

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

53(09)

## НЕСКОЛЬКО ЭПИЗОДОВ

*Я. А. Смородинский*

Вопрос о физическом смысле решений релятивистского уравнения электрона поставил физиков в сложное положение. Поскольку единственной положительно заряженной частицей, известной в то время, был протон, трудно было предположить существование никак не проявившего себя антиэлектрона — позитрона.

В связи с этим интересно привести отрывки из переписки Дирака с И. Е. Таммом, относящейся к 1930 г. Дирак познакомился с Таммом еще в Гёттингене в начале 1927 г. Знакомство перешло в дружбу, и два теоретика не раз совершали совместные походы в горах Кавказа.

Год 1927-й был отмечен важным событием. В этом году Дирак опубликовал работу, которая положила начало квантовой электродинамике<sup>1</sup>. В частности, в этой работе было дано теоретическое обоснование коэффициентов Эйнштейна, следовательно и спонтанного излучения. Теория позволяла теперь получать формулы для поглощения и излучения света без каких-либо дополнительных гипотез.

И. Е. Тамм увлекся новыми идеями и занялся теоретическим исследованием эффекта Комптона — рассеяния света на электроны. Этот эффект был подробно экспериментально изучен в 1923 г. Комптоном, который, используя в своих опытах брэгговский спектрометр, смог измерить изменение длины волны света  $\Delta\lambda$  при рассеянии на электроны<sup>1,2</sup>. **Комптон разобрался** и в кинематике процесса. Используя представление о фотоне — это было, по-видимому, первое практическое применение понятия импульса фотона в кинематике — Комптон получил и выражение для  $\Delta\lambda$ :

$$\Delta\lambda = \frac{2h}{mc} \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

где  $\varphi$  — угол рассеяния в системе, где электрон в начале покоился<sup>3</sup>. Справедливости ради, надо отметить, что эту же формулу получил практически одновременно Дебай<sup>4</sup>.

И. Е. Тамм получил формулу для сечения рассеяния и послал статью в «Zeitschrift für Physik», где она и была опубликована. Ее название: «О взаимодействии свободных электронов с излучением по дираковской теории электрона и по квантовой электродинамике»<sup>5</sup>.

Еще до того, как эта работа увидела свет, И. Е. Тамм сообщил Дираку о полученной формуле. Надо отметить, что за несколько месяцев до этого в том же журнале была напечатана работа шведского физика Валлера<sup>6</sup>, в которой содержался практически тот же вывод, что и у И. Е. Тамма. Дирак знал о вычислениях Валлера.

Но ни работа И. Валлера, ни работа И. Е. Тамма не были первыми. В 1929 г. в «Zeitschrift für Physik» была опубликована знаменитая работа

шведского теоретика Оскара Клейна и его молодого японского сотрудника Нишины с формулой, которая стала известна как формула Клейна — Нишины<sup>7</sup>.

Работа И. Е. Тамма (так же, как и работа Валлера) не была, однако, простым повторением. В ней содержалось существенное усовершенствование метода.

Клейн и Нишина пользовались полуклассическим методом, который считался в то время общепринятым. Этим методом пользовался и сам Дирак<sup>8</sup> в 1926 г., и Гордон в 1927 г.<sup>9</sup> для вывода формулы сечения комптон-эффекта для частицы без спина (о спине в те годы, конечно, ничего не было известно). Для вычисления рассеяния электромагнитной волны заряженной частицей использовались классические уравнения Максвелла, в правую часть которых вместо классического тока подставлялся ток перехода. Оправдание такой операции состояло в том, что если в обычную формулу для тока вместо волновой функции и ей сопряженной подставить их разложение в интеграл Фурье, то возникший двойной интеграл можно истолковывать как сумму (интеграл) всевозможных вкладов (с разными частотами) в суммарное излучение.

Полуклассический метод никак не учитывал квантового характера электромагнитного поля и по своей природе не связывал вычисления с промежуточными состояниями, рассматривая в некотором смысле эффект Комптона как эффект первого порядка \*). Этот факт был счастливым для авторов, так как они не натолкнулись на парадокс, который удивил Тамма и Валлера.

Мы знаем сейчас, что квантовый характер электромагнитного поля сказывается в более высоких приближениях теории возмущений в вычислениях влияния поляризации вакуума и сдвига уровней (лэмб-эффект). Поэтому без работы Тамма (и Валлера) дальнейшее развитие квантовой электродинамики было бы невозможно. Вся схема вычислений, развитая в этих работах, многие годы сохранялась в литературе.

