

ДИСПЕРСИЯ, ПОГЛОЩЕНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ВАКУУМЕ

© 2007 Ю.Л. Ратис

Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

В работе уточнена формулировка специального принципа относительности Эйнштейна. Установлен механизм образования фотонов. Показано, что квантование электромагнитного поля обусловлено взаимодействием поляризованного вакуума с поляризовавшей его электромагнитной волной. Доказано, что соотношение неопределенностей Гейзенберга является следствием конечности поперечных размеров фотона.

Введение

Одним из основополагающих принципов современной физики является знаменитый постулат специальной теории относительности (СТО), согласно которому скорость света в пустоте является фундаментальной физической константой и не зависит от выбора инерциальной системы отсчета.

Проблема зависимости скорости света от выбора системы отсчета возникла в физике конца XIX века. Ее появление было связано с тем, что уравнения электродинамики Максвелла являются инвариантными относительно преобразований Лоренца, а механика Ньютона галилеево-инвариантна. Различие между теорией механического движения и теорией закона сил, это движение вызывающих, в законах преобразования при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую, есть серьезнейшее логическое противоречие. Используя постулат о постоянстве скорости света, и введя релятивистские поправки в уравнения механики, Альберт Эйнштейн устранил противоречия между механикой Ньютона и электродинамикой Максвелла.

В настоящее время специальная теория относительности блестяще подтверждена многочисленными прецизионными экспериментами и всей инженерной практикой человечества, и, фактически, никем не подвергается сомнению. Другими словами, имеет место блестящее согласие теории с экспериментом, подтвержденное более чем вековым ходом развития физики. В соответствии с основным постулатом СТО вакуум не поглощает и не преломляет электромаг-

нитные волны.

В то же время хорошо известно, что классическая электродинамика становится внутренне противоречивой при переходе к масштабам расстояний порядка классического радиуса электрона [1, 2]:

$$R_e = \frac{e^2}{mc^2}, \quad (1)$$

а излучение и поглощение электромагнитных волн, вопреки Максвеллу, носит дискретный характер. Ньютоновская механика также не согласуется с эмпирическим фактом дискретности атомных и молекулярных спектров излучения и поглощения.

В течение продолжительного времени считалось, что преодоление внутренних противоречий ньютоновской механики и максвелловской электродинамики возможно в рамках квантовой теории. Однако квантовая теория также не лишена внутренних противоречий, а физические причины, приводящие к квантованию полей, до сих пор не нашли должного объяснения в рамках современной физики.

Целью настоящей работы является демонстрация принципиальной возможности преодоления перечисленных выше противоречий, а также обоснование гипотезы о том, что в основе феномена квантования полей лежит эффект поляризации физического вакуума.

Уточненный специальный принцип относительности Эйнштейна

Принцип относительности (и по Галилею, и по Эйнштейну) является конкретной

формулировкой принципа объективности научных исследований применительно к физике. Согласно этому принципу все физические законы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета. По Галилею расстояния и времена, измеренные наблюдателями, находящимися в разных инерциальных системах отсчета, одинаковы. Это возможно только в том случае, когда измерение длин и времен осуществляется мгновенно.

В специальной теории относительности учтен тот факт, что наблюдатели, находящиеся в различных инерциальных системах отсчета, используют в процессе измерений световые волны, скорость распространения которых хоть и велика, но конечна. Поэтому результаты измерения времени и расстояния, полученные различными наблюдателями, отличаются друг от друга, но связаны взаимно-однозначной зависимостью. При этом переход от одной инерциальной системы отсчета (ИСО) к другой осуществляется с помощью преобразований Лоренца [1]:

$$\begin{cases} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ y = y' \\ z = z' \\ ct = \frac{ct' + \beta x'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{cases} \quad (2)$$

Константа c в формуле (2) – скорость света в пустоте, а параметр β равен $\beta = v/c$, где v – скорость движения одной ИСО относительно другой. Принцип относительности Эйнштейна позволяет корректно учесть в физической теории тот эмпирический факт, что мы живем в электромагнитном мире, и никакого другого инструмента, кроме света, для измерения чего бы то ни было, в распоряжении у наблюдателя просто не имеется. Другими словами, любое измерение осуществляется, в конечном счете, при помощи световых волн, скорость распространения которых известна из многочисленных независимых экспериментов. При этом во всех экспериментах по определению скорости света измеряется величина

$$c_{\text{exp}} = \langle c \rangle \pm \Delta c, \quad (3)$$

где $\langle c \rangle$ – среднее значение скорости света, а Δc – погрешность измерения.

Постулат о независимости скорости света от выбора системы отсчета неоднократно проверялся экспериментально. Первый решающий эксперимент был поставлен Майкельсоном в 1881 году. Через несколько лет, в 1887 году Майкельсон совместно с Морли повторил свой знаменитый опыт. В этом интерферометрическом эксперименте производилось сравнение скорости света вдоль направления движения Земли с аналогичной скоростью в перпендикулярном направлении. В результате было установлено, что зависимость скорости света от скорости системы отсчета отсутствует.

По-другому результаты этого опыта можно представить в виде:

$$\frac{dc}{d\lambda} \Delta \lambda_{\text{opt}} \ll \Delta c, \quad (4)$$

где λ – длина световой волны, а $\Delta \lambda_{\text{opt}}$ – ширина оптического диапазона длин волн.

Альберт Эйнштейн положил результаты эксперимента Майкельсона и Морли в основу СТО и придал преобразованиям Лоренца (2) статус неотъемлемого атрибута любой фундаментальной физической теории.

Задолго до исторического эксперимента Майкельсона и Морли Дж.К. Максвелл создал электромагнитную теорию света, в которой фигурирует скорость света в пустоте c . Уравнения Максвелла для напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей для свободных электромагнитных волн имеют вид:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{H} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

и являются лоренц-инвариантными. Уравнения для 4-потенциалов A^μ :

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A^\mu}{\partial t^2} - \nabla^2 A^\mu = 0 \quad (6)$$

также лоренц-инвариантны.

При переходе от (5) к (6) использовались

общеизвестные соотношения:

$$\begin{cases} \vec{E} = -\nabla\varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{H} = \nabla \times \vec{A} \end{cases}, \quad (7)$$

калибровка Лоренца

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{A} = 0, \quad (8)$$

а через A^μ в формуле (6) обозначен 4- потенциал $A^\mu = (\varphi, \vec{A})$.

На первый взгляд, уравнения (5), (6) невозможно модифицировать так, чтобы в них появился показатель преломления, и при этом не были нарушены лоренц-инвариантность и трансляционная инвариантность теории. Однако, это не так.

Известно, что в квантовой электродинамике (КЭД) довольно подробно исследованы эффекты поляризации вакуума, а также нелинейные эффекты типа рассеяния фотона на фотоне [2]. Эффекты эти, как правило, невелики. В области низких энергий они пренебрежимо малы, и только в области высоких энергий становятся заметными. Другими словами, некоторый объем физического вакуума, попавший в поле электромагнитной волны (особенно, в случае высоких энергий), ведет себя как самый обычный диэлектрик – он поляризуется. При этом “голый фотон” взаимодействует с виртуальной материей (электронами, позитронами и другими заряженными виртуальными частицами). В результате этого взаимодействия физический вакуум поляризуется, а электромагнитная волна, увлекающая за собой виртуальную материю, превращается в квазичастицу, которую мы и называем фотоном. Как известно, квазичастица отличается от “голой” частицы именно тем, что представляет собой коллективное возбуждение, масса которого отличается от массы затравочной частицы. Фотон в пустоте – это чрезвычайно легкая частица. Тем не менее, она имеет конечную массу покоя. В случае движения фотонов в среде эффект перенормировки массы может быть чрезвычайно большим (см., например, модель векторной доминантности [9], в рамках которой высокоэнергетический фотон в ядре может самопроизвольно превратиться в любой нейтральный мезон с квантовыми числами фо-

тона). Очевидно, что наибольший вклад в процесс взаимодействия электромагнитной волны с физическим вакуумом дают виртуальные электроны и позитроны, поскольку среди всех заряженных элементарных частиц именно они обладают наибольшим удельным зарядом.

