

М. П. Бронштейн

## О ВОЗМОЖНОСТИ СПОНТАННОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ФОТОНОВ\*

В статье содержится разбор гипотезы, высказанной О. Гальперном и В. Гейтлером, о том, что движущийся в пустом пространстве фотон может спонтанно (вследствие виртуального образования пар, т. е. вследствие взаимодействия с дираковскими электронами отрицательных уровней) распасться на несколько фотонов меньшей частоты. Вычисления показывают, что в элементарной теории, не учитывающей взаимодействия электронов отрицательной энергии друг с другом, действительно существует вероятность спонтанного распада фотона на три части. Учет «поляризации вакуума» по Гейзенбергу приводит, однако, к тому, что вероятность спонтанного расщепления фотона становится равной нулю. Поэтому, вопреки мнению Гальперна и Гейтлера, теория позитронов не приводит к возможности спонтанного распада фотонов.

### 1. Общие соображения

В последнее время с разных сторон были сделаны указания на то, что электромагнитное поле в отсутствие заряженных частиц может совершать спонтанные переходы из одних состояний в другие с той же энергией и с тем же количеством движения. Примером такого перехода является *рассеяние света светом*, возможность которого была указана Борном и Инфельдом<sup>1</sup> на основании теоретических соображений, относящихся к проблеме структуры и устойчивости электрона; желая устранить трудности, связанные с этой проблемой в классической электромагнитной теории, Борн и Инфельд дополнили классические уравнения Максвелла нелинейными членами, приводящими, в частности, к рассеянию света светом. К аналогичным выводам пришли Эйлер и Коккель<sup>2</sup> в квантовой теории электромагнитного поля,

\* ЖЭТФ, 1937, т. 7, с. 335—356. Публикуется первый параграф статьи (2. Постановка задачи с точки зрения теории позитрона. 3. Расщепление фотона с точки зрения элементарной теории Дирака. 4. Расщепление фотона с точки зрения теории Гейзенберга).

<sup>1</sup> Born M., Infeld L. — Proc. Roy. Soc. A, 1933, vol. 143, p. 425; 1934, vol. 144, p. 410; 1934, vol. 147, p. 522.

<sup>2</sup> Euler H. — Ann. Phys., 1936, Bd. 26, S. 398; Euler H., Kockel B. — Naturwiss., 1935, Bd. 23, S. 246.

учитывающей возможность возникновения и уничтожения пар (электронов и позитронов): «виртуальные» пары (т. е. наличие не исчезающих матричных элементов, связывающих данное состояние поля с состоянием, в котором присутствуют пары, в том случае, когда такие пары на самом деле не могут возникнуть вследствие законов сохранения) равносильны существованию некоторого добавочного взаимодействия между фотонами, приводящего, в частности, к возможности превращения двух фотонов в два другие фотона с той же энергией и с тем же результирующим количеством движения. Смысл рассеяния света светом заключается в том, что те состояния электромагнитного поля, в которых возбуждено определенное количество фотонов в каждом собственном колебании поля и которые считались в существовавшей до сих пор квантовой теории электромагнитного поля стационарными состояниями, на самом деле оказываются лишь приблизительно стационарными; понятие «фотон» с этой точки зрения не есть точное понятие.

Так как добавочные члены, характерные для новой теории электромагнитного поля, весьма малы (отношение добавочной энергии взаимодействия к основной энергии электромагнитного поля содержит квадрат постоянной тонкой структуры), то понятие «фотон» может быть приблизительно удержано в новой теории, если только учесть добавочные силы, приводящие к превращению заданной системы фотонов в другую систему фотонов с той же энергией и результирующим импульсом; действие этих добавочных сил может при этом считаться малым возмущением.

Превращение фотона, движущегося в пустом пространстве, в несколько других фотонов (спонтанное расщепление фотона) не противоречит законам сохранения энергии и количества движения, если только выполнены два условия: 1) сумма частот всех фотонов, возникающих в результате расщепления, равна частоте первичного фотона; 2) все фотоны, возникающие в результате расщепления, имеют в точности то же самое направление распространения, что и первичный фотон. Оба условия непосредственно вытекают из законов сохранения, если вспомнить, что энергия и импульс фотона пропорциональны друг другу и частоте (вектор количества движения первичного фотона должен на основании закона сохранения количества движения замыкать ломаную линию, образованную векторами количества движения вторичных фотонов; на основании же закона сохранения энергии длина этой ломаной линии должна равняться длине замыкающей).