Как уже говорилось, Тамм познакомил со своими, к тому времени еще не опубликованными, результатами Дирака. В ответе от 20 февраля 1930 г. Дирак писал Тамму: «... Весьма удивительно, по-моему, что Вы получили другую формулу для рассеяния излучения свободных электронов. Я недавно сам разбирался в этом вопросе, и мои вычисления подтвердили формулу Клейна — Нишина. Я думаю, что и Вы должны получить эту формулу, пользуясь методом квантования волн. Уверены ли Вы, что не сделали ошибки? ...».

Проблема ошибки выясняется в следующем письме от 21 марта того же года: «Перечитав Ваше письмо еще раз, я обнаружил, что  $v$  есть объем, а не скорость, что делает формулу правильной». Но дело не в этом курьезном недоразумении. Дирака волнует другое. Думая, что состояниям с отрицательной энергией соответствует протон, Дирак пишет: «... Я не могу понять, почему Вы говорите, что  $m$  в формуле означает массу электрона, а не протона. Я бы ожидал, что это должно быть нечто среднее между электроном и протоном, так как теория симметрична относительно электронов и протонов; только тогда теория даст правильную величину энергии для космического излучения (формула Клейна — Нишина приводит к большему значению энергии регистрируемых релятивистских частиц, по сравнению с формулой Дирака — Гордона.— Я. С.). Теория предсказывает сейчас, что электрон и протон должны иметь одинаковые массы. Поэтому она не точна и не надежна во всех случаях, когда необходимо учитывать разные массы. Я предполагал, что причина, по которой формула Клейна — Нишины верна, состоит в том, что процесс задевает только частицу, а не две частицы, взаимодействующие между собой».

\*) Метод Клейна — Нишины никак не учитывал различие между спонтанным и вынужденным излучением и был, строго говоря, некорректен. В квантовой электродинамике Дирака спонтанное излучение возникало как следствие коммутационных соотношений между операторами электромагнитного поля.

Тамм в своей работе хотя и отмечает трудности с интерпретацией состояний с отрицательной энергией, проявляет уверенность в логической стройности теории и не проявляет никаких колебаний в справедливости формул, в которых  $m$  обозначает массу электрона.

Быть более уверенным в справедливости уравнения Дирака, чем сам автор, требовало в то время немалого мужества. Правда, Тамм был на 8 лет старше Дирака, но в годы рождения квантовой теории возраст был скорее недостатком.

Формулы Тамма не только совпали с формулами Клейна — Мишины, они позволили увидеть особые свойства взаимодействия диракова электрона с электромагнитным полем. Тамм обнаружил парадокс, проследивая детали перехода к старой классической формуле Томсона.

С первого взгляда могло бы показаться естественным, что уровни с отрицательной энергией не должны играть никакой роли в процессе рассеяния, если энергия излучения мала, так что в этом случае можно, казалось бы, не учитывать состояний с отрицательной энергией.

Именно так обстояло дело в вычислениях Дирака и Гордона (о которых говорилось выше). Для скалярных частиц проблемы с отрицательными энергиями вообще не возникало. Парадокс Валлера — Тамма обнаруживал глубокий смысл, скрытый в релятивистском уравнении Дирака.

Корни парадокса Валлера — Тамма лежат в том, что для частицы с полуполым спином знак энергии не коммутирует с операторами тока и со знаком массы.

В представлении Дирака, в котором матрица энергии диагональная, операторы тока  $\alpha$  и оператор массы (знака)  $\beta$  не диагональны.

Последнее обстоятельство приводит, как известно, к таким эффектам, как парадокс Клейна — рождение пар в сильном статическом поле и так называемое «дрожание» (*Zitterbewegung*, нем.) — осцилляции с частотой  $2mc^2/\hbar$  волновой функций покоящегося электрона.

Ток в представлении Дирака  $\psi^* \alpha \psi$  пропорционален среднему значению  $\langle \sigma(qq) / (E + m) \rangle$  в состоянии с заданной проекцией спина;  $q$  — переданный импульс,  $E$  — энергия электрона. Ток связывает состояния с  $m > 0$  (первая пара компонент волновой функции) и состояния с  $m < 0$  (вторая пара) и обращается в  $\langle \sigma(\mathbf{on}) \mathbf{th}(a/2) \rangle$ , где  $\mathbf{n}$  — единичный вектор направления скорости электрона в конечном состоянии, а  $a$  — ее величина (скорость  $v = \mathbf{th} a$ ).

Описанное явление отсутствует у частиц с целым спином. Появление состояний с отрицательной массой в эффекте Комптона показывает, какие скрытые свойства обнаружили в решениях уравнения Дирака, свойства которых явным образом не содержались в исходных предположениях.