Описанный эффект “одевания” частиц и превращения их в квазичастицы подробнее изучен как в физике твердого тела, так и в ядерной физике. В квантовой электродинамике сходные идеи привели к созданию теории перенормировок.

Все вышесказанное позволяет сделать однозначный вывод. Для того чтобы в рамках классической электродинамики учесть эффекты поляризации физического вакуума, самоорганизации электромагнитных волн в вакууме и превращения их в фотоны, перенести идеи квантовой теории в классическую электродинамику, устранив ее внутренние противоречия, и при этом не нарушить лоренц-инвариантности теории, необходимо обобщить принцип относительности Эйнштейна.

Однако перед тем как дать уточненную формулировку специального принципа относительности, сделаем ряд предварительных замечаний:

1. Уравнения Максвелла содержат константу c , которая интерпретируется как фазовая скорость плоской электромагнитной волны в пустоте.

2. Майкельсон и Морли никогда не измеряли зависимость скорости плоских электромагнитных волн в пустоте от скорости движения системы отсчета, поскольку плоских волн, представляющих собой математическую абстракцию, не существует в природе.

3. Альберт Эйнштейн ни в одной из своих работ не писал о постоянстве скорости распространения электромагнитных волн. В знаменитой статье “К электродинамике движущихся тел” фигурирует постулат о постоянстве скорости света в пустоте.

4. Под светом в специальной теории относительности понимается электромагнитное излучение, длина волны которого лежит в очень узком спектральном диапазоне (так называемом, оптическом диапазоне длин волн $0.4 \leq \lambda \leq 0.75$ мкм).

5. Любой реальный световой пучок

(даже монохроматический импульс лазера) имеет конечные продольные и поперечные размеры, и, следовательно, представляет собой волновой пакет.

6. Групповая скорость распространения волнового пакета в среде с нормальной дисперсией всегда меньше его фазовой скорости.

С учетом вышесказанного приведем специальный принцип относительности Эйнштейна в новой редакции:

1. Физические законы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета.

2. Переход от одной ИСО к другой осуществляется с помощью преобразований Лоренца (2).

3. Константа c в преобразованиях Лоренца (2) и уравнениях Максвелла (5) есть низкочастотный предел скорости распространения фотонов в вакууме $\hat{c}(\omega^{rest})$:

$$c = \lim_{\omega^{rest} \rightarrow 0} \hat{c}(\omega^{rest}), \quad (9)$$

где ω^{rest} – частота электромагнитных колебаний в системе покоя фотона, причем для любых частот $\omega^{rest} > 0$ справедливо строгое неравенство $\hat{c}(\omega^{rest}) < c$.

Вся дальнейшая часть работы посвящена обоснованию этого положения. Однако прежде чем приступить к построению нелинейных динамических уравнений электромагнитного поля в физическом вакууме, необходимо провести анализ кинематики квантов электромагнитного поля.

Рассмотрим две системы отсчета: K и K' , причем K – лабораторная система, а K' – система покоя фотона. В этом случае преобразования Лоренца приобретают вид:

$$\begin{cases} x = \frac{\hat{c}(\omega^{rest})t'}{\sqrt{1 - \hat{\beta}^2(\omega^{rest})}} \\ y = y' = 0 \\ z = z' = 0 \\ ct = \frac{ct'}{\sqrt{1 - \hat{\beta}^2(\omega^{rest})}} \end{cases}, \quad (10)$$

причем

$$\hat{\beta}(\omega^{rest}) = \frac{\hat{c}(\omega^{rest})}{c}. \quad (11)$$

Частоты и волновые вектора при переходе из системы покоя фотона в лабораторную систему координат преобразуются ана-

логичным образом:

$$\begin{cases} ck_x^{lab} = \frac{\hat{\beta}(\omega^{rest})\omega^{rest}}{\sqrt{1 - \hat{\beta}^2(\omega^{rest})}} \\ k_y^{lab} = k_{y'}^{rest} = 0 \\ k_z^{lab} = k_{z'}^{rest} = 0 \\ \omega^{lab} = \frac{\omega^{rest}}{\sqrt{1 - \hat{\beta}^2(\omega^{rest})}} \end{cases}. \quad (12)$$

Здесь и далее индекс $rest$ означает, что значение соответствующей физической величины измерялось в системе покоя фотона, а индекс lab указывает на то, что измерения проводились в лабораторной системе отсчета. Из формулы (12) следует, что

$$\hat{\beta}(\omega^{rest}) = \sqrt{1 - (\omega^{rest} / \omega^{lab})^2}. \quad (13)$$

Поскольку наблюдатель по определению находится в лабораторной системе отсчета, постольку для расчета зависимости скорости фотона от его частоты необходимо найти вид функции:

$$\omega^{rest} = \omega^{rest}(\omega^{lab}). \quad (14)$$

Из преобразований Лоренца следует, что ω^{rest} есть нечетная функция частоты ω^{lab} . Зависимость эта неизвестна, однако, очевидно, что она является нелинейной.

При приближении к статическому пределу $\omega^{rest} \rightarrow 0$ групповая скорость электромагнитного волнового пакета в лабораторной системе отсчета стремится к “скорости света в пустоте” $\hat{\beta}(\omega^{rest}) \rightarrow 1$. Отсюда следует, что

$$\omega^{rest}(\omega^{lab}) = (\omega^{lab})^3 \cdot \Omega(\omega^{lab}), \quad (15)$$

где спектральная функция $\Omega(\omega^{lab})$ является четной функцией частоты ω^{lab} , причем $\Omega(\omega^{lab} = 0) \equiv \chi \neq 0$. Далее в работе рассматриваются только физические процессы в области низких частот, начиная от $\omega^{rest} = 0$ вплоть до порога нарушения стабильности вакуума

$$\hbar\omega_{trsh}^{rest} = mc^2, \quad (16)$$

где m – масса покоя электрона.

Поляризация электромагнитного вакуума

Соотношение (9) предоставляет возможность построить нелинейные уравнения Максвелла в пустоте посредством учета поляризационных свойств физического вакуума,

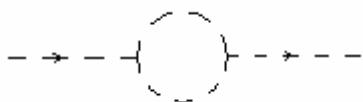


Рис. 1. Процесс $\gamma \rightarrow 2\gamma \rightarrow \gamma$



Рис. 2. Процесс $\gamma \rightarrow e^{\mp} + \gamma \rightarrow \gamma$



Рис. 3. Процесс $\gamma \rightarrow (e^{-} + e^{+})_{virt} \rightarrow \gamma$

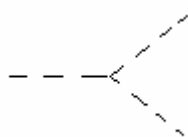


Рис. 4. Процесс $\gamma \rightarrow 2\gamma$

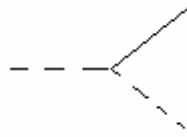


Рис. 5. Процесс $\gamma \rightarrow e^{\mp} + \gamma$

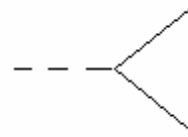


Рис. 6. Процесс $\gamma \rightarrow e^{-} + e^{+}$

определяемых, в первую очередь, самодействием электромагнитной волны, а также ее взаимодействием с виртуальными электронами, позитронами и другими частицами.

