения, но «связь», наложенная на начальные координаты и скорости, которую затем уравнения движения поддерживают для всех времен. Часть I ничего не говорит о таких связях и о существовании такой связи в максвелловском случае, поэтому необходимы дополнительные рассуждения (отмеченные в начале § 5). Оказывается, что эту связь нужно изменить в присутствии частиц, для того чтобы она сохранялась все время вследствие уравнений движения. Может быть, было бы полезным добавить примечание, объясняющее это³.

6. Нет исправления Вашей с Фоком предыдущей статьи. Будет ли оно в другом разделе, который Вы мне не прислали?⁴

П. А. М. Дирак

¹ Первоначальное название было, по-видимому, «К дираковской квантовой электродинамике».

² Дираковская часть совместной работы (37) — это большая часть § 1, 2, 4, 5 окончательного текста.

Первоначальный § 4, касающийся одного тонкого места в доказательстве эквивалентности теорий Дирака и Гейзенберга—Паули, был снят Подольским. Вместо него он написал новый § 7, отличный от того, что предлагает Дирак в этом письме. О возникшей полемике см. письма от 16 и 24 ноября 1932 г. В окончательном тексте статьи опубликован вариант Подольского.

³ См. примеч. 3 к письму от 7 июля и примеч. 3 к письму от 19 июля 1932 г.

⁴ См. примеч. 1 к письму от 26 сентября.

Б. Подольский — П. Дираку

16 ноября 1932 г., Харьков

Дорогой Дирак,

для того чтобы Вы точно знали, на какой пункт Вашего письма я ссылаюсь, я прилагаю для справки копию Вашего письма.

Я принимаю без оговорок Ваши пункты 1, 3, 4, 5. Соответствующие изменения будут сделаны в тексте. Перед тем как перейти к наиболее сложному вопросу с пунктом 2, я отвечу на вопрос о пункте 6. Поскольку Вы говорили Фоку, что это наша ошибка и мы должны ее исправить, Фок настаивал на том, чтобы мы написали отдельную короткую заметку об этом в *Sov. Phys.* Если подумать, то нет логической связи между общими рассуждениями этой работы и исправлением одного частного приложения. Я думаю, что Вы тоже сочтете это правильным¹.

Теперь о пункте 2. Я согласен с тем, что § 4 был в основном неправильным. Однако если в уравнения преобразования (3), (4), (7) подставить новое время t (время системы B), что будет в случае, если мы будем доказывать ур. (8) просто дифференцированием, то нельзя будет вывести важное ур. (5). Кажется бесспорным, что ур-я (2) и (5) должны иметь время T , и из этого, я думаю, следует, что и время в уравнениях (3), (4), (7) также должно быть T . С другой стороны, я согласен, что ур. (8) должно иметь время t , для того чтобы быть уравнением движения системы B . Ниже Вы увидите, как я решаю эту трудность. Я много думал об этом и надеюсь, что Вы это поддержите². Я теперь перечислю все изменения в статье³.

1. Название изменено на предложенное Вами.

2. В реферате и в начале § 1 написано «новая» вместо «дираковская».

3. В § 1, в конце первого абзаца вместо «другое доказательство» написано «упрощенное доказательство».

4. В ур[авнении] 1 вычеркнуто слово «и», написано T вместо t и добавлены слова: « T — это время полной системы».

5. В ур[авнениях] (2), (3), (4), (5), и (7) написано T вместо t .

6. Вычеркнуто предложение между ур[авнениями] (7) и (8) и написано следующее: «В § 7, после введения подходящих обозначений, будет показано, что ур[авнения] (7) эквивалентны».

7. В ур[авнениях] (8) слева написаны производные по t и следуют слова: «где t — это отдельное время для части B ».

8. В первом абзаце § 2 появляющееся дважды слово «дираковская» заменено сначала на «новая» и затем на «эта».

9. Вычеркнуто примеч. 5 и соответственно изменены номера остальных.

10. В ур. (10) и последующих вместо q и p , как переменных в ψ^* написано r , чтобы согласовать с ур[авнением] (31') и т. д.

11. В соответствии с предыдущими изменениями изменено предложение после ур[авнения] (10).

12. В конце § 2 написано «новая» вместо «дираковская».

13. В связи с ур[авнением] (16) введено примечание: «Точка над величиной используется для обозначения производной по ее собственному времени. Так, в ур[авнении] (16) она означает d/dt ».

14. После примеч. 7 добавлено: «Лагранжиан (12) отличается от фермиевского только четырехмерной дивергенцией».

15. Вычеркнут § 4 и перенумерованы соответственно все остальные. Здесь я использую старые номера.

16. Изменено заглавие части II, как предложено. Часть II начинается со слов «для максвелловского случая...»

17. Вместо $|k|$ $|k'|$ в ур[авнении] (28) написано k^2 .

18. В начале § 6 введен следующий абзац:

«Дополнительное условие в уравнении (24) — это не уравнение движения, но „связь“ наложенная на начальные координаты и скорости, которую уравнения движения поддерживают все время. Существование этой связи в максвелловском случае обуславливает те дополнительные рассуждения, которые изложены в начале § 5. Оказывается, что при наличии частиц эту связь нужно изменить, чтобы получить такую, которую уравнения движения будут все время сохранять.»

19. § 7 начинается так:

«Мы покажем теперь, что введение отдельных времен для поля и для каждой частицы позволяет использовать всю электродинамику вакуума, изложенную в § 3 и I. с., если не считать изменения, рассмотренного в § 6. Действительно...»

20. Добавлен новый § 7 (старый стал § 6), следующий: 4

<...>

Вот и все изменения. Самые важные, конечно, это # # 4, 5, 6, 7, 20, которые вместе и составляют мой ответ на Ваш пункт 2. Я искренне надеюсь, что Вы одобрите их, так как другого пути я не вижу.

Г-жа Подольская шлет Вам искренние приветы.

С дружескими пожеланиями

Борис Подольский

Р. S. Ваше письмо шло 13 дней. Пожалуйста, телеграфируйте Ваше согласие.

Ваше письмо было написано 2—11—32. Пришло в Москву 9—11—32. Пришло в Харьков 14—11—32. Доставлено 15—11—32.

- ¹ Правильный вывод формулы Мёллера Фок и Подольский опубликовали в отдельной статье. См. примеч. 1 к письму от 26 сентября.
- ² Мнение Дирака по этому вопросу неизвестно, вероятно, оно было положительным, так как в окончательный текст вошел вариант Подольского.
- ³ Из приведенных исправлений: п. 1, 2, 8, 12 относятся к замечанию Дирака № 1; п. 4, 5, 6, 7, 15, 20 — к замечанию № 2; п. 3 — к замечанию № 3; п. 16 — к замечанию № 4; п. 18, 19 к замечанию № 5.
- ⁴ В тексте письма здесь следует § 7 из статьи (37), опущенный в настоящей публикации.

Б. Подольский — В. А. Фоку

24 ноября 1932 г., Харьков

Дорогой друг,

я не могу понять Ваше последнее письмо, которое только что получил. Я задержу публикацию рукописи, пока мы не согласимся. Последние несколько дней у меня грипп, и я несколько раздраженный, поэтому, возможно, я говорю не слишком вежливо.

Да, мои поправки не соответствуют предложениям Дирака по пункту 2, потому что я думаю, что он неправ⁴. Как я написал в письме к нему, ур[авнение] (5) нельзя строго вывести, пока в ур[авнении] (3) стоит T вместо t . Я думаю, что Ваш вывод тоже неправильный. Рассмотрим по порядку.

$$\left. \begin{aligned} H &= H_a + H_b + V, \\ H_a &= H_a(p_a, q_a, T), \quad H_b = H_b(p_b, q_b, T), \\ V &= V(p_a, q_a, p_b, q_b, T), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$(H - ih\partial/\partial t)\psi(q_a, q_b, T) = 0. \quad (2)$$

В этом мы согласны.

Вы пишете дальше $\psi^* = e^{\frac{i}{\hbar} H_b t} \psi$, или лучше

$$\psi^* = e^{\frac{i}{\hbar} H_b t} \psi(q_a, q_b, T) = \psi^*(q_a^*, q_b^*, t, T), \quad (3)$$

$$\tau^* = e^{\frac{i}{\hbar} H_b t} \tau(T) e^{-\frac{i}{\hbar} H_b t} = \tau^*(t, T), \quad (4)$$

откуда следует

$$H_a^* = H_a, \quad V^* = V(p_a, q_a, p_b^*, q_b^*) \quad (5)$$

и

$$q_b^* = e^{\frac{i}{\hbar} H_b t} q_b(T) e^{-\frac{i}{\hbar} H_b t} = q_b^*(t, T), \quad (6)$$

$$p_b^* = e^{\frac{i}{\hbar} H_b t} p_b(T) e^{-\frac{i}{\hbar} H_b t} = p_b^*(t, T).$$

Из этого дифференцированием Вы получаете

$$\partial p_b^*(t, T)/\partial t = (i/\hbar) (H_b q_b^* - q_b^* H_b), \quad (7)$$

$$\partial q_b^*(t, T)/\partial t = (i/\hbar) (H_b p_b^* - p_b^* H_b).$$

Я переписал Ваши уравнения, делая явным то, что в них было скрыто. Очевидно также что следующее Ваше утверждение: «Это, однако, как раз уравнение движения для части B отдельно...» верно, если t и T полностью независимы, и T может оставаться постоянным, когда t меняется в ур[авнении] (7). Однако T , будучи общим временем, должно меняться вместе с t . Далее если для доказательства ур[авнения] (5) Вы предполагаете $t=T$, то Вы противоречите ур[авнению] (7), в котором дифференцирование выполняется по t при $T=\text{constant}$ — если ур[авнения] (7) являются уравнениями движения. Это, возможно, стоит показать подробнее. Если ур[авнения] (7) являются уравнениями движения, их надо записать как

$$(\partial q_b^*/\partial t)_{T=\text{const}} = (i/\hbar) [H_b, q_b^*] \text{ etc.},$$

и в $V^* = V(p_a, q_a, p_b^*, q_b^*)$ выступают q_b^*, p_b^* , т. е. V^* надо записать как

$$V_{T=\text{const}}^* = e^{\frac{i}{\hbar} H_b t} V(T) e^{-\frac{i}{\hbar} H_b t}.$$

Выведем теперь Ваше ур[авнение] (8), а именно $(H_a^* + V^* - i\hbar \partial/\partial T)\psi^* = 0$.

Мы имеем из (3):

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{\partial \psi^*(T, T)}{\partial T} &= i\hbar \left(\frac{\partial \psi^*(t, T)}{\partial t} + \frac{\partial \psi^*(t, T)}{\partial T} \right)_{t=T} = \\ &= e^{\frac{i}{\hbar} H_b T} H \psi - H_b \psi^*(T, T) = \\ &= (e^{\frac{i}{\hbar} H_b T} H e^{-\frac{i}{\hbar} H_b T} - H_b) \psi^*(T, T) = \\ &= (H_{t=T}^* - H_b) \psi^*(T, T) = (H_a + V_{t=T}^*) \psi^* \text{ и } V_{t=T}^* \neq V_{T=\text{const}}^*, \end{aligned}$$

т. е. не получается то, что надо. Я очень прошу Вас уделить больше внимания моему новому §7. Здесь настоящее затруднение, которое Дирак систематически старался обойти. Я был очень рад, что мне удалось, наконец, это дело распутать в моем новом §7, и огорчен Вашим согласием с Дираком.

Что же касается слова «obscure», то Дирак употреблял его и в его докладе в Ленинграде и здесь. На то же указывает его поправка «a simpler». Повозившись с работой Розенфельда почти месяц, я вполне присоединяюсь к слову «obscure». Если это резко, то пусть он пишет яснее³.