Возникает естественный вопрос: может ли в действительности происходить спонтанное расщепление фотона, удовлетворяющее этим двум условиям?

Гипотезу о том, что спонтанное расщепление фотона может происходить в пустом пространстве под влиянием «виртуальных пар», впервые высказал Гальперн<sup>3</sup>. Исследование этого вопроса составляет предмет настоящей работы.

Заметим с самого начала, что несовершенство существующей теории позитрона делает исчерпывающее теоретическое решение вопроса крайне затруднительным. Невозможность точного разделения положительных и отрицательных кинетических энергий электрона при наличии электромагнитного поля вносит в теорию существенную трудность, которая не может быть устранена вполне однозначным образом. Сравнительно простой способ отделения положительных и отрицательных кинетических энергий был предложен Гейзенбергом<sup>4</sup>. Он и положен в основу настоящей работы. Неоднозначность, присущая этому варианту теории позитрона, делает экспериментальное исследование вопроса весьма желательным. Вполне возможно, что для правильного решения поставленной задачи необходимо учесть не только взаимодействие с виртуальными парами, но и какой-нибудь другой, в настоящее время еще неизвестный специальный механизм.

С точки зрения экспериментатора эффект спонтанного расщепления фотона мог бы представлять несравненно больший интерес, нежели рассеяние света светом. Проверка на опыте теоретических расчетов, относящихся к рассеянию света светом, в настоящее время практически невозможна, так как для этого потребовались бы чудовищные интенсивности в условиях полного исключения всякого добавочного рассеяния. Для того же, чтобы наблюдать спонтанное расщепление фотона, если оно на самом деле происходит, необходимо лишь иметь в своем распоряжении достаточно большие промежутки времени: как бы ни была мала вероятность спонтанного расщепления в секунду, расщепление должно произойти, если только фотон путешествует в пустоте достаточно долгое время. В распоряжении астронома имеются фотоны, распространявшиеся в пустом пространстве в течение огромного промежутка времени (свет от внегалактических туманностей 20-й звездной величины, спектры кото-

<sup>3</sup> Halpern O. — Phys. Rev., 1934, vol. 44, p. 885; Heitler W. The quantum theory of radiation. Oxford, 1936, p. 193.

<sup>4</sup> Heisenberg W. — Ztschr. Phys., 1934, Bd. 90, S. 209; 1934, Bd. 92, S. 692; Heisenberg W., Euler H. — Ztschr. Phys., 1936, Bd. 98, S. 714.

рых еще могут быть сфотографированы с помощью студийного рефлектора, доходит до земного наблюдателя в течение 190 миллионов лет). Нельзя ли попытаться решить вопрос о спонтанном расщеплении фотонов с помощью астрономического наблюдения?

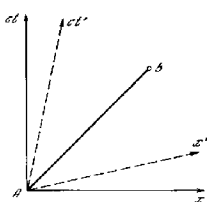
Гальперн (loc. cit.) высказал гипотезу, согласно которой «космическое красное смещение», исследованное Хабблом и Хьюмасоном, объясняется постепенным отщеплением небольших инфракрасных фотонов от фотона видимого света, идущего к земному наблюдателю от отдаленных небесных объектов. Эта точка зрения кажется весьма привлекательной, так как все существующие теории красного смещения (релятивистские модели «расширяющейся вселенной», диффузия системы галактик по Милну) оказались бессильными объяснить наблюдаемое количественное значение «коэффициента экспансии». Гипотеза Гальперна дает, на первый взгляд, надежду на вычисление коэффициента экспансии системы галактик из констант атомной физики. Я думаю, однако, что гипотеза Гальперна неверна. Произведенные до сих пор астрономические наблюдения находятся, по-видимому, в согласии с тем предположением, что относительное красное смещение (отношение приращения длины волны  $\Delta\lambda$  к самой длине волны  $\lambda$ ) одинаково для всех спектральных линий одного и того же объекта. С точки зрения обычных теорий, сводящих «красное смещение» к эффекту Доплера, такая закономерность вполне тривиальна; относительное красное смещение  $\Delta\lambda/\lambda$  есть определенная функция скорости удаления рассматриваемого объекта

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - v/c} - 1,$$

вследствие чего оно и должно быть в точности одинаковым на протяжении всего спектра. С точки же зрения, предложенной Гальперном, эта закономерность становится необъяснимой.