Учет вакуумных токов произведем по аналогии со стандартным способом обобщения уравнений Максвелла в пустоте на случай наличия зарядов и токов:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}_{vac} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{H} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} = 4\pi \rho_{vac} \end{cases}, \quad (17)$$

где $(c\rho_{vac}, \vec{j}_{vac})$ – плотность тока поляризации вакуума. На языке вектор-потенциалов уравнение (17) приобретает вид:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A^\mu}{\partial t^2} - \nabla^2 A^\mu = \frac{4\pi}{c} j_{vac}^\mu(x), \quad (18)$$

которое должно быть дополнено условием калибровки Лоренца:

$$\frac{\partial A^\kappa}{\partial x^\kappa} = 0. \quad (19)$$

Из уравнения (18) видно, что электромагнитное поле поляризует вакуум. Другими словами, виртуальные электроны и позитроны начинают двигаться с ускорением. В результате в плотности тока поляризации вакуума появляются члены типа

$$j_{vac}^\mu(x) \sim \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A^\mu}{\partial t^2}, \quad (20)$$

¹ На всех диаграммах в настоящей работе штриховые линии отвечают распространению фотонов, а сплошные – распространению электронов и позитронов.

отвечающие за появление у физического вакуума показателя преломления n , не равно единице. Процессу преломления световой волны в результате взаимодействия с самой собой в низшем порядке теории возмущений соответствуют диаграммы 1-3¹.

Нелокальность теории приводит к появлению в выражении для плотности тока поляризации вакуума членов типа лучистого трения (т.е., к поглощению фотонов):

$$j_{vac}^\mu(x) \sim \frac{1}{c^3} \frac{\partial^3}{\partial t^3} A^\mu(x). \quad (21)$$

Этому току соответствуют диаграммы 4-6, причем канал $\gamma \rightarrow 2\gamma$ является открытым при любых энергиях исходного фотона, а каналы $\gamma \rightarrow e^{-} + \gamma$ и $\gamma \rightarrow e^{+} + \gamma$ открываются, как только энергия фотона в системе его покоя превышает порог распада $\hbar\omega > mc^2$. Особо подчеркнем, что рамках развиваемого подхода электродинамика превращается в теорию с бегущей константой связи. Поэтому процессы типа 5 не запрещены законом сохранения заряда.

Именно из-за присутствия членов типа (21) в выражении для плотности индуцированного тока поляризации вакуума у показателя преломления вакуума появляется мнимая часть. В свою очередь, отсутствие определенной четности у плотности индуцированного тока поляризации физического вакуума обуславливает необратимость микропроцессов и определяет существование Стрелы Времени. При этом “трение” фотонов о физический вакуум происходит, в основном, из-за их взаимодействия с виртуальными электронами и позитронами. Этот процесс приводит к тому, что первичный фотон сам начинает излучать электромагнитные волны, которые также са-

моорганизуются в фотоны. В результате происходит затухание и расплывание исходного волнового пакета по мере того, как он теряет энергию за счет нелинейности плотности вакуумного тока $j_{vac}^\mu(x)$, как функции вектор-потенциала $A^\mu(x)$.

Постоянная Планка \hbar попадает в классическую электродинамику в результате выполнения условия:

$$\int \frac{E^2 + H^2}{8\pi} \cdot dV = \hbar \cdot \omega, \quad (22)$$

которое справедливо в любой системе отсчета, поскольку как энергия, так и частота представляют собой нулевые компоненты соответствующих 4- векторов.

В рамках этой философии у фотона автоматически появляется масса покоя, которая строго зависит от частоты ω^{rest} в системе покоя фотона, причем масса фотона содержит как вещественную, так и мнимую части:

$$m_{photon}(\omega^{rest})c^2 = m_0(\omega^{rest})c^2 - i \frac{\Gamma(\omega^{rest})}{2}. \quad (23)$$

В итоге скорость света убывает с ростом ω^{rest} , а масса фотона строго равна нулю только при $\omega^{rest} = 0$.

Соотношения (22) и (23) дают исчерпывающий ответ на вопрос о причинах квантования электромагнитного поля. Наличие нелинейного тока поляризации физического вакуума приводит к тому, что вместо максвелловской плоской электромагнитной волны, распространяющейся во всем пространстве, как в продольном, так и в поперечном направлении, образуется компактный сгусток электромагнитной материи – фотон. Кроме того, они однозначно подтверждают точку зрения А.А. Логунова [13] на природу сил тяготения.

Для того чтобы формальную запись уравнения (18) превратить в основное уравнение новой физической теории, необходимо установить явный вид плотности вакуумного тока $j_{vac}^\mu(x)$.

Идея, лежащая в основе решения этой задачи, состоит в следующем. Выражение для плотности вакуумного тока надо получать исходя из того, что ускорение виртуальных электронов и позитронов, находящихся в объеме фотона, пропорционально напряженности электрического поля ($\vec{a}_{e^\pm} \sim \vec{E}$).

Как известно, электрические заряды, движущиеся с ускорением, излучают электромагнитные волны. Исходный фотон при этом теряет часть своей энергии. За счет этого у физического вакуума появляется коэффициент поглощения κ_v . Другими словами, физический вакуум представляет собой несколько необычную диссипативную систему. Однако и для столь экзотической диссипативной системы выполняются дисперсионные соотношения, представляющие собой одну из форм математической записи принципа причинности в физике. Поэтому показатель преломления физического вакуума n_v также отличен от нуля. Далее везде, где это не оговорено специально, мы будем называть показателем преломления физического вакуума комплексную величину $n(\omega) = n_v + i\kappa_v$. Вещественная часть показателя преломления n в приближении электромагнитного поля малой интенсивности пропорциональна плотности материи (энергии) $\text{Re } n(x) \sim W(x) = T^{00}(x)$, а мнимая часть пропорциональна градиенту плотности материи $\text{Im } n(x) \sim (\hat{s} \cdot \nabla W(x))$ (здесь \hat{s} – оператор спина фотона, см., например, работы [5,6], в которых дан подробный анализ оптической модели упругого рассеяния и эффектов спин-орбитального взаимодействия).

Из этих соображений можно установить вид плотности тока $j^\mu(x)$ поляризации физического вакуума. Определим ток $j^\mu(x)$ как свертку потенциала $A^\mu(x)$ с тензором классической (т.е., не квантовой!) плотности поляризации физического вакуума $\Pi^{\mu\lambda}(x - x')$:

$$j^\mu(x) = i \int A_\lambda(x') \cdot \Pi^{\mu\lambda}(x - x') d\Omega'. \quad (24)$$

Интегрирование в (24) осуществляется по инвариантному 4- объему $d\Omega = dx \cdot dy \cdot dz \cdot cdt$.