Во всех формулах, где входит ψ , я опустил p_a и p_b из его аргументов. Принимаю все остальные поправки.

Ваш друг

Борис Подольский

Большое спасибо за отписки, я получил их вчера. Г-жа Подольская передает Вам привет.

Б. П.

¹ См. также письмо от 2 ноября и примеч. 2 к нему и письмо от 16 ноября и примеч. 2 к нему.

² С этого места и до слов «Ваш друг...» текст оригинала на русском языке.

³ Речь идет о характеристике розенфельдовского доказательства эквивалентности. См. письма от 19 июля и 7 сентября 1932 г. Слово «obscure» сохранилось в окончательном тексте (37) на С. 468.

П. Дирак — В. А. Фоку

28 апреля 1933 г., Кембридж

Дорогой Фок,

исправьте, пожалуйста, корректуру Вашей статьи ¹, приложенную к этому письму, и верните ее помощнику секретаря Королевского общества по адресу: The Royal Society, Burlington House, London, W. 1.

Я вложил в конверт форму, которую Вам следует заполнить, специально оговорив, сколько отдельных оттисков Вы хотите иметь и адрес, по которому их надо будет выслать. Если хотите иметь более 50 оттисков, то за каждый дополнительный следует заплатить. Но это составит лишь небольшую сумму, которую я буду рад уплатить за Вас, чтобы избежать трудностей с валютой.

Я благополучно получил оттки своей статьи о лагранжиане и нашей совместной статьи, а также полный комплект Phys. Z. der USSR с самого начала его издания ².

Я сделал несколько исправлений карандашом в Вашей рукописи, которые, я думаю, улучшат ее английский язык, а также написал необходимое резюме. Издатели требуют по возможности меньшее число поправок, включая изменения в подстрочных примечаниях. Это, по-видимому, делается в соответствии с общими правилами.

Искренне Ваш

П. А. М. Дирак

¹ Ст.: Fock V. A. On the electromagnetic fields due to variable electric charges and the intensities of spectrum lines according to the quantum theory // Proc. Soc. L. 1933. Vol. A 141. P. 550–553. Она была представлена к изданию Дираком.

² Ст. (37, 38). Журнал издавался в Харькове с начала 1932 г.

Т. И. Ефремидзе, В. Я. Френкель

ПЕРЕВОДЫ НА РУССКИЙ ЯЗЫК «ПРИНЦИПОВ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ» ДИРАКА

Изданию в Советском Союзе «главной книги» Дирака предшествовало его знакомство с рядом советских физиков. Его контакты с ними начались во второй половине 20-х годов. К этому времени Дирак уже был активным участником собраний кембриджского

«Клуба Капицы». Через Петра Леонидовича в 1926 г. он познакомился с Я. И. Френкелем и Н. Н. Семеновым, через М. Борна (в Геттингене) с В. А. Фоком (1927 г.), через П. С. Эренфеста в 1928 г. в Лейдене — с И. Е. Таммом. Летом этого же года, уже в нашей стране, во время шестого съезда русских физиков он встретился и познакомился с Л. Д. Ландау, Д. Д. Иваненко и многими другими. На этом съезде Дирак выступил с докладом «Релятивистское уравнение электрона» и принимал участие не только в заседаниях в Москве, Нижнем Новгороде, Саратове и Казани (а также на семинарах, которые проходили на пароходе, зафрахтованном Российской физической ассоциацией, организовавшей этот «плавающий съезд»), но и на заключительном заседании съезда в Тбилиси [1, 2].

Книга П. А. М. Дирака «Принципы квантовой механики» принадлежит к числу лучших монографий в мировой физической литературе и разделяет в этом плане славу с книгами его великих предшественников — Ньютона и Максвелла. Один из первых рецензентов «Принципов» — Р. Оппенгеймер находил сходство между книгой Дирака и «Основами статистической механики» Гиббса.

В предисловии к первому русскому изданию книги ее редактор Д. Д. Иваненко писал: «Сравнивая с другими лучшими книгами по этому вопросу нашей области, можно сказать, утрируя характеристики, что рядом с «Основами» (первое русское издание упомянутой книги называлось «Основы квантовой механики». — Авт.) дополнительный том «Wellenmechanischer Ergänzungsband» Зоммерфельда выглядит, как сборник решений ряда частных задач; книга де Бройля «Introduction a l'étude de la mécanique ondulatoire» есть только введение, посвященное главным образом переходу от классической механики к квантовой, «Elementare Quantenmechanik» Борна и Йордана есть изложение сознательно ограниченной части материала, поддающегося обработке специальным методом (в книге нет уравнения Шрёдингера); наконец, «Einführung in die Wellenmechanik» Френкеля — наиболее доступная, пожалуй, для чтения книга, как и все упомянутые, не дает, однако, одного — изложения системы квантовой механики. Как раз изложение системы Квантовой механики и дает книга Дирака, поистине в наиболее высоком виде» (30. С. 4 рус. пер.).

Вероятно, первым в СССР, кто узнал о работе Дирака над книгой, был И. Е. Тамм. В 1929 г. в письме к нему Дирак, сообщая об этом, шуточно добавляет, что «пишет со скоростью 10^{-8} Френкеля» [3], имея в виду способность Я. И. Френкеля писать книги очень быстро (к 1928 г. Я. И. Френкель был автором 10 монографий).

Во время своего третьего приезда в СССР весной 1930 г. на второе совещание по теоретической физике в Харькове Дирак привез с собой корректуру книги и передал ее советским коллегам для перевода. На ее издание редактор Д. Д. Иваненко и переводчик М. П. Бронштейн потратили много труда и времени. Это нашло

отражение в многочисленных примечаниях (общее их число превосходит 50), которыми Бронштейн снабдил соответствующие места текста. К тому времени не было еще устоявшейся терминологии — с этой точки зрения адекватный перевод, удачный выбор терминов имели особое значение — и Бронштейн, надо сказать, блестяще справился с этой задачей.

Существенно, что специально для русского издания своей книги Дирак написал главу «Приближенные методы», дополнившую гл. 9 книги «Теория возмущений» и гл. 11а «Системы, состоящие из одинаковых частиц». Эта дополнительная (11-я) глава содержала, в частности, подробное изложение «метода Фока» (§ 3 гл. 11а) — термин, впервые введенный Дираком. Наряду с этим в ней излагался метод Хартри и метод матрицы плотности¹.

С согласия Дирака Иваненко добавил к гл. 13 («Релятивистская теория электрона») написанный им дополнительно текст, в котором были изложены некоторые вопросы, особенно интенсивно разрабатывавшиеся в то время советскими физиками. Мы имеем в виду параграфы этого текста Иваненко — «Геометризация уравнения Дирака», «Общая теория относительности. Параллельный перенос полувекторов», «Скорость электрона и плюс-минус трудность», которые разъясняли и (или) дополняли некоторые страницы книги и вместе с тем воспринимались читателями как развитие идей, разработанных Дираком.

Второе русское издание книги Дирака вышло в 1937 г. под редакцией М. П. Бронштейна с предисловиями редакции и редактора. Разделение предисловий объяснялось тем, что Бронштейн не мог согласиться с теми утверждениями, на которых настаивала редакция и которые относились к негативной оценке редакцией некоторых методологических установок Дирака, — «его методологическими обобщениями, противоречащими единственному научному методу познания — диалектическому материализму» (30а. С. 5). М. П. Бронштейн, не раз имевший случай подчеркивать плодотворность диалектического метода в разных своих работах, с этой оценкой был резко не согласен. О трудностях, которые встретились ему на пути к изданию книги, о разногласиях с редакцией (в частности, выразившихся в том, что по ее требованию из предисловия было устранено упоминание о вкладе Д. Д. Иваненко в дело перевода) писал Бронштейн В. А. Фоку в конце 1936 г.

В своем редакторском предисловии М. П. Бронштейн указал: «Мы пользуемся случаем, чтобы выразить здесь нашу признательность П. А. М. Дираку за внимательное отношение к делу перевода его книги на русский язык, выразившееся, между прочим, в присылке нам копии английской рукописи. Благодаря этому мы смогли приступить к работе над переводом задолго до выхода в свет английского издания» (30а. С. 5).

В предисловии ко второму английскому изданию книги Дирак отметил, что он большую часть книги написал заново и изложил ряд ее мест в менее абстрактной форме. Не будет, вероятно, преувеличением считать, что замечания по первому русскому изданию

книги определенным образом оказали влияние на работу ее автора над следующим изданием.

В этом втором издании глава о квантовой электродинамике была написана Дираком с учетом результатов, полученных им, В. А. Фоком и Б. Подольским в их совместной работе, выполненной в основном в 1932 г., во время обсуждений проблем квантовой электродинамики в Ленинграде и Харькове. Здесь следует указать, что Дирак (как, впрочем, и Фок) свои теории, как правило, разрабатывал в одиночку, без соавторов. Из числа немногих (порядка 4—5) его работ, написанных в соавторстве, в двух его соавторами явились советские физики. Одна из них — это работа «Рассеяние электронов на стоячих световых волнах», выполненная им в 1931 г. вместе с П. Л. Капицей, вторая — «О квантовой электродинамике» — с Фоком и Подольским. В книге Дирак формулирует результаты этой работы по-новому. Непосредственной ссылки на нее в книге нет (впрочем, Дирак не ссылается и на другие свои оригинальные исследования, органически вошедшие в его монографию). Изменения, внесенные в книгу, касались не только многовременного формализма, но и всего изложения проблем квантовой электродинамики. Со временем намеченное в этом издании стремление к усовершенствованию изложения материала этой главы (о квантовой электродинамике) усиливалось от издания к изданию.

Перевод четвертого английского издания книги Дирака, вышедшей в качестве третьего русского издания под названием «Принципы квантовой механики» (306), был осуществлен уже после окончания войны. На этот раз ее переводом руководил В. А. Фок, явившийся ее редактором. В ходе обмена мнениями в процессе подготовки русского издания «Принципов» между Фоком и Дираком велась довольно интенсивная переписка, часть которой представлена в архиве В. А. Фока [4, 5]. Первое письмо Фока из этой переписки датировано 12 сентября 1959 г. Фок пишет: «Дорогой Дирак! Русское издание Вашей книги «Принципы квантовой механики» находится в процессе печатания; скоро ожидают ее корректуры. Разрешите мне напомнить Вам о Вашем обещании написать несколько строчек для предисловия к русскому изданию.

Я был очень рад нашей встрече в Реймоунте и особенно нашей интересной дискуссией на темы, связанные с Вашей книгой. Я сохраняю об этом приятные воспоминания» [4, л. 14].

Из приведенного письма нельзя установить, когда началась работа над переводом книги — до или после встречи Дирака и Фока в американском городе Реймоунте (штат Калифорния). Эта встреча, вероятно, состоялась не раньше 1959 г., как это видно из третьего письма Фока, в котором упоминается работа [6], включенная позднее в русское издание книги Дирака в качестве приложения.

В следующем письме (от 23 сентября 1959 г.) Фок пишет Дираку: «Дорогой Дирак! Очень признателен Вам за Ваше любезное письмо от 19 сентября и за предложенный текст предисловия. Вы



В. А. Фок и П. Дирак. Ленинград, 1973 г.

