

ДИСКУССИЯ

ДИСПЕРСИЯ И ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ФИЗИЧЕСКОМ ВАКУУМЕ

Ю.Л. Ратис^{1,2}

¹Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара, Россия,

²Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

Аннотация

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.

Введение

Одним из основополагающих принципов современной физики является знаменитый постулат специальной теории относительности (СТО), согласно которому скорость света в вакууме является фундаментальной физической константой, и не зависит от выбора инерциальной системы отсчета. В теории это утверждение вытекает из уравнений Максвелла, являющихся инвариантными относительно преобразований Лоренца.

В настоящее время теория относительности Эйнштейна 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 электромагнитные 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 кванто-

вания 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 электромагнитные волны, скорость распространения которых хоть и велика, но конечна. Поэтому результаты измерения времени и расстояния, полученные различными наблюдателями, отличаются друг от друга, но связаны взаимнооднозначной зависимостью. При этом переход от одной инерциальной системы отсчета (ИСО) к другой осуществляется с помощью преобразований Лоренца [1]:

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

причем в качестве константы преобразования в формуле (2) фигурирует скорость распространения электромагнитных волн в вакууме (c), 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 электромагнитных волн.

Уравнения Максвелла для напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей для электромагнитных волн в пустоте имеют вид:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \vec{H} = 0, \\ \nabla \cdot \vec{E} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

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

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A^\mu}{\partial t^2} - \nabla^2 A^\mu = 0 \quad (4)$$

также Лоренц-инвариантны.

При переходе от (3) к (4) использовались общеизвестные соотношения:

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

калибровка Лоренца

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{A} = 0, \quad (6)$$

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

На первый взгляд, уравнения (3), (4) 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 фотона). 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 подробнейшим образом 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.

В связи с этим приведем специальный принцип относительности Эйнштейна в новой редакции [12]:

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) есть низкочастотный предел скорости распространения фотонов в вакууме $\hat{c}(\omega_r)$:

$$c = \lim_{\omega_r \rightarrow 0} \hat{c}(\omega_r), \quad (7)$$

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

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:

$$\begin{cases} x = \frac{\hat{c}(\omega_r)t'}{\sqrt{1-\hat{\beta}^2(\omega_r)}}, \\ y = y', \\ z = z', \\ ct = \frac{ct'}{\sqrt{1-\hat{\beta}^2(\omega_r)}}, \end{cases} \quad (8)$$

причем

$$\hat{\beta}(\omega_r) = \frac{\hat{c}(\omega_r)}{c}. \quad (9)$$

Частоты и волновые вектора при переходе из системы покоя фотона в лабораторную систему координат преобразуются аналогичным образом:

$$\begin{cases} ck_x^l = \frac{\hat{\beta}(\omega_r)\omega_r}{\sqrt{1-\hat{\beta}^2(\omega_r)}}, \\ k_y^l = k_{y'}, \\ k_z^l = k_{z'}, \\ \omega^l = \frac{\omega_r}{\sqrt{1-\hat{\beta}^2(\omega_r)}}. \end{cases} \quad (10)$$

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

Как будет показано ниже, для области низких частот, которая в рамках развиваемого подхода распространяется, начиная приблизительно от $\omega_l \geq \omega_{relict}$, где ω_{relict} – частота, порядка частоты реликтового излучения, вплоть до порога спонтанного нарушения стабильности электромагнитного вакуума

$$\hbar\omega_r^{resh} = mc^2, \quad (11)$$

где m – масса покоя электрона, зависимость $\hat{c} = \hat{c}(\omega_r)$ очень слабая. Поэтому в рамках настоящей работы все расчеты проделаны в приближении

$$\hat{c}(\omega_r) = c \cdot (1 - \varepsilon - \chi\omega_r^2), \quad (12)$$

где $\varepsilon \geq 0$ и $\chi > 0$ – коэффициенты разложения скорости фотона (в единицах c) в физическом вакууме в ряд по степеням ω_r^2 .

Поляризация электромагнитного вакуума

Соотношение (7) предоставляет возможность построить нелинейные уравнения Максвелла в пустоте посредством учета поляризационных свойств физического вакуума, определяемых, в первую очередь, самодействием электромагнитной волны, а также ее взаимодействием с виртуальными электронами и позитронами.