Заметим, что с помощью специального принципа относительности можно вывести некоторые общие свойства интересующего нас явления, не делая никаких специальных предположений о природе механизма, приводящего к спонтанному расщеплению фотона. Рассмотрим фотон, летящий в пустоте, с точки зрения некоторой системы отсчета; при этом для простоты выберем ось  $x$  так, что ее направление совпадает с направлением распространения фотона. На диаграмме  $(x, ct)$  мировая линия фотона изобразится прямой  $AB$ , делящей пополам угол между осями. Будем рассматривать лишь

фотоны плоскополяризованные (всякое световое поле может быть получено в результате суперпозиции таких фотонов) и обозначим через  $w$  вероятность того, что в течение единицы времени произойдет расщепление рассматриваемого фотона в некотором определенном отношении энергий и при некоторой определенной ориентации плоскостей поляризации вторичных фотонов по отношению к плоскости поляризации первичного фотона. Если мы перейдем от нашей системы координат  $(x, y, z, ct)$  к некоторой другой системе координат  $(x', y', z', ct')$ , которая движется со скоростью  $v$  по направлению оси  $x$  прежней координатной системы, то вследствие эффекта Доплера частоты первичного фотона и всех вторичных помножатся на одно и то же число, и отношение частот останется поэтому неизменным. Вероятность того, что расщепление рассматриваемого фотона в некотором определенном отношении (и при некоторой определенной ориентации плоскостей поляризации вторичных фотонов по отношению к плоскости поляризации первичного фотона) произойдет между мировыми точками  $A$  и  $B$ , должна быть одинаковой в обеих системах отсчета, т. е.



$w(t_B - t_A) = w'(t'_B - t'_A)$ .

Формулы преобразований Лоренца дают

$$t'_B - t'_A = \frac{t_B - t_A - \frac{v}{c^2}(x_B - x_A)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Имеем

$$x_B - x_A = c(t_B - t_A).$$

Поэтому

$$t'_B - t'_A = (t_B - t_A) \frac{1 - v/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Отсюда следует

$$w = w' \frac{1 - v/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Известная формула эффекта Доплера гласит

$$\nu' = \nu \frac{1 - v/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Сравнение двух последних формул дает

$$w\nu = w'\nu'. \quad (1)$$

Произведение вероятности  $w$ , отнесенной к единице времени, на частоту оказывается, следовательно, инвариантом преобразований Лоренца. На первый взгляд отсюда можно вывести то заключение, что произведение есть величина постоянная. Такое заключение кажется совершенно очевидным, так как свойства фотона полностью определяются его частотой  $\nu$  (и направлением плоскости поляризации, от которого, впрочем, произведение  $w\nu$  не может зависеть вследствие изотропности пространства); любая частота может быть преобразована в любую другую частоту с помощью эффекта Доплера, а так как  $w\nu$  при этом остается постоянным, то  $w\nu$  не может зависеть и от частоты. Однако это заключение неправильно, так как оно противоречит *принципу неопределенности*. В самом деле, вследствие гейзенберговского принципа неопределенности точное задание импульса исключает всякую возможность пространственной локализации. Обычное понятие фотона, являющееся квантовым аналогом классической плоской волны, предполагает точное задание количества движения (и поляризационной переменной), вследствие чего пространственная локализация фотона становится невозможной. Нетрудно видеть, что предыдущие рассуждения, основанные на том, что фотон сперва обладал локализацией, соответствующей мировой точке  $A$ , а потом перешел в точку  $B$  и т. д., при этом перестают быть применимыми. Заметим, однако, что обычная идея фотона, обладающего точно фиксированным количеством движения и отсутствием сколько-нибудь определенного положения в пространстве, является (как и соответствующая ей в классической теории идея неограниченной плоской волны) теоретической абстракцией, не вполне совпадающей с тем, что называется «фотоном» с точки зрения экспериментатора. «Фотон», с которым имеет дело экспериментатор, является квантовым обобщением не классической неограниченной плоской волны, а *волнового пакета*, составленного из таких плоских волн и обладающего, следовательно, не вполне определенным значением количества движения. Если обозначить через  $\mathbf{v}$  вектор, равный количеству движения фотона, деленному на  $h/c$ , через  $\nu$  — его величину, равную частоте, через  $\nu_x, \nu_y,$