сопровождает его в письме такими словами: «Если Вы думаете, что оно подходит» и тем самым подразумевает, что я могу покритиковать Ваши замечания и высказать Вам свое мнение о том, подходят ли они для предисловия. Я нахожу первую часть предисловия очень интересной и вполне подходящей, поскольку оно объясняет, что Вы включили в свою книгу и чем при этом руководствовались. Однако вторая часть (начиная со слов «...правила, определяющие физическую интерпретацию...») представляется мне чисто предположительной и не имеющей прямого отношения к содержанию книги. Я думаю, что лучше всего было бы их полностью опустить. Ваша книга (особенно ее русское издание) адресована студентам, которые недостаточно хорошо знакомы с принципами квантовой механики, и поэтому не стоит говорить о том, о чем, по Вашему представлению, мы не имеем каких-либо идей. Между прочим, Ваш скептицизм, относящийся к индетерминизму (который я не разделяю)², может быть неправильно понят в духе Бома и Вижье, и это может привести к бессмысленным дискуссиям. Я надеюсь, что Вы не будете возражать, если я опушу вторую часть предисловия. Если же вместо опущенного текста Вы сможете добавить несколько слов для русского читателя или если Вы укажете, что замечания редактора, представленные в виде подстрочных примечаний и в Приложении, сделаны с Вашего разрешения (я имею в виду то разрешение, которое Вы дали мне в Реймоунте), это было бы более чем достаточно» [4, л. 15].

Как показывает сравнение авторских текстов предисловия к четвертому английскому и третьему русскому (являющемуся пере-

водом с четвертого английского), они идентичны. Следовательно, Дирак по рекомендации Фока опустил те предварительные, с точки зрения Владимира Александровича, строки авторского предисловия для английского и русского изданий, о которых говорится в приведенном письме.

К сожалению, полного текста специально написанного предисловия Дирака к третьему изданию в фонде В. А. Фока найти не удалось.

Приведем теперь часть третьего письма Фока Дираку, в котором обсуждаются вопросы издания книги. Это письмо датировано 30 октября 1959 г. Фок пишет: «Дорогой Дирак! Сердечно благодарю Вас за Ваше любезное письмо и внимание к моим замечаниям, относившимся к предисловию, и за замечательный новый его текст. Я уже перевел его на русский язык и отправил в издательство (я вкладываю в конверт его текст). ...Разрешите мне послать Вам русскую статью, которую я показывал Вам в Реймоунте (у Вас уже есть ее английский текст). Эта статья представляет собой, по существу, то же, что написано мною в Приложении к Вашей книге» [4, л. 17].

В основном, замечания Фока-редактора, сделанные к книге Дирака, носят характер пояснений, облегчающих понимание изложенных Дираком вопросов. Но иногда эти примечания редактора имеют принципиальный характер. Ограничимся одним примером. В § 4 гл. 1 (параграф называется «Суперпозиция и индентермизм», а гл. 4 «Принцип суперпозиции») пояснение Фока относится к важному в методологическом отношении определению понятия «состояние». Дирак по этому поводу говорит следующее: «Под словом «состояние» можно понимать как состояние в определеннный момент времени (после приготовления системы к соответствующему измерению), так и состояние в течение всего времени после приготовления. В тех случаях, когда могут возникнуть недоразумения, мы, употребляя слово «состояние» во втором из указанных значений, будем говорить о состоянии движения» (30б. С. 28 рус. пер.).

К этому месту В. А. Фок делает примечания такого содержания: «Это определение фундаментального для квантовой механики понятия состояния не вполне удовлетворительно. В самом деле, если определять состояние как движение, то нельзя говорить о состоянии без движения. Действительный смысл понятия «квантовое состояние» выяснится в дальнейшем при рассмотрении волновой функции и выражаемых через нее вероятностей (30б. С. 28) ³.

Слова Дирака из предисловия автора к русскому изданию его книги: «Я одобряю сделанные редактором замечания в сносках и приложении в конце книги: те и другие имеют цель облегчить читателю понимание затруднительных мест» (30б. С. 10 рус. пер.) — красноречиво отражают то значение, которое он придавал кропотливой работе В. А. Фока по изданию «Принципов» на русском языке и его доброжелательной критике.

Очередное издание «Принципов» Дирака (1979 г.) увидело свет уже после кончины В. А. Фока, но по-прежнему с сохранением его имени как редактора издания⁴. В книгу дополнительно были введены «Лекции по квантовой механике» (280), которые Дирак читал в Иешивском университете в США.

«Принципы квантовой механики» П. А. М. Дирака «живут» уже почти шесть десятилетий и по-прежнему служат одним из основных источников для глубокого проникновения в проблемы квантовой механики. И сегодня монография одного из основоположников квантовой механики представляет не только исторический интерес, но остается настольной книгой для работающих на передовом фронте теоретической физики. Такая судьба выпадает на долю немногих книг. Тем приятнее, что как она сама, так и ее автор оказались тесно связанными с советской физикой.

¹ Непосредственно в виде отдельной главы этот текст (сохранившийся в архиве Дирака в Англии) не вошел в последующие издания, но был им учтен в их тексте.

² «Мне не ясно,— добавляет в своем письме Фок,— что Вы понимаете под индетерминизмом, но я полагаю, что речь идет о вероятностной формулировке законов природы, которую (формулировку) я рассматриваю как одно из величайших достижений человеческой мысли».

³ Эти соображения В. А. Фок вынес в свое предисловие редактора. Интересно в связи с этим привести отрывок из давнего письма Дирака к Фоку от 9 июля 1931 г.: «Я не знаю, почему Вы говорите, что движение электронов не может быть наблюдаемо. Если можно точно наблюдать положения за короткие интервалы времени, то, конечно, можно его найти. Ваше разделение наблюдаемых величин на реальные и псевдореальные, мне кажется, должно зависеть только от пределов экспериментальной техники сегодняшнего дня, а не должно иметь какого-либо теоретического значения...» [4, письмо № 6].

⁴ Это издание «Принципов» снабжено предисловием Д. В. Ширкова как редактора серии «Библиотека теоретической физики», в рамках которой и увидела свет книга Дирака.

ЛИТЕРАТУРА

1. Френкель В. Я. Профессор Дирак и советские физики // УФН. 1987. Т. 153, С. 173–186.
2. Ефремидзе Т. И., Френкель В. Я. Участники VI Всероссийского съезда физиков в Тбилиси. // Тр. Тбил. ун-та. 1987. Т. 275. С. 134–154.
3. Письмо Дирака И. Е. Тамму 3 января 1929 г. // Архив семьи И. Е. Тамма.
4. Письма Фока Дираку // Ленингр. отд-ние Архива АН СССР. Ф. 1034. Оп. 3. Д. 57.
5. Письма Дирака Фоку // Там же. Д. 172.
6. Фок В. А. О каноническом преобразовании в классической и квантовой механике // Вестн. ЛГУ. Физика. 1959. № 16. С. 67. См. также (30в. С. 428–432 рус. пер.).

ИЗ ПЕРЕПИСКИ ДИРАКА с Я. И. ФРЕНКЕЛЕМ *

Ниже публикуются два письма Я. И. Френкеля Дираку (оригиналы хранятся в Churchill-College, Кембридж) и письмо Дирака В. Я. Френкелю с воспоминаниями о 30-х годах. Это почти все, что сохранилось от переписки, — более ранние письма Дирака пропали во время войны.

Я. И. Френкель — П. Дираку

[весна 1933], Ленинград

...Я все еще нахожусь под впечатлением открытия положительного электрона как экспериментального факта¹. Оно действительно блестяще подтверждает Вашу дырочную теорию. Но, с другой стороны, представляется неудовлетворительным с философской точки зрения заселять мир объектами, которые могут наблюдаться лишь постольку, поскольку они отсутствуют. Эта трудность, вероятно, связана с неадекватностью наших обычных представлений о материи, основанных на чисто корпускулярной точке зрения...

Что Вы думаете о протонах? Если их следует трактовать как элементарные частицы, то тогда мы должны предположить также и существование отрицательных протонов. Если же они представляют собой комбинацию нейтрона и положительного электрона, возникает вопрос: почему нейтроны комбинируются лишь с положительными электронами, а не с отрицательными? И если, далее, нейтроны должны трактоваться как элементарные частицы, удовлетворяющие принципу Паули, должны быть также и «антинейтроны», которые соответствуют дыркам в почти заполненном распределении нейтронов в состояниях с отрицательной энергией.

[Я. И. Френкель]

¹ Это письмо — реакция на открытие в 1932 г. позитрона. См. в наст. сб. аналогичное письмо И. Е. Тамма от 5.06.1933 г. и примечания к нему. Публикуется по тексту: *Френкель Я. И.* Воспоминания. Письма. Документы. М.: Наука, 1986. 353 с.

Я. И. Френкель — П. Дираку

2 июля 1934 г., Ленинград

Мой дорогой Дирак,

я только что получил отпечатанную копию первой половины Вашей книги¹ — и, сообщив об этом редакторам, начал читать ее, прежде чем передать Бронштейну² (который будет ее перево-

* Пер. А. Б. Кожевникова, комментарии О. И. Новик.

дять). Я думаю, что новый вариант Вашей книги будет гораздо более полезным, чем старый, так как он будет доступен тем, кто не смог понять математическую структуру и физическую сущность символизма, введенного в Вашем представлении квантовой теории. Этот символизм теперь введен Вами и интерпретирован очень понятно, и чтение Вашей книги действительно доставляет огромное удовольствие.

Большое спасибо за направление моей заметки о теории Борна в «Proceedings». Думаете ли Вы, что Борн прав в своем утверждении, что уравнения движения нужно выводить из модифицированного принципа Гамильтона с функцией Гамильтона, замененной на лагранжиан? Я пока не вижу никакого оправдания этой процедуре³.

Кстати, интересно отметить, что теория Борна в отличие от обычной позволяет интерпретировать с электромагнитной точки зрения состояния с отрицательной энергией. Действительно, из выражения $e^2/\sqrt{1-E^2/c^2}$ для плотности электрической энергии можно получить и положительные и отрицательные значения из-за присутствия квадратного корня, таким же образом, как из релятивистского выражения для механической энергии $mc^2/\sqrt{1-v^2/c^2}$.

Как Ваши дела? Когда Вы едете в Америку? {...} [нрзб].

Искренне Ваш

Я. Френкель



П. Дирак на 1-й Всесоюзной ядерной конференции. Ленинград, 1933 г.
Шарж Н. А. Мамонтова

¹ Речь идет о втором издании «Принципов квантовой механики» (30b). Книга вышла на английском языке в 1935 г., но еще до ее издания Дирак передал копию рукописи для перевода на русский язык. Русское издание вышло в 1937 г.

² М. П. Бронштейн (1906–1938) – выдающийся советский физик-теоретик. Он был переводчиком первого и второго издания книги Дирака.

³ Дирак представил к публикации статью Френкеля «К борновской теории электрона» (Proc. Roy. Soc. L. 1934. Vol. A146. P. 930–935). В ней более прямым методом, без использования вариационного принципа, были выведены основные результаты нелинейной электродинамики Борна–Инфельда (1934 г.), в частности конечная электромагнитная масса точечного электрона.

13 июля 1974 г.,
Университет штата Флорида,
Физический факультет

Дорогой Френкель, спасибо за Ваше письмо. Я записал то, что помню про случай с лекарством. Получалась интересная история.

В 1933 г. я собирался посетить Ленинград и Москву¹. Ваш отец написал мне незадолго до этого (возможно, что письмо сохранилось среди моей переписки, которую я передал библиотеке Churchill-college в Кембридже). Ваш отец попросил меня привезти немного веронала для Вашей матери², нуждавшейся в нем. Веронал — это довольно сильное снотворное; в то время его нельзя было достать в России. Ваш отец также просил привезти ему немного красок, так как краски, изготавливающиеся в России, были плохого качества. Мы были хорошими друзьями, и я был рад возможности помочь Вашему отцу.