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

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}_{vac} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \vec{H} = 0, \\ \nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho_{vac}, \end{cases} \quad (13)$$

где $(c\rho_{vac}, \vec{j}_{vac})$ – плотность тока поляризации вакуума. На языке вектор-потенциалов уравнение (13) приобретает вид:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A^\mu}{\partial t^2} - \nabla^2 A^\mu = \frac{4\pi}{c} j_{vac}^\mu(x), \quad (14)$$

которое должно быть дополнено условием калибровки Лоренца:

$$\frac{\partial A^\kappa}{\partial x^\kappa} = 0. \quad (15)$$

Из уравнения (14) видно, что электромагнитное поле поляризует вакуум. Другими словами, виртуальные (вакуумные, морские) электроны и позитроны начинают двигаться с ускорением. В результате, в плотности тока поляризации вакуума появляются члены типа

$$j_{vac}^\mu(x) \sim \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A^\mu}{\partial t^2}, \quad (16)$$

отвечающие за появление у физического вакуума показателя преломления n , не равного единице. Процессу преломления световой волны в результате взаимодействия с самой собой в низшем порядке теории возмущений соответствуют диаграммы 1-3:

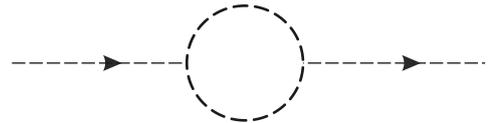


Рис. 1. Процесс $\gamma \rightarrow 2\gamma \rightarrow \gamma$

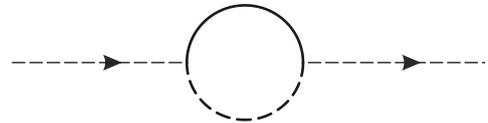


Рис. 2. Процесс $\gamma \rightarrow e^+ + \gamma \rightarrow \gamma$

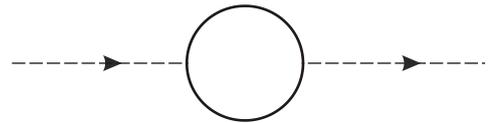


Рис. 3. Диаграмма процесса $\gamma \rightarrow (e^- + e^+)_{vir} \rightarrow \gamma$

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

тронов. Нелокальность теории приводит к появлению в выражении для плотности тока поляризации вакуума членов типа лучистого трения:

$$j_{vac}^{\mu}(x) \sim \frac{1}{c^3} \frac{\partial^3}{\partial t^3} A^{\mu}(x). \quad (17)$$

Этому току соответствуют диаграммы 4, 5:

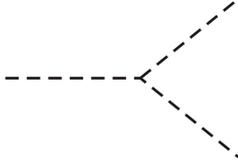


Рис. 4. Диаграмма процесса $\gamma \rightarrow 2\gamma$

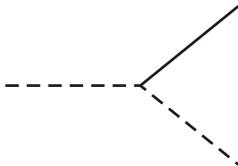


Рис. 5. Диаграмма процессов $\gamma \rightarrow e^{-} + \gamma$ и $\gamma \rightarrow e^{+} + \gamma$

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 (17) 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 самоорганизуются 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 теорию в результате выполнения условия:

$$\int \frac{E^2 + H^2}{8\pi} \cdot dV = \hbar \cdot \omega, \quad (18)$$

которое справедливо в любой системе отсчета, поскольку как энергия, так и частота представляют со-

бой нулевые компоненты соответствующих 4-векторов.

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

$$m_{photon}(\omega_r)c^2 = m_0(\omega_r)c^2 - i \frac{\Gamma(\omega_r)}{2}. \quad (19)$$

В итоге скорость света убывает с ростом ω_r , а масса фотона строго равна нулю только при $\omega_r = 0$.

Соотношения (18) и (19) 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.

Для того чтобы формальную запись уравнения (14) 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 пропорциональна плотности материи (энергии) $Re n(x) \sim W(x) = T^{00}(x)$, а мнимая часть пропорциональна градиенту плотности материи (энергии) $Im n(x) \sim (\hat{s} \cdot \nabla W(x))$ (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 вытекают следующие достаточно правдоподобные соотношения для плотности тока поляризации вакуума:

1) ток $j^\mu(x)$ являющийся сверткой потенциала $A^\mu(x)$ с тензором плотности поляризации физического вакуума $\Pi^{\mu\lambda}(x-x')$:

$$j^\mu(x) = i \int A_\lambda(x') \cdot \Pi^{\mu\lambda}(x-x') d\Omega'. \quad (20)$$

Интегрирование в (20) осуществляется по инвариантному 4- объему $d\Omega = dx \cdot dy \cdot dz \cdot cdt$.