В приближении самосогласованного поля малой интенсивности тензор $\Pi^{\mu\lambda}(x - x')$ пропорционален тензору энергии – импульса электромагнитного поля, поэтому

$$\Pi^{\mu\lambda}(x) = \frac{1}{c^2} \left[\kappa_{eff} + i v_{eff} \hat{s}^p \frac{\partial}{\partial x^p} \right] \cdot T^{\mu\lambda}(x). \quad (25)$$

В (25)

$$\kappa_{eff} = \kappa_0 + \kappa_1 \cdot e + \kappa_2 \cdot e^2 + \kappa_3 \cdot e^3 + \kappa_4 \cdot e^4 + \dots (26)$$

где κ_{eff} – эффективный коэффициент поляризуемости физического вакуума, а e – заряд виртуальной частицы, взаимодействующей с электромагнитной волной. Особо подчерк-

нем, что $e < 0$ для электронов, и $e > 0$ для позитронов.

В (25) фигурирует тензор энергии-импульса электромагнитного поля $T^{\mu\lambda}(x)$ [1]:

$$T^{\mu\lambda}(x) = \frac{1}{4\pi} \left(-F^{\mu\nu}(x)F_{\nu}^{\lambda}(x) + \frac{1}{4}g^{\mu\lambda}F^{\nu\sigma}(x)F_{\nu\sigma}(x) \right), \quad (27)$$

где $F^{\mu\nu}(x)$ – тензор электромагнитного поля:

$$F_{\mu\nu}(x) = \frac{\partial A_{\nu}}{\partial x^{\mu}} - \frac{\partial A_{\mu}}{\partial x^{\nu}}. \quad (28)$$

В приближении (25) вклад всех видов виртуальной материи, отвечающих за возникновение обратной связи между электромагнитной волной и физическим вакуумом, учитывается интегрально с помощью эффективной величины – коэффициента поляризуемости физического вакуума κ_{eff} .

В соотношении (25) также присутствует оператор спина фотона \hat{s}^{ρ} . Его компоненты $\hat{s}^1 = \hat{s}_x$, $\hat{s}^2 = \hat{s}_y$, $\hat{s}^3 = \hat{s}_z$ в декартовом базисе имеют вид [12]:

$$\hat{s}^0 = \sqrt{3} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \hat{s}_x = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{s}_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{s}_z = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (29)$$

В формуле (29) использована нормировка

$$(\hat{s}^0)^2 - (\hat{\vec{s}})^2 = \hat{I}, \quad (30)$$

где

$$\hat{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (31)$$

единичная матрица. Спинорный коэффициент поляризуемости физического вакуума v_{eff} в формуле (25) подлежит определению из дополнительных условий.

В разложении (26) нулевой член соответствует физическим процессам, изображенным на диаграммах 1 и 4, первый член описывает вклад диаграмм 2 и 5, второму члену разложения отвечают диаграммы 3 и 6. Таким образом, в соотношении (25) учтен как вклад самодействия электромагнитного поля, так и вклад взаимодействия электромагнитной волны с виртуальной заряженной материей.

Приближение полей малой интенсивности позволяет замкнуть систему уравнений электродинамики вакуума, в которую, строго говоря, необходимо добавить уравнения Дирака для электронов, позитронов, протонов, и других заряженных частиц со спином

1/2. Кроме того, точная система уравнений электродинамики физического вакуума должна включать в себя уравнения для тяжелых лептонов, адронных резонансов, различных мезонов, а также калибровочных бозонов.

В рамках настоящей работы анализируются только физические причины квантования электромагнитного поля. Поэтому всюду далее мы ограничимся анализом слабых полей и исследованием эффекта поляризации вакуума в скалярном приближении $v_{eff} = 0$.

Необходимо также подчеркнуть, что в рамках развиваемого подхода постоянная Планка имеет физический смысл основной характеристики фотона. Другими словами, постоянная Планка появляется в классической электродинамике, как неотъемлемая характеристика волнового пакета, каковым является фотон, причем групповая скорость этого пакета подчиняется стандартному соотношению:

$$\text{Re } \hat{c}(\omega_l) = \text{Re} \left(\frac{d\omega}{dk} \right)_l = \frac{\lim_{\omega_l \rightarrow 0} \text{Re } \hat{c}(\omega_l)}{\text{Re } n(\omega_l)} \equiv \frac{c}{\text{Re } n(\omega_l)}. \quad (32)$$

Отметим, что соотношение (27) имеет смысл только в лабораторной системе отсчета, т.к. в системе покоя фотона его групповая скорость равна нулю по определению.

Электродинамика в системе покоя фотона

Для того чтобы решить уравнение (18) с учетом калибровки (19) необходимо записать эти уравнения в системе покоя фотона. В этой инерциальной системе отсчета выражение для 4- потенциала электромагнитного поля в приближении скалярной оптики ($v = 0$) имеет вид:

$$A_{rest}^{\mu}(x) = f^{\mu}(t) \cdot \Upsilon^{\mu}(\vec{r}). \quad (33)$$

Через 4-вектор $\Upsilon^{\mu}(x) = (\Upsilon^0, \vec{\Upsilon})$ выражается распределение энергии и импульса электромагнитного поля по объему фотона, а эволюция волнового пакета во времени описывается функцией $f^{\mu}(t)$. Вектор-потенциал $A_{rest}^{\mu}(x)$ факторизуется в системе покоя фотона, поскольку в этой системе отсчета электромагнитное поле представляет собой стоячую сферическую волну. В силу того, что в системе покоя фотона его импульс по определению равен нулю, электромагнитное поле становится потенциальным. В этом случае

выполняется условие $\vec{\Upsilon} = 0$, означающее, что магнитное поле в системе покоя фотона равно нулю ($\vec{H} = 0$). Зависящий от координаты \vec{r} сомножитель, входящий в нулевую компоненту 4- потенциала $A_{rest}^\mu(x)$ назовем структурной функцией фотона и обозначим его через $\Upsilon^0(\vec{r}) \equiv \Upsilon(\vec{r})$. Очевидно, что электрическое поле в объеме фотона пропорционально градиенту структурной функции:

$$\vec{E} = -f(t) \cdot \nabla \Upsilon, \quad (34)$$

где $f(t) \equiv f^0(t)$.

В уравнении (18) присутствует плотность вакуумного тока

$$j^\mu(x) = (j^0, \vec{j}). \quad (35)$$

Так как в системе покоя фотона электромагнитное поле является потенциальным, отлична от нуля лишь одна компонента тока ($j^0 \equiv j$), и фотон в физическом вакууме приобретает ненулевой электрический заряд², зависящий от частоты ω^{rest} . Далее для сокращения записи мы будем опускать индекс *rest*.

С учетом вышесказанного вид тока поляризации вакуума в пределе слабых полей определяется однозначно. В самом деле. В импульсном представлении тензор энергии-импульса электромагнитного поля имеет вид:

$$T^{\mu\lambda}(k) = \frac{Wc^2}{\omega^2} k^\mu k^\lambda. \quad (36)$$

В системе покоя фотона его импульс и волновой вектор равны нулю, поэтому у тока (24) отлична от нуля лишь одна компонента:

$$T^{00}(x) = \frac{|\vec{E}|^2}{8\pi}, \quad (37)$$

и с учетом этого обстоятельства ток (24) принимает вид:

$$j(x) = i \frac{\kappa_{eff}}{c^2} \int A_0(x') T^{00}(x - x') d\Omega' \quad (38)$$

Подставляя (34) в (38), мы получаем выражение для плотности тока поляризации вакуума:

$$j(x) = i \frac{\kappa_{eff}}{8\pi c^2} \int f(t') \cdot \Upsilon(\vec{r}') \cdot |f(t - t') \cdot \nabla \Upsilon(\vec{r} - \vec{r}')|^2 d\Omega' \quad (39)$$

² Это следствие нарушения калибровки Лоренца (19). Однако в рамках развиваемого подхода это скорее достоинство теории, чем ее недостаток. Любопытно, что в квантовой электродинамике “нарушение” закона сохранения заряда (зависимость заряда электрона от частоты) положено в основу теории перенормировок, а в квантовой хромодинамике вообще положено в основу всей теории (бегущая константа связи).