Краски я достал без каких-либо затруднений, а потом отправился к аптекарю за вероналом. Аптекарь объяснил мне, что веронал можно получить только по рецепту врача. Я ответил, что хочу отвезти его больному в Россию, где этого средства просто нет. К счастью, Ваш отец предусмотрительно прислал такой рецепт, и, хотя он был подписан русским врачом, аптекарь принял его. Прежде чем получить лекарство, я должен был расписаться в книге, где регистрировались выданные яды. Аптекарь затем сказал, что доза веронала, указанная в рецепте, велика и превосходит то, что есть у него в запасе, так что он должен будет послать за ним. Я ответил, что это не страшно, так как уезжаю лишь через некоторое время.

Однако оно еще не было получено, когда я связался с аптекарем прямо перед тем, как должен был уехать. Таким образом, возникли трудности. В мои планы входили поездка в Норвегию на двухнедельный отпуск, а затем — визит к Бору в Копенгаген, и все это перед тем, как отправиться в Ленинград. Аптекарь сказал, что вышлет веронал на адрес Бора, и я смогу его там получить.

Когда я приехал к Бору, веронала там не было, но телефонный звонок объяснил, что он лежал на складе таможи. Таможенники не хотели пересылать его, потому что это был опасный яд. Я поговорил с официальным лицом из таможи, и он сказал: «Я полагаю, что веронал необходим Вам для экспериментальных целей». Я ответил: «Нет, он нужен мне для больного в России». Он, похоже, не понял, и снова повторил: «Я полагаю, что веронал нужен Вам для экспериментальных целей». Ему, очевидно, хотелось помочь мне, и он готов был сделать это, если бы я только подтвердил, что веронал нужен мне для экспериментов, но этого я не мог сделать. В конце концов я позвонил Бору, и несколь-

ко слов, сказанных по-датски, решили дело: веронал был послан мне. Влияние Бора в Копенгагене было огромным.

Дальнейшие мои планы состояли в том, чтобы морем добраться до Гельсингфорса, а затем — ночным поездом — в Ленинград. Я не знал, как пойдет дело на финской таможне, теперь уже без помощи Бора. Я сказал финскому таможеннику, что еду транзитом в СССР.

Он специально поинтересовался, не везу ли я табак, сигары или сигареты. Я уверенно ответил: «Нет». После этого он открыл мой чемодан, а там на самом верху была коробка от сигар. Тогда он взглянул на меня понимающе, подмигнул и закрыл мой чемодан. Я подумал, не должен ли я сказать ему, что в коробке не сигары, а только краски. Но я решил все же ничего не говорить и оставить как есть. Ведь если бы он продолжил поиски, то мог найти веронал, и я не знаю, к каким бы трудностям это могло привести.

В Ленинград я добрался без дальнейших трудностей. Русские таможенники мой багаж не проверяли.

В течение недели я был гостем Ваших родителей и тогда видел и Вас. Я очень сожалею, что не слишком много помню о Вашем отце. Только то, что он был в то время очень занят работой над книгой. Но все же у него нашлось время, чтобы нарисовать мой портрет, и я помню, что позируя ему, чуть не заснул. Ваш отец подарил мне красивую лаковую коробочку с нарисованной на ней картинкой, я ее до сих пор храню³.

С наилучшими пожеланиями

Поль Дирак



П. Дирак
Портрет, написанный
Я. И. Френкелем в 1936 г.

¹ О приезде Дирака в СССР в 1933 г. на ядерную конференцию см. С. 168.

² Письмо Я. И. Френкеля Дираку от 31.08.1933 г. (здесь не публикуется). Лекарства предназначались для матери Я. И. Френкеля.

³ Жил у Френкелей Дирак, по всей видимости, не в 1933, а в 1936 г. 1936 г. датирован также портрет Дирака, написанный Френкелем (хранится ныне в Архиве АН СССР. Ленинград).

БИБЛИОГРАФИЯ ¹

1. РАБОТЫ ДИРАКА

1924

- (1) Dissociation under a temperature gradient // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1924. Vol. 22. P. 132–137.
- (2) Note on the relativity dynamics of a particle // Phil. Mag. 1924. Vol. 47. P. 1158–1159.
- (3) Note on the Doppler principle and Bohr's frequency condition // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1924. Vol. 22. P. 432–433.
- (4) The conditions for statistical equilibrium between atoms, electrons and radiation // Proc. Roy. Soc. London. A. 1924. Vol. 106. P. 581–596.

1925

- (5) The adiabatic invariants of the quantum integrals // Proc. Roy. Soc. London. A. 1925. Vol. 107. P. 725–734.
- (6) The effect of Compton scattering by free electrons in a stellar atmosphere // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1925. Vol. 85. P. 825–832.
- (7) The adiabatic hypothesis for magnetic fields // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1925. Vol. 23. P. 69–72.
- (8) The fundamental equations of quantum mechanics // Proc. Roy. Soc. London. A. 1925. Vol. 109. P. 642–653.

1926

- (9) Quantum mechanics and a preliminary investigation of the hydrogen atom // Proc. Roy. Soc. London. A. 1926. Vol. 110. P. 561–579.
- (10) The elimination of the nodes in quantum mechanics // Ibid. Vol. 111. P. 281–305.
- (11) Relativity quantum mechanics with an application to Compton scattering // Ibid. P. 405–423.
- (12) Quantum mechanics: Diss. Cambridge, 1926. 136 p.
- (13) On quantum algebra // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1926. Vol. 23. P. 412–418.
- (14) On the theory of quantum mechanics // Proc. Roy. Soc. London. A. 1926. Vol. 112. P. 661–677.
- (15) The Compton effect in wave mechanics // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1926. Vol. 23. P. 500–507.

1927

- (16) The physical interpretation of the quantum dynamics // Proc. Roy. Soc. London. A. 1927. Vol. 113. P. 621–641.
- (17) The quantum theory of the emission and absorption of radiation // Ibid. Vol. 114. P. 243–265.
- (18) The quantum theory of dispersion // Ibid. P. 710–728.

¹ Разделы 1–3 взяты с незначительными добавлениями из: Dalitz R. H., Peierls R. Paul Adrien Maurice Dirac. 1902–1984 // Biogr. Mem. Roy. Soc. 1986. Vol. 32. P. 137–185. Разделы 4 и 5 составлены А. Б. Кожевниковым и О. И. Новик.

- (19) Über die Quantenmechanik der Stossvorgänge // Ztschr. Phys. 1927. Bd. 44. S. 585–595.

1928

- (20) The quantum theory of the electron // Proc. Roy. Soc. London. A. 1928. Vol. 117. P. 610–624.
(21) The quantum theory of the electron. Pt II // Ibid. Vol. 118. P. 351–361.
(22) Discussion // Electrons and photons: V Conseil de phys. Inst. Intern. Phys. Solvay, Oct. 24–29. 1927, Bruxelles. P.: Gauthier-Villars, 1928. P. 253–263.
(23) Über die Quantentheorie des Elektrons // Phys. Ztschr. 1928. Jg. 29. S. 561–563.
(23a) Zur Quantentheorie des Elektrons // Quantentheorie und Chemie: Leipzig. vortr. Leipzig: Hirzel, 1928. S. 85–94.

1929

- (24) The basis of statistical quantum mechanics // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1929. Vol. 25. P. 62–66.
(25) Quantum mechanics of many-electron systems // Proc. Roy. Soc. London. A. 1929. Vol. 123. P. 714–733.

1930

- (26) A theory of electrons and protons // Proc. Roy. Soc. London. A. 1930. Vol. 126. P. 360–365.
(27) On the annihilation of electrons and protons // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1930. Vol. 26. P. 361–375.
(28) Note on exchange phenomena in the Thomas atom // Ibid. P. 376–385.
(29) The proton // Nature. 1930. Vol. 126. P. 605–606.
(30) The principles of quantum mechanics. Oxford: Clarendon, X+257 p.; Пер. на нем. яз.: Die Prinzipien der Quantenmechanik. Leipzig, 1930. XI+274 S.; Пер. на фр. яз.: Les principes de la mécanique quantique. P., 1931. VIII+314 p.
(30a) The principles of quantum mechanics. 2nd ed. Oxford: Clarendon, 1935. XI+300 p.
(30b) The principles of quantum mechanics. 3rd ed. Oxford: Clarendon, 1947. XII+311 p.
(30c) The principles of quantum mechanics. 4th ed. Oxford: Clarendon, 1968. 312 p.
(30d) The principles of quantum mechanics. 4th ed., rev. Oxford: Clarendon, 1976. XII+314 p.
(31) Приближенные методы: Доп. авт. к рус. пер. // Дирак П. А. М. Основы квантовой механики. М.; Л.: Гостехиздат, 1932. С. 243–257².

1931

- (32) Note on the interpretation of the density matrix in the many electron problem // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1931. Vol. 27. P. 240–243.
(33) Quantized singularities in the electromagnetic field // Proc. Roy. Soc. London. A. 1931. Vol. 133. P. 60–72.
(34) Quelques problèmes de mécanique quantique // Ann. Inst. Henri Poincaré. 1931. Vol. 1, fasc. 4. P. 357–400.

1932

- (35) Photo-electric absorption in hydrogen-like atoms // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1932. Vol. 28. P. 209–218. With J. W. Harding.
(36) Relativistic quantum mechanics // Proc. Roy. Soc. London. A. 1932. Vol. 136. P. 453–464.

² Рукопись «Approximate methods» хранится в архиве Churchill-College, Cambridge, England.

(37) On quantum electrodynamics // Phys. Ztschr. Sowjetunion. 1932. Bd. 2. S. 468–479. With V. A. Fock, B. Podolsky.

1933

- (38) The Lagrangian in quantum mechanics // Phys. Ztschr. Sowjetunion. 1933. Bd. 3. S. 64–72.
(39) The reflection of electrons from standing light waves // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1933. Vol. 29. P. 297–300. With P. Kapitza.
(40) Homogeneous variables in classical dynamics // Ibid. P. 389–400.
(41) Statement of a problem in quantum mechanics // J. London. Math. Soc. 1933. Vol. 8. P. 274–277.

1934

- (42) Théorie du positron // Septième Conseil de Physique Solvay (Structure et propriétés des noyaux atomiques), 22–29 Oct. 1933. P.: Gauthier – Villars, 1934. P. 203–230.
(43) Теория позитрона // Атомное ядро: Сб. докл. I Всесоюз. ядер. конф., 24–30 сент. 1933 г. Л.; М.: ОНТИ, 1934. С. 129–144.
(43а) Из дискуссии по докладу Дирака // Там же. С. 144–154.
(44) Theory of electrons and positrons // Nobel lectures — physics 1932–1941. Amsterdam: Elsevier, 1965. P. 320–325.
(45) Discussion of the infinite distribution of electrons in the theory of the positron // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1934. Vol. 30. P. 150–163.

1935

- (46) The electron wave equation in De-Sitter space // Ann. Math. 1935. Vol. 36. P. 657–669.

1936

- (47) Does conservation of energy hold in atomic processes? // Nature. 1936. Vol. 137. P. 298–299.
(48) Relativistic wave equations // Proc. Roy. Soc. London. A. 1936. Vol. 155. P. 447–459.
(49) Wave equations in conformal space // Ann. Math. 1936. Vol. 37. P. 429–442.

1937

- (50) The cosmological constants // Nature. 1937. Vol. 139. P. 323.
(51) Physical science and philosophy (A reply to Dr. H. Dingle) // Ibid. P. 1001–1002.
(52) Complex variables in quantum mechanics // Proc. Roy. Soc. London. A. 1937. Vol. 160. P. 48–59.
(53) The reversal operator in quantum mechanics // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1937. С. 569–575.