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

$$\Pi^{\mu\lambda}(x) = \kappa T^{\mu\lambda}(x) + i\upsilon \hat{s}^p \frac{\partial}{\partial x^p} T^{\mu\lambda}(x), \quad (21)$$

где e – заряд виртуальной частицы, взаимодействующей с электромагнитной волной, а \hat{s}^p – оператор спина фотона. Особо подчеркнем, что $e < 0$ для электронов, и $e > 0$ для позитронов. Дополнительно отметим, что из-за того, что константа связи в излагаемой версии электродинамики является бегущей, условие калибровки (15) выполняется только «в среднем» [2], как и в КЭД.

Скалярный и спинорный коэффициенты поляризуемости физического вакуума κ и υ в формуле (21) подлежат определению из дополнительных условий. Второе слагаемое в (21) соответствует тому, что, как будет показано ниже, у фотона также имеется эффективный электрический заряд, но он является быстроосциллирующей функцией времени, и в среднем равен нулю. Таким образом, в соотношении (21) учтен вклад взаимодействия электромагнитной волны с виртуальной заряженной материей (первый член в выражении для тензора поляризации вакуума $\Pi^{\mu\lambda}(x)$) и вклад самодействия электромагнитного поля (второй член в (21)).

В рамках настоящей работы анализируются только физические причины квантования электромагнитного поля. Поэтому всюду далее мы ограничимся исследованием классического эффекта поляризации вакуума в скалярном приближении, полагая $\upsilon = 0$.

В (21) фигурирует тензор энергии-импульса электромагнитного поля $T^{\mu\lambda}(x)$ [1]:

$$T^{\mu\lambda}(x) = \frac{1}{4\pi} \left(-F^{\mu\nu}(x) F_\nu^\lambda(x) + \frac{1}{4} g^{\mu\lambda} F^{\nu\sigma}(x) F_{\nu\sigma}(x) \right), \quad (22)$$

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

$$F_{\mu\nu}(x) = \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} - \frac{\partial A_\mu}{\partial x^\nu}. \quad (23)$$

В рамках приближения (21) вклад всех видов виртуальной материи, отвечающих за возникновение обратной связи между электромагнитной волной и

физическим вакуумом, учитывается интегрально с помощью эффективной константы – коэффициента поляризуемости физического вакуума κ .

2) ток $j^\mu(x)$, представляющий собой сумму линейного и квадратичного по величине 4- потенциала $A^\mu(x)$ членов:

$$j^\mu(x) = i\kappa \int A_\lambda(x') F^{\mu\lambda}(x-x') d\Omega' + \dots \quad (24)$$

Несомненным достоинством этого тока $j^\mu(x)$ является пропорциональность его величины напряженности электрического и магнитного полей $F^{\mu\lambda}(x-x')$. Другими словами, выражение (24) является математической записью гипотезы о справедливости закона Ома для плотности тока, создаваемого виртуальными электронами и позитронами в поле падающей электромагнитной волны.

3) ток $j^\mu(x)$, представляющий собой сумму квадратичного и кубического по величине 4- потенциала $A^\mu(x)$ членов, определяемый плотностью действия электромагнитной волны в физическом вакууме:

$$j_\mu(x) = i \frac{\kappa}{16\pi} \times \int A_\mu(x') \left(F^{\nu\lambda}(x-x') \cdot F_{\nu\lambda}(x-x') \right) d\Omega' + \dots, \quad (25)$$

где

$$S_f = - \frac{1}{16\pi c} \int F^{\nu\lambda}(x) \cdot F_{\nu\lambda}(x) d\Omega \quad (26)$$

есть выражение для действия электромагнитного поля в вакууме [1], а согласно Планку квантуется именно действие.