и уравнение для волновой функции фотона

$$\left[\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right] f(t) \cdot \Upsilon(\vec{r}) = i \frac{\kappa_{eff}}{2c^2} \int f(t') \cdot \Upsilon(\vec{r}') |f(t - t') \cdot \nabla \Upsilon(\vec{r} - \vec{r}')|^2 d\Omega' \quad (40)$$

Еще раз подчеркнем, что соотношения (32)-(35) справедливы только в системе покоя фотона.

Строго говоря, на уравнении (40) исчерпываются внутренние возможности классической электродинамики в задаче о нахождении дисперсионных соотношений для физического вакуума и вычислении структурной функции фотона. Это обусловлено тем, что величина плотности вакуумного тока

$$j(x) = i \frac{\kappa_{eff}}{8\pi c^2} \int f(t') \cdot \Upsilon(\vec{r}') \cdot f^+(t - t') \cdot f(t - t') (\nabla \Upsilon^+(\vec{r} - \vec{r}') \cdot \nabla \Upsilon(\vec{r} - \vec{r}')) d\Omega' \quad (41)$$

содержит неизвестную величину – постоянную поляризуемости физического вакуума κ_{eff} . Тем не менее, на основе уравнения (41) можно оценить масштаб нелинейных эффектов, приводящих к квантованию электромагнитного поля. Для этого заметим, что функция

$$W(t, \vec{r}) = \frac{1}{8\pi} (f^+(t) \cdot f(t)) (\nabla \Upsilon^+(\vec{r}) \cdot \nabla \Upsilon(\vec{r})) \quad (42)$$

имеет смысл плотности энергии электромагнитного поля. С учетом этого обстоятельства представим (41) в следующем виде:

$$j(x) = i \frac{\kappa_{eff}}{c^2} \int f(t') \cdot \Upsilon(\vec{r}') \cdot W(t - t', \vec{r} - \vec{r}') d\Omega'. \quad (43)$$

Для дальнейшего продвижения заметим, что в формуле (43) интегрирование по t' при анализе затухающих решений осуществляется в пределах $t' \in (-\infty, t]$, так как электромагнитная волна не может взаимодействовать сама с собой с опережением по времени.

В силу того, что $W(t, \vec{r})$ представляет собой плотность энергии фотона, распадающегося в собственной системе отсчета, мы можем считать, что

$$W(t, \vec{r}) = \exp\left(-\frac{\Gamma}{\hbar} t\right) \cdot W_0(\vec{r}). \quad (44)$$

На данном этапе рассмотрения конкретная зависимость коэффициента поглощения вакуума от частоты несущественна. Необходимо отметить только то, что величина $\Gamma = \Gamma(\omega)$, является четной функцией частоты ω (т.е. $\Gamma(\omega) = \Gamma(-\omega)$) в силу того, что любые диссипативные процессы являются необратимыми.

Очевидно, что для пространственной плотности электромагнитной энергии выпол-

няется соотношение Планка

$$\int W_0(\vec{r})dV = m_{\text{photon}}(\omega)c^2 = \hbar\omega. \quad (45)$$

Подставляя (44) в (43), получаем:

$$j(x) = i \frac{\kappa_{\text{eff}}}{c} \int f(t') \cdot \Upsilon(\vec{r}') \cdot \exp\left[-\frac{\Gamma}{\hbar}(t-t')\right] W_0(\vec{r} - \vec{r}') dV' dt'. \quad (46)$$

Функция $f(t)$ является быстроосциллирующей, и в нулевом приближении можно считать, что

$$f(t) = \exp(-i(\omega - i\gamma)t), \quad (47)$$

где³ $\gamma = \frac{\Gamma}{2\hbar}$. В результате плотность тока поляризации вакуума принимает вид:

$$j(x) = i \frac{\kappa_{\text{eff}}}{c} \int e^{-i(\omega - i\gamma)t'} \cdot \Upsilon(\vec{r}') \cdot e^{-2\gamma(t-t')} \cdot W_0(\vec{r} - \vec{r}') dV' dt'. \quad (48)$$

Выполняя в (48) интегрирование по t' , получаем:

$$\int_{-\infty}^t \exp(-i(\omega - i\gamma)t' - 2\gamma(t-t')) dt' = i \cdot \frac{\exp(-i(\omega - i\gamma)t)}{\omega + i\gamma}, \quad (49)$$

и мы приходим к следующему выражению для плотности вакуумного тока:

$$j(x) = -\frac{\kappa_{\text{eff}}}{c} \cdot \frac{\exp(-i(\omega - i\gamma)t)}{\omega + i\gamma} \int \Upsilon(\vec{r}') \cdot W_0(\vec{r} - \vec{r}') dV'. \quad (50)$$

Воспользуемся общеизвестным фактом малости размеров элементарных частиц и высочайшей точности результатов квантовой электродинамики, которая, как известно, разработана в локальном приближении. В этом случае плотность энергии электромагнитного поля в объеме фотона можно считать сосредоточенной в точке. В приближении локального взаимодействия

$$W_0(\vec{r}) \approx W_{00} \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}') = \hbar\omega \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}'), \quad (51)$$

и выражение для плотности тока поляризации вакуума упрощается:

$$j(x) = -\hbar\omega \frac{\kappa_{\text{eff}}}{c} \cdot \frac{\exp(-i(\omega - i\gamma)t)}{\omega + i\gamma} \Upsilon(\vec{r}). \quad (52)$$

Построим уравнение для структурной функции фотона. Для этого представим (18) в виде:

$$\left[\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right] \cdot f(t) \cdot \Upsilon(\vec{r}) = \frac{4\pi}{c} j(x). \quad (53)$$

³ Строго говоря, вместо (47) надо было бы использовать вещественную функцию

$$f(t) = \cos(\omega t) \cdot \exp(-\gamma t),$$

поскольку мы имеем дело со стоячей волной. Однако в контексте решаемой задачи применение математического трюка, позволяющего существенно упростить выкладки, не влияет на конечный результат.

Подставим выражение (52) в уравнение (53):

$$\left[-\frac{(\omega - i\gamma)^2}{c^2} - \nabla^2 \right] \cdot e^{-i(\omega - i\gamma)t} \cdot \Upsilon(\vec{r}) = -\frac{4\pi\kappa_{\text{eff}}}{c^2} \frac{\hbar\omega}{\omega + i\gamma} \Upsilon(\vec{r}) \cdot e^{-i(\omega - i\gamma)t}. \quad (54)$$

С учетом того обстоятельства, что структурная функция фотона по определению не зависит от времени, приходим к следующему выражению

$$\nabla^2 \Upsilon(\vec{r}) = \left[\frac{4\pi\kappa_{\text{eff}}}{c^2} \frac{\hbar\omega}{\omega + i\gamma} - \frac{(\omega - i\gamma)^2}{c^2} \right] \Upsilon(\vec{r}). \quad (55)$$

В системе покоя фотона его структурная функция обладает сферической симметрией, и уравнение (55) превращается в обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) \Upsilon(r) + k^2(\omega) \Upsilon(r) = 0, \quad (56)$$