1938

- (54) A new basis for cosmology // Proc. Roy. Soc. London. A. 1938. Vol. 165. P. 199–208.
(55) Classical theory of radiating electrons // Ibid. Vol. 167. P. 148–169.

1939

- (56) The relation between mathematics and physics (James Scott Prize Lecture) // Proc. Roy. Soc. Edinburgh. 1939. Vol. 59. P. 122–129.
(57) A new notation for quantum mechanics // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1939. Vol. 35. P. 416–418.
(58) La théorie de l'électron et du champ électromagnétique // Ann. Inst. Henri Poincaré. 1939. Vol. 9. P. 13–49.

1940

- (59) Dr. M. Mathisson (obituary) // Nature. 1940. Vol. 146. P. 613.

1941

- (60) The theory of the separation of isotopes by statistical methods. Неопубликована³.

1942

- (61) The physical interpretation of quantum mechanics (Bakerian Lecture 1941) // Proc. Roy. Soc. London. A. 1942. Vol. 180. P. 1-40.
 (62) On Lorentz invariance in the quantum theory // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1942. Vol. 38. P. 193-200. With R. Peierls and M. H. L. Pryce.
 (63) The motion in a self - fractionating centrifuge: Rep. N BR 42. May 1942; declassified 1946 as Report BDDA 7. L.: HMSO, 1942.
 (64) Expansion of U-sphere enclosed in a container: Rep. N MSD 2. 1942.
 (65) Neutron multiplication in a sphere of uniform density surrounded by a shell of non-uniform density: Rep. N MSD 3. 1942.
 (66) Estimate of the efficiency of energy release with a non-scattering container: Rep. N MSD 4. 1942.

1943

- (67) Quantum electrodynamics // Commun. Dublin Inst. Adv. Stud. A. 1943. N 1. P. 1-36.
 (68) Approximate rate of neutron multiplication for a solid of arbitrary shape and uniform density: Rep. N MSD 5. 1943. Pt 1. 11 p.
 (69) Application to the oblate spheroid hemisphere and oblate hemispheroid: Rep. N MSD 5. 1943. Pt 2. 12 p. With K. Fuchs. R. Peierls, P. Preston.

1945

- (70) Unitary representation of the Lorentz group // Proc. Roy. Soc. London. A. 1945. Vol. 183. P. 284-295.
 (71) On the analogy between classical and quantum mechanics // Rev. Mod. Phys. 1945. Vol. 17. P. 195-199.
 (72) Applications of quaternions to Lorentz transformations // Proc. Roy. Irish Acad. A. 1945. Vol. 50. P. 261-270.
 (73) Quelques développement sur la théorie atomique: (Conf. faite au Palais de la Découverte, le 6 Dec. 1945). P.: Press-univ., 1948. 16 p.

1946

- (74) Developments in quantum electrodynamics // Commun. Dublin. Inst. Adv. Stud. A. 1946. N 3. P. 1-33.

1947

- (75) The difficulties in quantum electrodynamics // Rep. Intern. Conf. Fundam. Particles and Low Temperatures, July 1946. L.: Phys. Soc., 1947. Vol. 1. P. 10-14.

1948

- (76) On the theory of point electrons // Phil. Mag. 1948. Vol. 39. P. 31-34.
 (77) Quantum theory of localizable dynamic system // Phys. Rev. 1948. Vol. 73. P. 1092-1103.
 (78) The theory of magnetic poles // Ibid. Vol. 74. P. 817-830.

1949

- (79) Forms of relativistic dynamics // Rev. Mod. Phys. 1949. Vol. 21. P. 392-399.
 (80) La seconde quantification // Ann. Inst. Henri Poincaré. 1949. Vol. 11. P. 15-47.

³ На нее ссылается Cohen K. P. в кн.: The theory of isotope separation as applied to the large-scale production of ²³⁵U. N. Y., 1951. P. 29, 125.

- (81) A new meaning for gauge transformations in electrodynamics // *Nuovo cim.* 1950. Vol. 7. P. 925–938.
 (82) Generalized Hamiltonian dynamics // *Canad. J. Math.* 1950. Vol. 2. P. 129–148.
 (83) Field theory // *Proc. Harwell Nucl. Phys. Conf.*, Sept. 1950: AERE Rep. N 68. 1950. P. 114–115.

1951

- (84) The Hamiltonian form of field dynamics // *Canad. J. Math.* 1951. Vol. 3. P. 1–23.
 (85) The relation of classical to quantum mechanics // *Proc. Second Canad. Math. Congr.*, Vancouver, 1949. Toronto: Univ. press, 1951. P. 10–31.
 (86) Is there an ether? // *Nature.* 1951. Vol. 168. P. 906–907.
 (87) A new classical theory of electrons // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1951. Vol. 209. P. 291–296.
 (88) Is there an ether? (Reply to H. Bondi and T. Gold) // *Nature.* 1952. Vol. 169. P. 146.
 (88a) Is there an ether? (Reply to L. Infeld) // *Ibid.* P. 702.
 (89) A new classical theory of electrons. II // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1952. Vol. 212. P. 330–339.
 (90) Les transformations de jauge en électrodynamique // *Ann. Inst. Henri Poincaré.* 1952. Vol. 13. P. 1–42.

1953

- (91) The Lorentz transformation and absolute time // *Proc. Lorentz – Kamerlingh Onnes Mem. Conf.*, Leiden, June 22–26. 1953. Amsterdam, 1953.–
Idem // *Physica.* 1953. Vol. 19. P. 888–896.
 (92) Méthodes générales de la mécanique quantique relativiste // *Colloq. intern. CNRS «Particules fondamentales et noyau»*, 24–29 April 1950.

1952

- P., 1953. P. 27–47.
 (93) De Stellung des Äthers in der Physik // *Naturwiss. Rdsch.* 1953. Jg. 6. S. 441–446.

1954

- (94) A new classical theory of electrons. III // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1954. Vol. 223. P. 438–445.
 (95) Quantum mechanics and the ether // *Sci. Monogr.* 1954. Vol. 78. P. 142–146.

1955

- (96) The stress tensor in field dynamics // *Nuovo cim.* 1955. Vol. 1. P. 16–36.
 (97) Gauge-invariant formulation of quantum electrodynamics // *Canad. J. Phys.* 1955. Vol. 33. P. 650–660.
 (98) Note on the use of non-orthogonal wave functions in perturbation calculations // *Ibid.* P. 709–712.
 (99) Symmetry in the atomic world // *J. Sci. Ind. Res. Delhi. A.* 1955. Vol. 14. P. 153–165.

1957

- (100) The vacuum in quantum electrodynamics // *Nuovo cim.* 1957. Vol. 6. P. 322–339.
 (101) Электроны в вакуум. М.: Знание, 1957. 15 с.; Пер. на чеш. яз.: *Elektrony a vakuum* // *Pokr. mat., fiz. a astron.* 1959. Roč. 4. S. 309–317.

1958

- (102) Generalized Hamilton dynamics // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1958. Vol. 246. P. 326–332.

- (103) The theory of gravitation in Hamiltonian form // *Ibid.* P. 333–343.
 (104) The electron wave equation in Riemannian space // *Max – Planck – Festschrift*/Ed. B. Kockel, W. Macke, A. Papapetrou. B.: Verl. Wiss., 1958. P. 339–344.

1959

- (105) Fixation of coordinates in the Hamiltonian theory of gravitation // *Phys. Rev.* 1959. Vol. 114. P. 924–930.
 (106) Energy of the gravitational field // *Phys. Rev. Lett.* 1959. Vol. 2. P. 368–371.
 (107) Современное состояние релятивистской теории электрона // *Тр. Ин-та истории естествознания и техники.* 1959. Т. 22. С. 32–33.

1960

- (108) Gravitationswellen // *Phys. Bl.* 1960. Jg. 16. S. 364–366; *Naturwiss. Rdsch.* 1960. Jg. 13. S. 165–168.
 (109) A reformulation of the Born – Infeld electrodynamics // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1960. Vol. 257. P. 32–43.

1961

- (110) Prof. Erwin Schrödinger, *For. Mem. R. S. (obituary)* // *Nature.* 1961. Vol. 189. P. 355–356.
 (111) Reply to a letter of R. H. Dicke on «Dirac's cosmology and Mach's principle» // *Ibid.* Vol. 192. P. 441.

1962

- (112) The energy of the gravitational field // *Les théories relativistes de la gravitation: Colloq. Intern. CNRS, Royaumont, 1959. P., 1962. P. 385–393.*
 (113) Interacting gravitational and spinor fields // *Recent developments in general relativity.* Warsaw: PWN – Pol. Sci. publ., 1962. P. 191–200.
 (114) An extensible model of the electron // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1962. Vol. 268. P. 57–67.
 (115) Particles of finite size in the gravitation field // *Ibid.* Vol. 270. P. 354–356.
 (116) The conditions for a quantum field theory to be relativistic // *Rev. Mod. Phys.* 1962. Vol. 34. P. 592–596.

1963

- (117) The evolution of the physicist's picture of nature // *Sci. Amer.* 1963. Vol. 208. P. 45–53.
 (118) A remarkable representation of the 3+2 de Sitter group // *J. Math. Phys.* 1963. Vol. 4. P. 901–909.

1964

- (119) Foundations of quantum mechanics // *Nature.* 1964. Vol. 203. P. 115–116.
 (120) Hamiltonian methods and quantum mechanics // *Proc. Roy. Irish Acad. A.* 1964. Vol. 63. P. 49–59.
 (121) Equivalence of the Schrödinger and Heisenberg pictures // *Nature.* 1964. Vol. 204. P. 771–772.
 (122) Lectures on quantum mechanics. N. Y.: Belfer Grad. Sch. Sci. Yeshiva Univ., 1964. V+84 p.

1965

- (123) Quantum electrodynamics without dead wood // *Phys. Rev. B.* 1965. Vol. 139. P. 684–690.

1966

- (124) Lectures on quantum field theory. N. Y.: Belfer Grad. Sch. Sci. Yeshiva Univ., 1966. VIII+151 p.

1967

- (125) The versatility of Niels Bohr // Niels Bohr, his life and work/Ed. S. Rozental. Amsterdam: North - Holland, 1967. P. 306-309.

1968

- (126) The physical interpretation of quantum electrodynamics // Commentarii. Pont. Acad. Sci. 1968. Vol. 2 (13). P. 1-12.
 (126a) The scientific work of George Lemaitre // Ibid. Vol. 2 (11). P. 18.
 (127) Methods in theoretical physics // From a life of physics: Evening lect. at the Intern. Centre for Theor. Phys., Trieste, Italy (Special suppl. of IAEA Bull.). Vienna: IAEA, 1969. P. 10.

1969

- (128) The quantization of the gravitational field // Contemporary physics: Proc. Intern. Symp., Trieste, 7-28 June 1968/Ed. L. Fonda. Vienna: IAEA, 1969. Vol. 1. P. 539-543.
 (129) Can equations of motion be used? // Proc. Coral Gables Conf. on Fundam. Interactions at High Energies, Coral Gables, Jan. 22-24. 1969. N. Y.: Gordon and Breach, 1969. P. 1-18.
 (130) Hopes and fears // Eureka. 1969. N 32. P. 2-4.

1970

- (131) Can equations of motion be used in high energy physics? // Phys. Today. 1970. Vol. 23(4). P. 29-31.