Необходимо подчеркнуть, что в рамках развиваемого подхода, вне зависимости от того, какой гипотезы относительно конкретного выражения для плотности индуцированного тока поляризации вакуума мы придерживаемся, 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:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \hat{c}(\omega_l) &= \operatorname{Re} \left(\frac{d\omega}{dk} \right)_l = \\ &= \lim_{\omega_l \rightarrow 0} \frac{\operatorname{Re} \hat{c}(\omega_l)}{\operatorname{Re} n(\omega_l)} \equiv \frac{c}{\operatorname{Re} n(\omega_l)}. \end{aligned} \quad (27)$$

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 (14) с учетом калибровки (15) 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:

$$A_{rest}^\mu(x) = f^\mu(t) \cdot \Upsilon^\mu(\vec{r}). \tag{28}$$

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} множитель, 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:

$$\vec{E} = -f(t) \cdot \nabla \Upsilon, \tag{29}$$

где $f(t) \equiv f^0(t)$.

В уравнении (14) присутствует плотность вакуумного тока

$$j^\mu(x) = (j^0, \vec{j}). \tag{30}$$

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 заряд¹, зависящий от частоты ω . С учетом этого обстоятельства вид тока поляризации вакуума в пределе слабых полей определяется однозначно.

В самом деле. В импульсном представлении тензор энергии-импульса электромагнитного поля имеет вид:

¹ Это следствие нарушения калибровки Лоренца (15). 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).

$$T^{\mu\lambda}(k) = \frac{Wc^2}{\omega^2} k^\mu k^\lambda. \tag{31}$$

В системе покоя фотона его импульс и волновой вектор равны нулю, поэтому у тока (15) отлична от нуля лишь одна компонента:

$$T^{00}(x) = \frac{|\vec{E}|^2}{8\pi}, \tag{32}$$

и с учетом этого обстоятельства ток (19) принимает вид:

$$j(x) = i\kappa \frac{e}{c} \int A_0(x') T^{00}(x-x') d\Omega'. \tag{33}$$

Подставляя (26) в (33), мы получаем выражение для плотности тока поляризации вакуума:

$$j(x) = i \frac{\kappa e}{8\pi c} \times \int f(t') \cdot \Upsilon(\vec{r}') \cdot |f(t-t') \cdot \nabla \Upsilon(\vec{r}-\vec{r}')|^2 d\Omega'. \tag{34}$$

и уравнение для волновой функции фотона

$$\left[\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right] \cdot f(t) \cdot \Upsilon(\vec{r}) = i \frac{\kappa e}{2c^2} \times \int f(t') \cdot \Upsilon(\vec{r}') |f(t-t') \cdot \nabla \Upsilon(\vec{r}-\vec{r}')|^2 d\Omega'. \tag{35}$$

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

Выразим искомые функции $f(t)$ и $\Upsilon(\vec{r})$, а также плотность тока поляризации вакуума через их трансформанты Фурье:

$$f(t) = \int_0^\infty \tilde{f}(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega, \tag{36}$$

$$f^+(t) = \int_0^\infty \tilde{f}^+(\omega) \exp(i\omega t) d\omega, \tag{37}$$

$$\Upsilon(\vec{r}) = \int \tilde{\Upsilon}(\vec{k}) \exp(i\vec{k}\vec{r}) d^3\vec{k}, \tag{38}$$

$$\Upsilon^+(\vec{r}) = \int \tilde{\Upsilon}^+(\vec{k}) \exp(-i\vec{k}\vec{r}) d^3\vec{k}, \tag{39}$$

$$j(x) = \frac{4\pi}{c} \int d^3\vec{k} \int_0^\infty d\omega e^{i(\vec{k}\vec{r}-\omega t)} \tilde{j}(\omega, \vec{k}). \tag{40}$$

Подставляя (36)-(40) в (35), получаем уравнение:

$$-\int d^3\vec{k} \int_0^\infty d\omega \left[\frac{\omega^2}{c^2} - k^2 \right] \cdot e^{i(\vec{k}\vec{r}-\omega t)} \tilde{f}(\omega) \cdot \tilde{\Upsilon}(\vec{k}) = \frac{4\pi}{c} \int d^3\vec{k} \int_0^\infty d\omega e^{i(\vec{k}\vec{r}-\omega t)} \tilde{j}(\omega, \vec{k}). \tag{41}$$

Откуда немедленно следует, что

$$-\left[\frac{\omega^2}{c^2} - k^2 \right] \cdot \tilde{f}(\omega) \cdot \tilde{\Upsilon}(\vec{k}) = \frac{4\pi}{c} \tilde{j}(\omega, \vec{k}). \tag{42}$$

Здесь и далее под k понимается модуль волнового вектора \vec{k} сферически симметричной стоячей электромагнитной волны, каковой является фотон в системе его покоя.