где

$$k^2(\omega) = \frac{(\omega - i\gamma)^2}{c^2} - \frac{4\pi\kappa_{\text{eff}}\hbar}{c^2} \cdot \frac{\omega}{\omega + i\gamma}, \quad (57)$$

решение которого имеет вид:

$$\Upsilon(r) = \Upsilon_0(k) \frac{\exp(ikr)}{r}. \quad (58)$$

Т.е., структурная функция фотона в области частот, для которой выполняются условие

$$\text{Re}(k(\omega)) > 0, \quad (59)$$

представляет собой сферическую стоячую электромагнитную волну. Из формулы (57) следует, что при $\omega \rightarrow 0$ мнимая часть волнового числа положительна:

$$\text{Im}(k(\omega)) > 0 \quad (60)$$

и структурная функция фотона превращается в потенциал Юкавы. Это означает, что электрический заряд фотона (бегущая константа связи в электродинамике) в среднем равен нулю, а в каждый момент времени отличен от нуля, но экранирован, как и любой заряд, помещенный в диэлектрик. В результате фотоны поляризуют вакуум гораздо сильнее, чем электроны. И это не удивительно, поскольку для электронов в их системе покоя волновой вектор $\vec{k} = 0$, и выражение (58) переходит в известный закон Кулона. Из выражения (58) также следует, что геометрические размеры фотона в системе его покоя имеют порядок длины волны, что полностью согласуется со здравым смыслом. Наконец, найдем постоянную интегрирования Υ_0 из условия (45). Для этого используем тот факт, что

$$\nabla\Upsilon(r) = \Upsilon_0 \vec{e}_r \frac{\partial}{\partial r} \frac{\exp(ikr)}{r} = \Upsilon_0 \vec{e}_r \left[ik \frac{\exp(ikr)}{r} - \frac{\exp(ikr)}{r^2} \right], \quad (61)$$

откуда следует, что

$$W_0(\vec{r}) = \frac{\Upsilon_0^2}{8\pi} \left| ik \frac{\exp(ikr)}{r} - \frac{\exp(ikr)}{r^2} \right|^2. \quad (62)$$

и вытекает уравнение на Υ_0^2 :

$$\int \frac{\Upsilon_0^2}{8\pi} \left| ik \frac{\exp(ikr)}{r} - \frac{\exp(ikr)}{r^2} \right|^2 dV = \hbar\omega. \quad (63)$$

Как уже упоминалось выше, эффекты поляризации вакуума чрезвычайно малы, а диссипация энергии фотона происходит столь медленно, что для незначительного изменения длины электромагнитной волны в оптическом диапазоне фотон должен преодолеть расстояния в сотни миллионов световых лет. Поэтому влияние величин κ_{eff} и γ на нормировку структурной функции сводится к тому, что интеграл (63) сходится на верхнем пределе. Воспользуемся соотношением

$$(ikr - 1) \cdot (-ik^* r - 1) = 1 + |k(\omega)|^2 r^2 + 2 \operatorname{Re} k(\omega) \cdot r, \quad (64)$$

и выполним в (63) интегрирование по угловым переменным. В результате уравнение на Υ_0^2 принимает вид:

$$\frac{\Upsilon_0^2}{2} \int e^{-2 \operatorname{Im} k(\omega) r} \cdot [1 + |k(\omega)|^2 r^2 + 2 \operatorname{Re} k(\omega) \cdot r] \cdot r^{-2} dr = \hbar\omega. \quad (65)$$

Интеграл (65) можно представить в виде суммы интегралов, два из которых расходятся на нижнем пределе в полном соответствии с тем, что классическая электродинамика становится внутренне противоречивой в области малых расстояний порядка классического радиуса электрона. В соответствии с этим введем фактор обрезания

$$\Lambda(kr_0) = |k(\omega)|^{-1} \int_{r_0}^{\infty} e^{-2 \operatorname{Im} k(\omega) r} \cdot [1 + |k(\omega)|^2 r^2 + 2 \operatorname{Re} k(\omega) \cdot r] \cdot r^{-2} dr, \quad (66)$$

где r_0 – радиус обрезания. Из формулы (66) следует, что

$$\frac{\Upsilon_0^2 k}{2} \Lambda(kr_0) = \hbar\omega, \quad (67)$$

и мы, таким образом, получаем явное выражение для постоянной Планка:

$$\hbar = \frac{\Upsilon_0^2}{2c} \Lambda(kr_0), \quad (68)$$

откуда видно, что постоянная Планка действительно характеризует свойства электромагнитного волнового пакета, называемого фотоном. В приближении низких частот

$$\Lambda(kr_0) \approx \frac{1}{|k(\omega)| \cdot r_0} \quad (69)$$

она равна

$$\hbar \approx \frac{\Upsilon_0^2}{2ckr_0} \quad (70)$$

причем под k (без аргумента) мы подразумеваем $|k(\omega)|$. Поскольку по своему физическому смыслу радиус обрезания $r_0 = const$, мы можем найти зависимость $\Upsilon_0 = \Upsilon_0(k)$. Высокая точность, с которой постоянная Планка действительно является фундаментальной физической константой, позволяет найти величину Υ_0 :

$$\Upsilon_0(k) = \sqrt{2ckr_0 \hbar}. \quad (71)$$

Из формулы (71) видно, что чем выше энергия фотона, тем больше амплитуда его структурной функции $\Upsilon_0(k)$, и тем меньше его эффективный радиус $\sim k^{-1}$. Следовательно, поперечные размеры фотона (релятивистский инвариант!) имеют порядок длины его волны, и таким образом, лимитируют точность измерения координаты электрона в квантовой теории. Отсюда автоматически получается соотношение неопределенности Гейзенберга $\Delta p \cdot \Delta x \sim \hbar$ и вытекает необходимость отказа от ньютоновской механики и перехода к квантовой механике.

Вывод: вероятностное толкование волновой функции электрона в нерелятивистской квантовой механике имеет право на существование уже хотя бы потому, что мы измеряем координату электрона, бросая на него фотоны, каждый из которых имеет конечные поперечные размеры. Другими словами, в рамках развиваемого подхода процедура измерения в квантовой механике сводится к решению задачи кавалера де Мере.

В процессе анализа соотношения (63) мы сталкиваемся со стандартной для практически всех версий теории поля (как классической, так и квантовой) – расходимостью интеграла (63) на нижнем пределе. Для того чтобы устранить эту расходимость, мы ввели в соотношение (63) некий эффективный радиус обрезания r_0 . В качестве естественного параметра обрезания в теории самоорганизации электромагнитных волн в физическом вакууме логично выбрать величину, пропорциональную классическому радиусу электрона (1). При таком выборе параметра обрезания мы приходим к соотношению:

$$\Upsilon_0(\omega) = |e| \cdot \sqrt{\frac{\hbar\omega}{mc^2}}, \quad (72)$$

физический смысл которого абсолютно прозрачен. Из (72) следует, что амплитуда структурной функции фотона пропорциональна модулю заряда электрона и корню квадратному из отношения его энергии к энергии выхода на массовую поверхность виртуальных электронов (позитронов), находящихся в объеме фотона. Другими словами, канал распада фотона на электрон (позитрон) и фотон открывается, как только мгновенный электрический заряд фотона в его системе покоя становится равным электрическому заряду электрона (позитрона). Этому процессу соответствует диаграмма 5.