1971

- (132) A positive - energy relativistic wave equation // Proc. Roy. Soc. London. A. 1971. Vol. 322. P. 435-445.
 (133) The development of quantum theory. N. Y.: Gordon and Breach, 1971. 66 p.
 (134) A positive - energy relativistic wave equation // Invited papers, tracts in mathematics and the natural sciences/Ed. M. Dal Cin, G. J. Iverson, A. Perlmutter. N. Y.: Gordon and Breach, 1971. Vol. 3. P. 1-11.

1972

- (135) Evolutionary cosmology // Commentarii. Pont. Acad. Sci. 1972. Vol. 2(46). P. 1-15.
 (136) Discrete subgroups of the Poincaré group // Проблемы теоретической физики. Памяти И. Е. Тамма. М.: Наука, 1972. С. 45-51.
 (137) Zitterbewegung of the new positive-energy particle // Fundamental interactions in physics and astrophysics/Ed. G. Iverson, A. Perlmutter, S. Mintz. N. Y.: Plenum press, 1972. P. 354-364.
 (138) Relativity and quantum mechanics // Fields and Quanta. 1972. Vol. 3. P. 139-164.
 (139) A positive - energy relativistic wave equation. II // Proc. Roy. Soc. London. A. 1972. Vol. 328. P. 1-7.
 (140) The variability of the gravitational constant // Cosmology, fusion and other matters/Ed. F. Reines, Boulder (Col.): Colorado Assoc. United press, 1972. P. 56-59.

1973

- (141) Development of the physicist's conception of nature // The physicist's conception of nature/Ed. J. Mehra. Dordrecht: Reidel, 1973. P. 1-14.
 (142) Fundamental constants and their development in time // Ibid. P. 45-54.
 (143) Long range forces and broken symmetries // Proc. Roy. Soc. London. A. 1973. Vol. 333. P. 403-418.
 (144) The development of quantum theory // Fiz. szemle. 1973. Évf. 23. Old. 289-294.
 (145) New ideas of space and time // Naturwissenschaften. 1973. Jg. 60. S. 529-531.

- (146) Long range forces and broken symmetries // *Fundamental interactions in physics*/Ed. B. Kursunoglu, A. Perlmutter. N. Y.: Plenum press, 1973. P. 1-17.
- (147) Some of the early developments of quantum theory // *Impact of basic research on technology*/Ed. B. Kursunoglu, A. Perlmutter. N. Y.: Plenum press, 1973. P. 1-13.

1974

- (148) Cosmological models and the large numbers hypothesis // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1974. Vol. 338. P. 439-446.
- (149) Spinors in Hilbert space. N. Y.: Plenum press, 1974. VI+91 p.
- (150) An action principle for the motion of particles // *J. Gen. Rel. Grav.* 1974. Vol. 5. P. 741-748.
- (150a) The development of quantum mechanics // *Contributi del Centro Linceo Interdisciplinare di scienze matematiche e loro applicazioni.* Rome: Acad. Naz. Lincei, 1974. N 4. P. 1-11.
- (151) Магнитный монополю // *БСЭ.* 3-е изд. 1974. Т. 15. С. 186-187.

1975

- (152) Variation of G // *Nature.* 1975. Vol. 254. P. 273.
- (153) The large numbers hypothesis and its consequences // *Theories and experiments in high-energy physics*/Ed. A. Perlmutter, S. M. Widmayer. N. Y.: Plenum press, 1975. P. 443-456.
- (154) General theory of relativity. N. Y.: Wiley, 1975. VIII+69 p.
- (156) James Chadwick // *Commentarii. Pont. Acad. Sci.* 1975. Vol. 3 (6). P. 1-5.
- (157) Does the gravitational constant vary? // *Ibid.* Vol. 3(7). P. 1-7.
- (158) An historical perspective of spin // *Proc. Summer Studies of High-Energy Physics with Polarized Beams, July 1974*/Ed. J. B. Roberts. Argonne: Nat. Lab., 1975. Rep. ANL/HEP 75-02, ch. XXXII. P. 1-11.

1976

- (159) Theory of magnetic monopoles // *New pathway in high-energy physics*/Ed. A. Perlmutter. N. Y.: Plenum press, 1976. Vol. 1. P. 1-14.
- (160) Heisenberg's influence on physics // *Commentarii. Pont. Acad. Sci.* 1976. Vol. 3(14). P. 1-15.

1977

- (161) The relativistic wave equation of electron // *Fiz. szemle.* 1977. Évf. 27. Old. 443-450.- Сокр. вариант: The relativistic electron wave equation // *Europhys. News.* 1977. Vol. 8(10). P. 1-4.
- (162) Recollection of an exciting era // *History of twentieth century physics*/Ed. C. Weiner. N. Y.: Acad. press, 1977. P. 109-146.
- (163) Ehrenhaft, the subelectron and the quark // *Ibid.* P. 290-293.
- (164) The dynamics of streams of matter // *Deeper pathway in highenergy physics*/Ed. A. Perlmutter, L. F. Scott. N. Y.: Plenum press, 1977. P. 1-11.
- (165) Annahmen und Voreingenommenheit in der Physik // *Naturwiss. Rdsch.* 1977. Jg. 30(12). S. 429-432.

1978

- (166) The prediction of antimatter: (The 1st H. R. Crane lecture, Apr. 17, 1978). *Ann Arbor (Mich.): Univ. Mich. press,* 1978. 25 p.
- (167) Consequences of varying G // *Current trends in the theory of fields:* AIP Conf. Proc. N 48/Ed. J. E. Lannutti, P. K. Williams. N. Y.: Amer. Inst. Phys., 1978. P. 169-174.
- (168) The large numbers hypothesis and the cosmological variation of the gravitational constant // *On the measurement of cosmological variations of the gravitational constant*/Ed. L. Halpern. Gainesville (Fla): Univ. Fla press, 1978. P. 3-17.
- (169) New ideas about gravitation and cosmology // *Commentarii. Pont. Acad. Sci.* 1978. Vol. 3 (24). P. 1-10.

- (170) Directions in physics/Ed. H. Hora, J. R. Shepanski. N. Y.: Wiley, 1978. IX+95 p. Lectures delivered during a visit to Australia and New Zealand, Aug./Sept. 1975.
- (171) The monopole concept // Intern. J. Theor. Phys. 1978. Vol. 17. P. 235-247.
- (172) Fundamental physical constants and their development in time // Fiz. szemle. 1978. Evf. 28. Old. 201-204.
- (173) The mathematical foundations of quantum theory // Mathematical foundations of quantum theory/Ed. A. R. Marlow. N. Y.: Acad. press. 1978. P. 1-8.
- (174) A new approach to cosmology theory // New frontiers in high energy physics/Ed. B. Kursunoglu, A. Perlmutter, L. F. Scott, O. Kadiroglu, J. Nowakowski, F. Krausz. N. Y.: Plenum press, 1978. P. 1-16.

1979

- (175) The large numbers hypothesis and the Einstein theory of gravitation // Proc. Roy. Soc. London. A. 1979. Vol. 365. P. 19-30.
- (176) Developments of Einstein's theory of relativity // On the path of Albert Einstein/Ed. A. Perlmutter, L. F. Scott. N. Y.: Plenum press, 1979. P. 1-13.
- (178) The excellence of Einstein's theory of gravitation // Impact Sci. Soc. 1979. Vol. 29. P. 11-14.
- (179) The test of time // UNESCO Courier. 1979. May. P. 17-23; Пер. на нем. яз.: Der Zeittest // Naturwiss. Rdsch. 1980. Jg. 33. S. 353-356.
- (180) Einstein's influence on physics // Einstein Galileo. Commemoration of Albert Einstein/Libreria Editrice Vaticana. Città del Vaticano: Pont. Acad. Sci., 1979. P. 19-23.

1980

- (181) The variation of G and the problem of the Moon // Recent developments in high energy physics/Ed. A. Perlmutter, L. F. Scott. N. Y.: Plenum press, 1980. P. 1-7.
- (182) Why we believe in the Einstein theory // Symmetries in science/Ed. B. Gruber, R. S. Millman. N. Y.: Plenum press, 1980. P. 1-11.
- (183) Dirac recalls Kapitza // Phys. Today. 1980. Vol. 33(5). P. 15.
- (183a) A little «prehistory» // The Old Cothamian. 1980. P. 9.

1981

- (184) Does renormalization make sense? // Conf. Perturbative Quant. Chromodyn.: AIP Conf. Proc. N. Y., 1981. Vol. 74. P. 129-130.
- (185) Models of the Universe // Gauge theories, massive neutrinos and proton decay/Ed. A. Perlmutter. N. Y.: Plenum press, 1981. P. 1-9.
- (185a) Einstein and the development of physics // The impact of modern scientific ideas on society. Dordrecht: Reidel, 1981. P. 13-23.

1982

- (186) Pretty mathematics // Intern. J. Theor. Phys. 1982. Vol. 21. P. 603-605.
- (187) The variation of G and the quantum theory // Proc. II Marcel Grossmann Meet. Gen. Relat./Ed. R. Ruffini. Amsterdam: North-Holland, 1982. Vol. A. P. 1-6.
- (188) The early years of relativity // Albert Einstein historical and cultural perspectives: the centennial symposium in Jerusalem/Ed. G. Holton, Y. Elkana. Princeton: Univ. press, 1982. P. 79-90.

1983

- (189) The present state of gravitational theory // Field theory in elementary particles/Ed. A. Perlmutter. N. Y.: Plenum press, 1983. P. 1-10.
- (190) The origin of quantum field theory // The birth of particle physics/Ed. L. M. Brown, L. Hoddeson. Cambridge: Univ. press, 1983. P. 39-55.
- (190a) Kapitza's life as I know it // Proceedings of the International Seminar on Nuclear War. Erice, August 19-24, 1982.- Servizio Documentazione del Laboratori Nationali di Frascati dell'INFN, 1983. P. 261.

- (191) The requirements of fundamental physical theory // Europ. J. Phys. 1984. Vol. 5. P. 65–67.
 (192) The future of atomic physics // Intern. J. Theor. Phys. 1984. Vol. 23. P. 677–681.
 (193) Blackett and the positron // Cambridge physics in the thirties/Ed. J. Hendry. Bristol: Hilger, 1984. P. 61–62.

- (194) The inadequacies of quantum field theory // Paul Adrien Maurice Dirac. Reminiscences about a great physicist./Ed. B. Kursunoglu, E. P. Wigner. Cambridge: Univ. press, 1987. P. 194–198.
 (195) The arrival of quantum mechanics (n. d. or p.).
 (196) Elementary particles and their interactions // (held by the Pauli Library at CERN) (n. d. or p.), 8 p.

2. ЗАПИСИ ЛЕКЦИЙ

1. Lectures on quantum mechanics. 1931. Reported by B. Hoffmann. Princeton. Mimeographed. (Library, Mathematical Institute, Oxford, and elsewhere).
2. Lectures on quantum electrodynamics. 1934–1935. Notes by Dr. Boris Podolsky (1st semester) and Dr. Nathan Rosen (2nd semester). Institute for Advanced Study, Princeton (N. Y.). Mathematical publications 1934–1935. Vol. 2. Mimeographed. (Mathematics Department, Columbia University).
3. Lectures on quantum electrodynamics. 1946. Notes by S. Kusaka. Palmer Physical Lab., Princeton University, Fall term. Mimeographed. (Library, Brookhaven National Laboratory).
4. The relation of classical to quantum mechanics. 7 September. 1949. (Physics Department Library, Columbia University).
5. Lectures on quantum mechanics and relativistic field theory. 1955. Notes by K. K. Gupta and G. Sudarshan. Tata Inst. Fund. Research: Lectures on Mathematics and Physics 1. Mimeographed.
6. The basic ideas of quantum mechanics. A course of lectures. January — March 1969. Notes taken by G. D. Kaiser and R. M. Williams (reproduced from typescript) Coral Gables, Florida. (Cambridge University Library).
7. The evolution of our understanding of nature. 1971. Univ. Miami, Center for Theoretical studies. Coral Gables, Florida. (Cambridge University Library).