$v_x$  — его составляющие, то реальный «фотон» характеризуется не только средним значением вектора  $v$ , но и неопределенностями  $\Delta v_x$ ,  $\Delta v_y$ ,  $\Delta v_z$  (или, что то же, спектральной шириной и неопределенностью направления). Принцип неопределенности в этом случае уже не исключает возможности приблизительно локализовать «фотон» в пространстве. Предыдущие рассуждения, которые привели к тому результату, что  $\omega v$  инвариантно по отношению к преобразованиям Лоренца, разумеется, вполне применимы, если только пространственное расстояние между точками  $A$  и  $B$  гораздо больше размеров волнового пакета в той же системе отсчета. Волновой пакет в отличие от неограниченной плоской волны обладает инвариантами по отношению к группе Лоренца: таким инвариантом является  $\Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z / v^3$ . Из того, что произведение  $\omega v$  инвариантно по отношению к преобразованиям Лоренца, вытекает, что

$$\omega = \frac{1}{v} f \left( \frac{\Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z}{v} \right), \quad (2)$$

где  $f$  — любая функция. (При этом  $\omega$ , разумеется, зависит и от отношения, в котором расщепляются фотоны, и от углов между плоскостями поляризации.) Мы видим, что принцип относительности независимо от природы того специального механизма, который приводит к расщеплению фотонов, накладывает весьма существенное ограничение на зависимость вероятности расщепления в заданном отношении от частоты. Эффект Хаббла—Хьюмсона может быть объяснен расщеплением фотонов лишь в том случае, если  $\omega$  одинаково для всех спектральных линий, что, вообще говоря, никак не может иметь места. А priori, впрочем, нет ничего невозможного

<sup>1</sup> Формулы эффекта Доплера гласят:

$$v'_x = \frac{v_x - \frac{v}{c} \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad v'_y = v_y, \quad v'_z = v_z.$$

Якобиан  $D(v'_x, v'_y, v'_z) / D(v_x, v_y, v_z)$  равен

$$\frac{1 - \frac{v}{c} \frac{v_x}{v}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{v'}{v}.$$

Отсюда следует

$$\Delta v'_x \Delta v'_y \Delta v'_z = \frac{v'}{v} \Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z,$$

т. е.  $\Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z / v$  есть инвариант.

в том, что эффект расщепления фотонов накладывается на значительно больший доплеровский эффект, происходящий вследствие «расширения вселенной» или вследствие какой-нибудь другой неизвестной причины. Это могло бы сказаться в том, что относительное красное смещение  $\Delta\lambda/\lambda$  слегка менялось бы при переходе от одной спектральной линии к другой (в спектре одного и того же удаленного объекта). Будущие астрономические наблюдения могут пролить свет на этот важный вопрос.

Заметим, что общие свойства вероятности расщепления в единицу времени, выведенные выше с помощью принципа относительности, остаются справедливыми и в том случае, если в числе частей, на которые распадается фотон, имеются не только кванты света, но и гравитационные кванты. (Такие расщепления, разумеется, нисколько не противоречит законам сохранения.) В настоящее время не существует удовлетворительной теории взаимодействия между светом и тяготением. Возможно, что будущая квантовая «единая теория поля» должна будет рассмотреть и такие превращения (полные или частичные) квантов электромагнитного поля в гравитационные кванты. «Nature seems to be delighted with transmutations» (Исаак Ньютон. «Оптика», вопрос 30).