Отметим, что канал двухчастичного распада фотона на электрон (позитрон) и фотон в стандартной квантовой электродинамике строго запрещен законом сохранения электрического заряда. Учет эффектов поляризации вакуума приводит к появлению у фотона не только отличной от нуля массы покоя, но и мгновенного электрического заряда. В этом случае каналы распада фотона $\gamma \rightarrow e^- + \gamma$ и $\gamma \rightarrow e^+ + \gamma$ становятся открытыми.

Следует особо остановиться на том, что поскольку волновая функция фотона в системе покоя является быстроосциллирующей функцией времени, то средний по времени электрический заряд фотона с огромной степенью точности равен нулю, а знак и величина его мгновенного заряда определяются моментом времени, в который он взаимодействует с виртуальной частицей. На языке фейнмановских диаграмм анализируемые процессы “самопреломления” и “самопоглощения” электромагнитной волны описываются приведенными выше диаграммами 1-6. При этом в момент распада фотона (т.е. в вершине соответствующей диаграммы) величина и знак его мгновенного заряда совпадают со знаком и величиной электрического заряда частицы, рождающейся из вакуума⁴.

Из вышесказанного следует, что физической причиной обрезания интеграла пол-

ной энергии фотона на нижнем пределе является спонтанное нарушение стабильности электромагнитного вакуума. Другими словами, электрическое поле в объеме фотона высокой энергии становится столь интенсивным, что выбивает из вакуума электроны, позитроны и другие массивные частицы. С формальной точки зрения расходимость интеграла (63) связана с тем, что при высоких энергиях фотон уже нельзя описывать одним нелинейным волновым уравнением (18). Его необходимо дополнить уравнением Дирака, описывающим эволюцию электронов и позитронов, рождающихся из физического вакуума в интенсивном электромагнитном поле. При еще более высоких энергиях фотонов аналогичный механизм приводит к рождению протонов, нейтронов и т.п. При этом не исключено, что процессы образования адронов связаны не только с наличием в пространстве электромагнитного поля, но и с присутствием в нем виртуальной кварк-глюонной материи. Таков универсальный механизм генерации вещества во Вселенной. В заключение этого раздела добавим, что фотоны сверхвысоких энергий, способные “выбить” из вакуума “весомую материю”, могут рождаться как в результате материальных астрофизических процессов (например, при взрывах Сверхновых), так и в результате флуктуаций физического вакуума, которые приводят к появлению нарастающих во времени решений уравнения (40):

$$A_{rest}^0(x) = f(t) \cdot \Upsilon(\vec{r}) = \exp(-i(\omega + i\gamma)t) \Upsilon(\vec{r}). \quad (73)$$

Дисперсионные соотношения для физического вакуума

Исследуем зависимость показателя преломления и коэффициента поглощения физического вакуума от частоты в системе покоя фотона. Для этого воспользуемся соотношением (57), и введем обозначение $\xi^2 = 2\pi\kappa_{eff}\hbar > 0$. Тогда в соответствии с (72)

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} [ck(\omega)] = \lim_{\omega \rightarrow 0} \sqrt{-4\pi\kappa_{eff}\hbar} = i \cdot \sqrt{2} \cdot \xi \neq 0. \quad (74)$$

Из соотношения (74) следует, что фотон, даже при нулевой частоте ($\omega = 0$) имеет волновое число, отличное от нуля ($k(0) \neq 0$). Этот эффект обусловлен тем, что флуктуации электромагнитного поля взаимодействуют сами с собой. С физической точки зрения описан-

⁴ Указанное условие строго выполняется только на пороге реакции распада фотона. Во всех остальных случаях имеет место закон сохранения мгновенного заряда.

ный выше эффект аналогичен хорошо известному в квантовой электродинамике эффекту взаимодействия электронов с флуктуациями квантованного поля излучения, приводящими к появлению Лэмбовского смещения уровней [2,4].

Перейдем к исследованию свойств дисперсионных соотношений, записанных в системе покоя фотона. Дело в том, что в этой системе отсчета групповая скорость фотона равна нулю по определению, и выражение (32) в этой системе отсчета лишено какого-либо физического смысла. Тем не менее, анализ выражения (57) позволяет существенно углубить понимание процессов самоорганизации электромагнитной материи в области низких частот. Покажем это.

Определим показатель преломления $n_r(\omega)$ и коэффициент поглощения $\kappa_r(\omega)$ физического вакуума в системе покоя фотона с помощью соотношения:

$$n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega) = \frac{c^2}{2\omega} \frac{d}{d\omega} k^2(\omega). \quad (75)$$

В рамках последующего анализа будет обоснована целесообразность подобного нестандартного определения, обусловленного выбором необычной системы отсчета.

Из формулы (75) вытекает, что

$$n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega) = (1 - i\gamma\omega^{-1})(1 - i\gamma') - \xi^2 \frac{(\omega + i\gamma) - \omega(1 + i\gamma')}{\omega(\omega + i\gamma)^2}. \quad (76)$$

Как уже отмечалось выше, функция $\gamma(\omega)$ является четной. Поэтому в пределе низких частот разложение функции $\gamma(\omega)$ имеет вид:

$$\gamma(\omega) = a\omega^2 + \sigma\omega^4 + \dots \quad (77)$$

В формуле (77) отсутствует нулевой член разложения, поскольку, фотон, обладающий нулевой энергией, не может ее терять. В силу этого условие

$$\gamma(\omega = 0) = 0. \quad (78)$$

является строгим.

Величина коэффициентов ряда (77) неизвестна, однако тот факт, что специальная теория относительности Эйнштейна прошла вековую проверку физическим экспериментом и инженерной практикой говорит о многом. Все основные варианты классической и квантовой электродинамики полностью подтверждены многочисленными прецизионными экспериментами только потому, что рассматриваемые в настоящей работе эффекты

поляризации вакуума фотонами в области низких частот пренебрежимо малы, и проявляются они исключительно в том, что электромагнитное поле квантуется. В то же время хорошо известно, что квантовая теория прекрасно согласуется с экспериментом, поскольку представляет собой линейный предел нелинейной теории, в которой постоянная Планка \hbar появляется в результате процедуры обрезания в области высоких частот, или, что то же самое, малых расстояний. Поэтому мы ограничимся первыми членами разложения (77).

Покажем, что в коэффициент a формуле (77) строго равен нулю. Для этого заметим, что при $\sigma = 0$

$$n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega) = (1 - i\gamma\omega^{-1})(1 - i\gamma') - \xi^2 \frac{i\gamma - i\gamma'\omega}{\omega(\omega + i\gamma)^2} \approx 1 + i \frac{a\xi^2}{\omega}. \quad (79)$$

В то же время показатель поглощения фотона нулевой энергии ($\omega = 0$) равен нулю:

$$\kappa_r(\omega = 0) = 0. \quad (80)$$

Из соотношений (79) и (80) следует, что $a = 0$. Таким образом, для вычисления зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения физического вакуума в пределе низких частот следует использовать приближение:

$$\gamma(\omega) = \sigma\omega^4. \quad (81)$$

Соотношение (81) означает, что низкоэнергетический фотон в системе покоя излучает электромагнитные волны, как самое обыкновенное нагретое тело, то есть по закону Стефана-Больцмана. В соответствии с этим подставим в (81) в (76) и получим:

$$n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega) = 1 + 3i\xi^2\sigma\omega. \quad (82)$$

Очевидно, что соотношение (82) удовлетворяет условию:

$$\begin{cases} n_r(\omega = 0) = 1 \\ \kappa_r(\omega = 0) = 0 \end{cases} \quad (83)$$

Входящие в выражение (83) члены для показателя преломления зависят от четной степени частоты ω , а для коэффициента поглощения – от нечетной, в полном соответствии с первыми принципами физики, что оправдывает нестандартное определение (75).