3. ЛЕКЦИИ ДИРАКА В ЛИНДАУ

С момента их организации Дирак регулярно участвовал и выступал на собраниях Нобелевских лауреатов в Lindau (на Боденском озере). Его лекции записывались на магнитофон и находятся в распоряжении Ständiger Arbeitsausschluss für die Tagungen der Nobelpreisträger in Lindau. Обычно эти речи не публикуются, но сокращенные тексты некоторых из выступлений Дирака появились в печати (см. № (93), (101), (108), (118), (145), (165), (191).

- 1953 Quantenmechanik und der Äther
 1956 Electrons and the vacuum
 1959 Gravitational waves
 1965 The foundations of quantum mechanics
 1968 How far will quantum mechanics go?
 1971 Fundamental problems of physics
 1973 New ideas of space and time
 1976 Basic beliefs and prejudices in physics
 1979 Does the gravitational constant vary?
 1982 The requirements of fundamental physical theory

4. РУССКИЙ ДИРАК

Кроме работ (31), (43), (43а), (101), (107), (151), которые были опубликованы сразу на русском языке, имеются переводы следующих работ Дирака:

- (8) Основные уравнения квантовой механики // УФН. 1977. Т. 122, вып. 4. С. 611–621.
- (17) Квантовая теория испускания и поглощения излучения // Эйнштейновский сборник, 1985–1986. М.: Наука, 1988. С. 215–245.
- (20) Квантовая теория электрона. I // Тр. Ин-та истории естествознания и техники. 1959. Т. 22. С. 34–52.
- (21) Квантовая теория электрона. II // Там же. С. 53–68.
- (26) Теория электронов и протонов // УФН. 1930. Т. 10. С. 581–591.
- (30) Основы квантовой механики/Пер. М. П. Бронштейна под ред. Д. Д. Иваненко. М.; Л.: Гостехиздат, 1932. 324 с.
- (30а) Основы квантовой механики/Пер. под ред. М. П. Бронштейна. 2-е изд. Л.; М.: Гостехиздат, 1937. 320 с.
- (30б) Принципы квантовой механики/Пер. с 4-го изд. Ю. Н. Демкова, Г. Ф. Друкарева под ред. В. А. Фока. М.: Физматгиз, 1960. 434 с.
- (30в) Принципы квантовой механики/Пер. с 4-го англ. изд. Ю. Н. Демкова, Г. Ф. Друкарева под ред. В. А. Фока. (2-е изд., доп.; пер. А. Г. Мирнова работы П. Дирака «Лекции по квантовой механике» см.: (122)). М.: Наука, 1979. 480 с.
- (33) Квантованные сингулярности в электромагнитном поле // Монополь Дирака: Сб. ст. М.: Мир, 1970. С. 40–57.
- (37) Дирак П. А. М., Фок В. А., Подольский Б. О квантовой электродинамике // Фок В. А. Работы по квантовой теории поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. С. 70–87.
- (44) Теория электронов и позитронов // Гейзенберг В., Шредингер Э., Дирак П. А. М. Современная квантовая механика: Три нобелевских доклада. Л.; М.: Гостехиздат, 1934. С. 62–75.— То же // Хрестоматия по истории физики: Современная физика/Сост. Г. М. Голин. Минск: Вышэйш. шк., 1979. С. 197–203.
- (50) Космологические постоянные // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979. С. 538–539.
- (78) Теория магнитных полюсов // Монополь Дирака: Сб. ст. М.: Мир, 1970. С. 58–91.
- (82) Обобщенная гамильтонова динамика // Вариационные принципы механики/Под ред. Л. С. Полака. М.: Физматгиз, 1959. С. 705–722.
- (110) Профессор Эрвин Шредингер // Шредингер Э. Новые пути в физике: Ст. и речи. М.: Наука, 1971. С. 387–389.
- (122) Лекции по квантовой механике. М.: Мир, 1968. 84 с.
- (124) Лекции по квантовой теории поля. М.: Мир, 1971. 243 с.
- (125) Многогранность личности Нильса Бора // Нильс Бор. Жизнь и творчество. М.: Наука, 1967. С. 21–25.
- (127) Методы теоретической физики // УФН. 1970. Т. 102, вып. 2. С. 291–298.
- (117) Эволюция физической картины природы // Элементарные частицы. Над чем думают физики. М.: Физматгиз, 1965. Вып. 3. С. 123–139.
- (131) Можно ли использовать уравнения движения в физике высоких энергий // УФН. 1971. Т. 103, вып. 1. С. 121–126.
- (133) Развитие квантовой теории // Природа. 1972. № 3. С. 67–73.
- (149) Спиноры в гильбертовом пространстве. М.: Мир, 1978. 123 с.
- (154) Общая теория относительности. М.: Атомиздат, 1978. 65 с.
- (161) Релятивистское волновое уравнение электрона // УФН. 1979. Т. 128, вып. 4. С. 681–691.
- (162) Воспоминания о необычайной эпохе // Там же. 1987. Т. 153, вып. 1. С. 105–134.
- (170) Пути физики. М.: Энергоатомиздат, 1983. 88 с.
- (179) Подтверждено временем // Курьер Юнеско. 1979. Июнь. С. 17, 21–23.

В сборнике П. А. М. Дирак «К созданию квантовой теории поля». М.: Наука, 1990. 458 с. опубликованы работы: (8), (14), (16), (17), (20), (21),

В сборнике: П. А. М. Дирак «Воспоминания о необычайной эпохе». М.: Наука. Физматлит, 1990, 206 с. опубликованы работы (44), (126), (131), (141), (162), (166), (170), (178), (185а), (190), (191).

5. РАБОТЫ О ДИРАКЕ И ПОСВЯЩЕННЫЕ ЕМУ

1. *Heisenberg W.* Buchbesprechung: P. A. M. Dirac. The principles of quantum mechanics // Metallwirtschaft. 1930. Jg. 9. S. 988.
2. *Бронштейн М. П.* [Рецензия] // УФН. 1931. Т. 11. С. 355.— Рец. на кн.: Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики.
3. Дирак, Поль Адриан Морис // БСЭ. 1935. Т. 22. С. 505 и последующие изд.
4. *Laue M.* Max — Planck — Medaille an Paul Adrien Maurice Dirac // Phys. Bl. 1952. Jg. 8. S. 512—513.
5. Dirac, Paul Adrien Maurice // Encyclopaedia Britannica. 1958. Vol. 7. P. 416 и последующие изд.
6. Paul Adrien Maurice Dirac // Hermann A. Grosse Physiker. Stuttgart: Battenberg, 1959. S. 124—125.
7. *Глебов Л. А.* К предыстории квантово-релятивистской теории электрона // Тр. Ин-та истории естествознания и техники. 1960. Т. 34. С. 157—172.
8. *Hanson N. R.* Discovering the positron. Pt I // Brit. J. Phil. Sci. 1961. Vol. 12. P. 194—214.
9. *Hanson N. R.* Discovering the positron. Pt II // Ibid. 1962. Vol. 12. P. 299—313.
10. *Hanson N. R.* The concept of the positron. A philosophical analysis. L.; N. Y.: Cambridge Univ. press, 1963. 225 p.
11. *Kuhn T., Wigner E. P.* Interview with P. A. M. Dirac. Five sessions // Archive for history of quantum physics. Copenhagen, 1963. 115 p. (неопубл.).
12. Dirac, Paul Adrien Maurice // Modern men of science. N. Y.: McGraw-Hill, 1968. Vol. 2. P. 137—139.
13. *Бологовский Б. М., Усачев Ю. Д.* Вступительная статья // Монополю Дирака: Сб. ст. М.: Мир, 1970. С. 5—39.
14. *Rechenberg H.* Paul Dirac zum 70. Geburtstag // Phys. Bl. 1972. Jg. 28. S. 545—546.
15. *Mehra J.* Bibliography of P. A. M. Dirac // Aspects of quantum theory/Ed. A. Salam, E. Wigner. Cambridge: Univ. press, 1972. P. XIII—XVI.— То же, на рус. яз., доп. // УФН. 1987. Т. 153. С. 165—172.
16. *Eden R. J., Polkinghorne J. C.* Dirac in Cambridge // Aspects of quantum theory/Ed. A. Salam, E. Winger. Cambridge: Univ. press, 1972. P. 1—6.
17. *Van Vleck J. H.* Travels with Dirac in the Rockies // Ibid. P. 7—16.
18. *Mehra J.* The golden age of theoretical physics: P. A. M. Dirac's scientific work from 1924 to 1933 // Ibid. P. 17—60; Пер. на рус. яз.: *Мехра Дж.* Золотой век теоретической физики: научная деятельность П. А. М. Дирака с 1924-го по 1933 год // УФН. 1987. Т. 153. С. 135—164.
19. *Jost R.* Foundations of quantum field theory // Aspects of quantum theory/Ed. A. Salam, E. Winger. Cambridge: Univ. press, 1972. P. 61—78.
20. *Pais A.* The early history of the theory of the electron: 1897—1947 // Ibid. P. 79—94.
21. *Wightman A. S.* The Dirac equation // Ibid. P. 95—116.
22. *Peierls R.* Fermi — Dirac statistics // Ibid. P. 117—128.
23. *Heisenberg W.* Indefinite metric in state space // Ibid. P. 129—136.
24. *Jauch J. M.* On bras and kets // Ibid. P. 137—168.
25. *Lanczos C.* The Poisson bracket // Ibid. P. 169—178.
26. *Schwartz L.* La 'fonction' δ et les noyaux // Ibid. P. 179—182.
27. *Amaldi E., Cabibbo N.* On the Dirac magnetic poles // Ibid. P. 183—212.
28. *Dyson F. J.* The fundamental constants and their time variation // Ibid. P. 213—236.