В связи с эффектом Комптона полезно напомнить еще и о работе Дирака, которую он опубликовал совместно с П. Л. Капицей в 1933 г.<sup>10</sup> Ее название — «Рассеяние электронов стоячей электромагнитной волной». Работа основана на красивой идее о роли вынужденного излучения. Значительная часть этой небольшой по объему работы посвящена обсуждению (к сожалению, бесперспективному) экспериментальных возможностей оптики тех лет. Создание достаточно интенсивных электромагнитных полей стало реальным только с появлением лазера. В начале 1987 г. Буксбаум и др.<sup>11</sup> опубликовали результаты первой демонстрации эффекта Дирака — Капицы.

Столкновение электрона с электромагнитной волной описывается формулой Клейна — Нишины (с соответственным изменением начального и конечного состояний) только тогда, когда интенсивность поля мала. Если, напротив, лазерное электромагнитное поле имеет столь большую интенсивность, что число квантов в колебательной моде  $N \gg 1$ , то в игру вступает вынужденное излучение. Излученный электроном квант не может выбрать направление (и соответственно конечную энергию) произвольным образом, а должен в силу вынужденного характера излучения излучить квант с тем

же волновым вектором, который характерен для стоячей волны. Представлял себе плоскую стоячую волну как суперпозицию двух волн с волновыми векторами  $\mathbf{k}$  и  $-\mathbf{k}$ , можно описывать процесс рассеяния электрона на такой волне как поглощение кванта из одной волны и излучение кванта, когерентного со второй волной.

Таким образом, эффективно дело сводится к переносу кванта от одной волны к другой \*). Электрон при этом изменяет компоненту своего импульса, нормальную к фронту волны, на величину  $2k$ . Это есть не что иное, как условие Брэгга для рассеяния их на дифракционной решетке. Поэтому рассеяние можно описывать как дифракцию квантовой волны электрона на классическом (периодическом) потенциале, образуемом стоячей электромагнитной волной.

Таким образом, в пределе  $N \rightarrow \infty$  рассеяние электрона одинаково хорошо описывается как в классической картине, так и в квантовой и служит хорошим примером принципа соответствия Бора.

В экспериментах <sup>11</sup> наблюдалось рассеяние электрона на бегущей волне, а не дифракция на волне стоячей. Эффект Дирака — Капицы (роль вынужденного излучения) был продемонстрирован достаточно убедительно.

В заключение полезно добавить объяснение к рассказу Дирака (с. 133). Д. В. Скобельцын в разговоре со мной рассказал мне \*\*):

«... Что касается воспоминаний Дирака, то факты, о которых он говорит, сами по себе правильны. В Кембридже он был на заседании Семинара (его вел, кажется, Кокрофт), на котором я пытался объяснить аудитории результаты моих (в соавторстве с Е. Степановой) опытов по излучению позитронов радиоактивным источником. Из того, что пишет Дирак, видно, что он обратил внимание на мои слова. Но он понял их совсем не так, как я хотел (я, наверно, говорил по-французски). Главное заключается в том, что то, о чем вполне правильно вспоминает Дирак, происходило в 1934 г. (во время международного физического конгресса в Лондоне), а не в 1926—1927 гг., как говорил Дирак ... Дирак не называет моего имени, ссылаясь на слова лектора. Нет сомнения, что он не мог сослаться на кого-нибудь другого, кроме меня, так как в то время я был «монополистом» в опытах такого рода, никто другой не ставил опытов с  $\alpha$  (или с  $\beta$ )-лучами в камере Вильсона в магнитном поле».

Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова,  
Москва

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dirac P. A. M. // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1927. V. 114. P. 243.
2. Compton A. H. // Phys. Rev. 1923. V. 21. P. 483.
3. Compton A. H. // Ibidem. V. 22. P. 409.
4. Debye P. J. W. // Phys. Zs. 1923. Bd 24. S. 165.
5. Tamm Ig. // Zs. Phys. 1930. Bd 62. S. 545.
6. Waller I. // Ibidem. Bd 61. S. 837.
7. Klein O., Nishina Y. // Ibidem. 1929. Bd 57. S. 853.
8. Dirac P. A. M. // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1926. V. 111. P. 405.
9. Gordon W. // Zs. Phys. 1927. Bd. 40. S. 117.
10. Kapitza P. L., Dirac P. A. M. // Proc. Cambr. Phil. Soc. 1933. V. 29. P. 297.
11. Bucksbaum P. A., Bashkansky M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. P. 349.

\*) Электрон, в принципе, может поглотить и два, и три и т. д. кванта, что привело бы к дополнительным максимумам в сечении. Экспериментально они еще не наблюдались.

\*\*) Академик Д. В. Скобельцын любезно разрешил опубликовать его рассказ.