Отметим, что при определенных условиях знак при множителе ξ^2 может измениться. Дело в том, что в области достаточно высоких энергий (частот) приближение само-

согласованного поля становится, вообще говоря, некорректным. При выполнении условий $\kappa_1 > 0$, $|\kappa_1 \cdot e| > |\kappa_0|$ в случае взаимодействия фотона с электроном мнимая часть волнового числа $k = k(\omega)$ положительна, а при взаимодействии с позитроном она становится отрицательной. В этом случае структурная функция фотона “размазывается” по всему пространству, катастрофически снижая вероятность выбивания позитрона из вакуума. Таков механизм образования “моря Дирака” и возникновения асимметрии распространения вещества и антивещества во Вселенной. Она обусловлена тем, что в плотность тока поляризации вакуума входят как четные, так и нечетные степени электрического заряда виртуальных частиц, с которыми взаимодействуют налетающие фотоны (см. разложение (26)).

Наконец, следует упомянуть, что уточнить вид зависимости $n = n(\omega)$ можно на основе дисперсионного соотношения для комплексного показателя преломления в диспергирующей и поглощающей среде [3]:

$$\operatorname{Re}[n(\omega) - n(0)] = P \int_0^{\infty} \frac{2\omega'^2 \operatorname{Im}(n(\omega'))}{\pi\omega'((\omega')^2 - \omega^2)} d\omega', \quad (84)$$

где ω – частота в системе отсчета покоя фотона, а $n(0) = 1$. В результате зависимость показателя преломления n от частоты ω имеется, а от выбора системы отсчета отсутствует. Именно поэтому зависимость показателя преломления $n = n(\omega)$ от частоты ω универсальна. Отсюда следует естественный и общепризнанный вывод: не существует выделенной инерциальной системы отсчета. В результате оказывается, что теория, в которой скорость света в вакууме в определенной степени лишается статуса фундаментальной физической постоянной, является релятивистски-инвариантной.

Вернемся к анализу соотношения (82). Из него следует, что только в случае $\omega = 0$ показатель преломления физического вакуума $n(0) = 1$. Но при $\omega = 0$ мы имеем дело с электростатическим полем, а не с электромагнитной волной. Следовательно “скорость света в пустоте c ” принципиально недостижима ни для каких материальных объектов, включая фотоны всех частотных диапазонов. В заключение добавим, что для того, чтобы

определить значения параметров теории κ , v и σ , необходимо оценить время жизни фотонов в физическом вакууме. Это можно сделать только на основе квантовой электродинамики и астрофизических данных.

Заключение

Резюмируем вышесказанное следующим образом.

1. Установлены пределы применимости специальной теории относительности. Уточнен принцип относительности Эйнштейна.

2. Показано, что электромагнитные волны индуцируют в вакууме поляризационные токи, за счет взаимодействия которых с индуцировавшим их полем и образуются компактные волновые пакеты, называемые фотонами.

3. Установлено, что постоянная c , присутствующая в преобразованиях Лоренца, имеет смысл низкочастотного предела скорости распространения электромагнитных волн в физическом вакууме.

4. Доказано, что только в статическом пределе ($\omega = 0$) показатель преломления физического вакуума $n(0) = 1$. Это означает, что “скорость света c ” принципиально недостижима ни для каких материальных объектов, включая фотоны во всех частотных диапазонах. Отсюда следует, что фотоны имеют конечную массу покоя, однозначно зависящую от их частоты в собственной системе отсчета.

5. Показано, что постоянная Планка определяет точку бифуркации – энергию фотона в системе его покоя, при которой происходит спонтанное нарушение стабильности электромагнитного вакуума.

6. Доказано, что электродинамика является физической теорией с бегущей константой связи, причем электрический заряд сохраняется только в пределе низких частот (энергий).

7. Установлено, что закон сохранения мгновенного электрического заряда строго выполняется в каждой вершине распада фотона, но в силу того, что его волновая функция является быстроосциллирующей во времени, имеет место нарушение закона сохранения заряда “в среднем”. Поэтому каналы распада фотона $\gamma \rightarrow 2\gamma$, $\gamma \rightarrow e^- + \gamma$, $\gamma \rightarrow e^+ + \gamma$ и т.п. не запрещены законами со-

хранения. Таким образом, в области сверхвысоких энергий в некотором смысле нарушается закон сохранения электрического заряда.

8. Показано, что соотношение неопределенностей Гейзенберга является следствием конечности поперечных размеров фотона. Таким образом, общепринятая квантовая теория (включая вероятностное толкование волновой функции) абсолютно правильно описывает все физические явления в области низких энергий. При переходе к области высоких и сверхвысоких энергий в существующие представления о строении и эволюции материи во Вселенной придется вносить серьезные коррективы.

9. Продемонстрировано, что асимметрия распространенности вещества и антивещества во Вселенной связана с тем, что тензор поляризации физического вакуума не имеет определенной четности по отношению к изменению знака электрического заряда виртуальных частиц.

10. Предложен универсальный механизм генерации вещества во Вселенной, и образования “моря Дирака”. Интересно определить порог, при котором вакуумные флуктуации приводят к появлению нарастающих во времени решений уравнения (40).

Благодарности

Выражаю глубокую благодарность В.А. Сойферу за неизменную моральную и организационную поддержку, Л.Г. Сапогину, стимулировавшему появление на свет этой работы и А.М. Зубрилину за финансовую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. Курс теоретической физики. Т.2. М.: Наука, 1973.
2. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Квантовая электродинамика. Курс теоретической физики. Т.4. М.: Наука, 1989.
3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. Курс теоретической физики. Т.8. М.: Наука, 1992.
4. *Бьёркен Дж.Д., Дрелл С.Д.* Релятивистская квантовая теория. Т.1. Релятивистская квантовая механика. М.: Наука, 1978.
5. *Барашенков В.С., Тонеев В.Д.* Взаимодействия высоко-энергетических частиц с атомными ядрами. М.: Атомиздат, 1972.
6. *Гольдбергер М., Ватсон К.* Теория столкновений. М.: Мир, 1967.
7. *Sapogin L.G.* On Unitary Quantum Mechanics // *Nuovo Cimento*. 1979. Vol. 53A. No2.
8. *Sapogin L.G., Ryabov Yu.A., Boychenko V.A.* Unitary Quantum Mechanics and a New Source of Energy. Moscow: Izvestia, 2005.
9. *Эрикссон Т., Вайзе В.* Пионы и ядра. М.: Наука. 1991.
10. *Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М.* Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике. М.: Наука, 1971.
11. *Гареев Ф.А., Ратис Ю.Л.* // *Ядерная Физика*. 1996. Т.59. №6.
12. *Варшалович Д.А., Москалев А.Н., Херсонский В.К.* Квантовая теория углового момента. Л.: Наука, 1975.
13. *Логунов А.А.* Релятивистская теория гравитации. М. Наука, 2006.

DISPERSION, ABSORPTION AND GENERATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN VACUUM

© 2007 Yu.L. Ratis

Image Processing Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Samara

The special principle of relativity of Einstein is corrected. The nonlinear mechanism of self-organization of electromagnetic waves into photons is discovered. It is shown, that the effect of quantization of electromagnetic field is caused by the interaction of the polarized vacuum with electromagnetic wave. It is proved, that the uncertainty principle of Heisenberg is a result of the photons finite cross section.