29. *Wigner E. P.* On the time-energy uncertainty relation // *Ibid.* P. 237–248.
30. *Salam A., Strathder J.* The path-integral quantization of gravity // *Ibid.* P. 249–262.
31. The physicist's conception of nature (Dedicated to P. A. M. Dirac on the occasion of his 70th birthday)/Ed. J. Mehra. Dordrecht: Reidel, 1973. XXIII+839 p.
32. Dirac, Paul Adrien Maurice // *Scienziati e tecnologi contemporanei.* Milano: Mondadori, 1974. Vol. 1. P. 310–312.
33. *Bromberg J.* Remarks on hole theory and Dirac's methodology // *Proc. XIV Intern. Congr. Hist. Sci., 1974. Ithaca, 1975. Vol. 2. P. 233–236.*
34. *Bromberg J.* Dirac's quantum electrodynamics and the waveparticle equivalence // *History of twentieth century physics: Proc. Intern. School of Phys. «Enrico Fermi», 1972. N. Y.; L.: Acad. press, 1977. P. 147–157.*
35. *Kragh H.* Methodology and philosophy of science in Paul Dirac's physics. Roskilde, Denmark: Universitetscenter, 1979. IMFUFA. Tekst N 27. 139 p.
36. *Вульфсон К.* Несколько дней на Кавказе с Полем Дираком и И. Е. Таммом // *Наука и жизнь.* 1979. № 5. С. 68–70.
37. *Moyer D. F.* Origins of Dirac's electron, 1925–1928 // *Amer. J. Phys.* 1981. Vol. 49. P. 944–949.
38. *Moyer D. F.* Evaluations of Dirac's electron, 1928–1932 // *Ibid.* P. 1055–1062.
39. *Moyer D. F.* Vindications of Dirac's electron, 1932–1934 // *Ibid.* P. 1120–1125.
40. *Kragh H.* The genesis of Dirac's relativistic theory of electrons // *Arch. Hist. Exact Sci.* 1981. Vol. 24. P. 31–67.
41. *Kragh H.* The concept of the monopole. A historical and analytical case-study // *Stud. Hist. and Phil. Sci.* 1981. Vol. 12. P. 141–172.
42. *Kragh H.* Cosmo-physics in the thirties: towards a history of Dirac cosmology // *Hist. Stud. Phys. Sci.* 1982. Vol. 13. P. 69–108.
- 42a. The special issue, dedicated to P. A. M. Dirac on the occasion of his 80th birthday. Papers presented at the Dirac symposium, Loyola university, New Orleans, may 1981 // *Intern. J. theor. phys.* 1982. Vol. 21. no. 8/9. P. 607–753.
43. *Mehra J., Rechenberg H.* The historical development of quantum theory. N. Y.: Springer, 1982. Vol. 4, pt 1: The fundamental equations of quantum mechanics, 1925–1926. P. 3–222.
44. *De Maria M., la Teana F.* Schrödinger's and Dirac's unorthodoxy in quantum mechanics // *Fundam. Sci.* 1982. Vol. 3. P. 1–20.
45. *Hendry J.* Monopoles before Dirac // *Stud. Hist. and Phil. Sci.* 1983. Vol. 14. P. 81–87.
46. *De Maria M., la Teana F.* Dirac's «unorthodox» contribution to orthodox quantum mechanics (1925–1927) // *Scientia.* 1983. Vol. 118. P. 595–626.
47. Quantum, space and time – the quest continues. Studies and essays in honour of Louis de Broglie, Paul Dirac and Eugene Wigner/Ed. A. O. Barut, A. van der Merwe, J.– P. Vigièr. Cambridge: Univ. press, 1984. Pt 3: Pap. dedicated to Paul Adrien Maurice Dirac. P. 439–660.
48. *Thomsen D. P. A. M. Dirac, 1902–1984* // *Sci. News.* 1984. Vol. 126: N 17. P. 263.
49. *Stenholm S. P. A. M. Dirac, 1902–1984* // *Arkhimedes.* 1984. Vol. 36. P. 230–233.
50. Dirac, 1902–1984 // *Phys. unserer Zeit.* 1984. Bd. 15, N 6. S. 194.
51. *Casimir H.* Paul Dirac, 1902–1984 // *Naturwiss. Rdsch.* 1985. Jg. 38. S. 219–223.
52. *Peierls R.* Paul Adrien Maurice Dirac // *Phys. Today.* 1985. Vol. 38(1). P. 111.
53. *De Maria M., Russo A.* The discovery of the positron // *Riv. stor. sci.* 1985. Vol. 2. P. 237–286.
54. *Кобзарев И. Ю.* Великий физик современности // *Вестн. АН СССР.* 1985. Вып. 9. С. 99–105.
55. *Каница С. П.* Поль Дирак // *Природа.* 1985. № 3. С. 62–64.

56. *Dalitz R. H., Peierls R.* Paul Adrien Maurice Dirac, 1902–1984 // Biogr. Mem. Roy. Soc. 1986. Vol. 32. P. 137–185.
57. *Смородинский Я. А. П. А. М. Дирак*, 8.VIII.1902–20.X.1984 // УФН. 1986. Т. 148. С. 527–534.
58. *Кривонос Л. Н.* История гипотезы монополя Дирака // NTM-Schr. R. Gesch. Naturwiss., Techn. und Med. 1986. Bd. 23. S. 35–45.
59. *Salaman E., Salaman M.* Remembering Paul Dirac // Encounter. 1986. May. P. 66–70.
60. *Dalitz R. H.* A biographical sketch of the life of professor P. A. M. Dirac, OM, FRS // Tributes to Paul Dirac/Ed. J. G. Taylor. Bristol: Hilger, 1987. P. 3–30.
61. *Phillips R. J. N.* Some words from a former student // Ibid. P. 31–32.
62. *Polkinghorne J. C.* A brief reminiscence of Dirac // Ibid. P. 33–34.
63. *Peierls R.* Address to Dirac Memorial meeting, Cambridge // Ibid. P. 35–37.
64. *Jeffreys B.* (Swirles). Reminiscences at the Dinner held at St. Johns College // Ibid. P. 38–39.
65. *Wigner E.* Address delivered to memorial meeting in Tallahassee // Ibid. P. 40–42.
66. *Lannutti J. E.* Eulogy for Paul A. M. Dirac 19 November 1984: 'Who was this guy?' // Ibid. P. 43–47.
67. *Shanmugadhasan S.* Dirac as research supervisor and other remembrances // Ibid. P. 48–57.
68. *Elieser C. J.* Some reminiscences of professor P. A. M. Dirac // Ibid. P. 58–60.
69. *Mehra J.* Dirac's contribution to the early development of quantum mechanics // Ibid. P. 63–75.
70. *Polkinghorne J. C.* Dirac and the interpretation of quantum mechanics // Ibid. P. 76–83.
71. *Salam A.* Dirac and finite field theories // Ibid. P. 84–94.
72. *Lighthill J.* Fourier analysis and generalised functions // Ibid. P. 96–103.
73. *Goddard P.* Magnetic monopoles // Ibid. P. 104–113.
74. *Taylor J. G.* Constrained dynamics // Ibid. P. 114–123.
75. *Dirac, Margit.* Thinking of my darling Paul // Paul Adrien Maurice Dirac. Reminiscences about a great physicist/Ed. B. N. Kursunoglu, E. P. Wigner. Cambridge etc.: Cambridge Univ. press, 1987. P. 3–8.
76. *Kursunoglu S. A.* Dirac in Coral Gables // Ibid. P. 9–29.
77. *Lannutti J. E.* Recollections of Paul Dirac at Florida State University // Ibid. P. 29–33.
78. *Harish-Chandra.* My association with Professor Dirac // Ibid. P. 34–36.
79. *Kemmer N.* What Paul Dirac meant in my life // Ibid. P. 37–42.
80. *Peierls R.* Dirac's way // Ibid. P. 43–45.
81. *Krisch A. D.* An experimenter's view of P. A. M. Dirac // Ibid. P. 46–52.
82. *Stanford H. K.* Dirac at the University of Miami // Ibid. P. 53–56.
83. *Wigner E. P.* Remembering Paul Dirac // Ibid. P. 57–65.
84. *Dalitz R. H.* Another side to Paul Dirac // Ibid. P. 69–92.
85. *Pais A.* Playing with equations, the Dirac way // Ibid. P. 93–116.
86. *Brown L. M., Rechenberg H.* Paul Dirac and Werner Heisenberg – a partnership in science // Ibid. P. 117–162.
87. *Marciano W. J., Goldhaber M.* Dirac's magnetic monopole and the fine structure constant // Ibid. P. 163–173.
88. *Hoyle F.* Magnetic monopoles and the halos of galaxies // Ibid. P. 174–193.
89. *Matthews P. T.* Dirac and the foundation of quantum mechanics // Ibid. P. 199–224.
90. *Polkinghorne J. C.* At the feet of Dirac // Ibid. P. 228–230.
91. *Mott N.* Reminiscences of Paul Dirac // Ibid. P. 231–234.
92. *Lipkin H. J.* From relativistic quantum theory to the human brain // Ibid. P. 235–244.
93. *Weber J.* Dirac in 1962, weak and gravitational radiation interactions // Ibid. P. 245–249.
94. *Lamb W. E. (Jr.).* Schrödinger's cat // Ibid. P. 250–262.

95. *Salam A. Dirac and finite field theories // Ibid. P. 263–276.*
96. *Kursunoglu B. N. Dirac's influence on unified field theory // Ibid. P. 277–291.*
97. *Медведев Б. В., Ширков Д. В. П. А. М. Дирак и становление основных представлений квантовой теории поля // УФН. 1987. Т. 153. С. 59–104.*
98. *Френкель В. Я. Профессор Дирак и советские физики // Там же. С. 173–186.*
99. *Сморodinский Я. А. Несколько эпизодов // Там же. С. 187–190.*
100. *Кожевников А. Б. Дирак и квантовая теория излучения // Эйнштейновский сборник, 1984–1985. М.: Наука, 1988. С. 246–270.*
101. *Кожевников А. Б. Нильс Бор и Поль Дирак: квантование излучения // Нильс Бор и наука XX века. Киев: Наукова думка, 1988. С. 80–83.*
102. *P. Dirac and I. E. Tamm. Correspondence 1928–1932. (Publication and comments by A. B. Kozhevnikov and V. Ya. Frenkel) – Институт истории естествознания и техники АН СССР. Препринт № 23. Москва, 1988. 68 с.*
103. *Медведев Ф. А. Дельта-функция у Дж. Л. Джорджи и П. А. М. Дирака // исследования по истории физики и механики. М.: Наука, 1988. С. 78–88.*
104. *Визгин Вл. П. П. А. М. Дирак и проблема взаимосвязи физики и математики // Там же. С. 88–106.*

СОДЕРЖАНИЕ

От редактора	3
------------------------	---

1

<i>Сморodinский Я. А.</i> П. А. М. Дирак (8. VIII. 1902–20. X. 1984) . . .	5
<i>Реженберг Х.</i> Основания геометрии и квантовая алгебра – из ранних работ Дирака по квантовой механике	15
<i>Кобзарев И. Ю.</i> К истории позитрона	21
<i>Дорман И. В.</i> Теория Дирака и экспериментальное открытие позитрона	34
<i>Кожевников А. Б.</i> Квантовая электродинамика Дирака	44
<i>Монастырский М. И.</i> Монополь Дирака и расслоение Хопфа . . .	66
<i>Краг Х.</i> Полю Дирак и космологическая теория	78
<i>Горелик Г. Е.</i> Космология Дирака в историко-методологическом контексте (к статье Х. Крага)	92
<i>Визгин Вл. П.</i> П. А. М. Дирак о взаимосвязи физики и математики	95
<i>Пайерлс Р.</i> Некоторые находили Дирака странным	112

2

<i>П. Дирак и П. Л. Капица.</i> Письма 1935–1937 гг.	115
<i>П. Дирак и И. Е. Тамм.</i> Избранная переписка	138
Переписка Дирака с В. А. Фоком. Материалы к истории статьи Дирака–Фока–Подольского	177
<i>Ефремидзе Т. И., Френкель В. Я.</i> Переводы на русский язык «Принципов квантовой механики» Дирака	197
Из переписки Дирака с Я. И. Френкелем	204
Библиография	208

Научное издание

**Поль Дирак
и физика XX века**

Редактор издательства *М. А. Суханов*
Художник *И. Ю. Шлепер*
Художественный редактор *И. Ю. Нестерова*
Технический редактор *И. Н. Жмуркина*
Корректоры *Р. З. Землянская, Ю. Л. Косорыгин*

ИБ № 40087

Сдано в набор 03.08.89
Подписано к печати 26.09.90
Т-01328. Формат 60×90^{1/16}
Бумага книжно-журнальная импортная
Гарнитура обыкновенная
Печать высокая
Усл. печ. л. 14,13. Усл. кр. отт. 14,38.
Уч.-изд. л. 16,5. Тираж 3300 экз. Тип. зак. 3812
Цена 2 р. 80 к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Наука»
117864, ГСП-7, Москва, В-485,
Профсоюзная ул., 90
2-я типография издательства «Наука»
121099. Москва. Г-99, Шубинский пер., 6