Перепишем уравнение (42) в виде:

$$k^2(\omega) = \frac{\omega^2}{c^2} + \frac{4\pi}{c} \frac{\tilde{j}(\omega, \vec{k})}{\tilde{f}(\omega) \cdot \tilde{Y}(\vec{k})} = \frac{\omega^2}{c^2} \left[1 + \frac{4\pi c}{\omega^2} \cdot \frac{\tilde{j}(\omega, \vec{k})}{\tilde{f}(\omega) \cdot \tilde{Y}(\vec{k})} \right]. \quad (43)$$

Из (43) следует, что

$$k(\omega) = \frac{\omega}{c} \left[1 + \frac{4\pi c}{\omega^2} \cdot \frac{\tilde{j}(\omega, \vec{k})}{\tilde{f}(\omega) \cdot \tilde{Y}(\vec{k})} \right]^{1/2}. \quad (44)$$

Строго говоря, на соотношении (44) исчерпываются внутренние возможности классической электродинамики в задаче о нахождении дисперсионных соотношений для физического вакуума и вычисления структурной функции фотона. Это обусловлено тем, что величина плотности вакуумного тока

$$j(x) = i \frac{\kappa}{8\pi} \int f(t') \cdot \Upsilon(\vec{r}') \cdot f^+(t-t') \cdot f(t-t') (\nabla \Upsilon^+(\vec{r}-\vec{r}') \cdot \nabla \Upsilon(\vec{r}-\vec{r}')) d\Omega'. \quad (45)$$

содержит неизвестную величину - постоянную поляризуемости физического вакуума κ . Тем не менее, соотношение (45) позволяет оценить масштаб нелинейных эффектов, приводящих к квантованию электромагнитного поля. Покажем, как это можно сделать. Для этого заметим, что функция

$$W(t, \vec{r}) = \frac{1}{8\pi} (f^+(t) \cdot f(t)) (\nabla \Upsilon^+(\vec{r}) \cdot \nabla \Upsilon(\vec{r})) \quad (46)$$

имеет смысл плотности энергии электромагнитного поля. С учетом этого обстоятельства представим (45) в следующем виде:

$$j(x) = i\kappa \int f(t') \cdot \Upsilon(\vec{r}') \cdot W(t-t', \vec{r}-\vec{r}') d\Omega'. \quad (47)$$

Для дальнейшего продвижения заметим, что в формуле (47) 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

$$W(t, \vec{r}) = \exp\left(-\frac{\Gamma}{\hbar} t\right) \cdot W_0(\vec{r}). \quad (48)$$

На данном этапе рассмотрения конкретная зависимость коэффициента поглощения вакуума от частоты несущественна. Необходимо отметить только то, что величина $\Gamma = \Gamma(\omega)$, является четной функцией

ей частоты ω (т. е. $\Gamma(\omega) = \Gamma(-\omega)$) в силу того, что любые диссипативные процессы являются необратимыми.

Очевидно, что для пространственной плотности электромагнитной энергии выполняется соотношение Планка

$$\int W_0(\vec{r}) dV = m_{\text{photon}}(\omega) c^2 = \hbar \omega. \quad (49)$$

Подставляя (48) в (47), получаем:

$$j(x) = i\kappa e \int f(t') \cdot \Upsilon(\vec{r}') \times \exp\left(-\frac{\Gamma}{\hbar}(t-t')\right) W_0(\vec{r}-\vec{r}') dV' dt'. \quad (50)$$

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

$$f(t) = \exp(-i(\omega - i\gamma)t), \quad (51)$$

где²

$$\gamma = \frac{\Gamma}{2\hbar}. \quad (52)$$

В результате плотность тока поляризации вакуума принимает вид:

$$j(x) = i\kappa e \times \int e^{-i(\omega - i\gamma)t'} \cdot \Upsilon(\vec{r}') \cdot e^{-2\gamma(t-t')} \cdot W_0(\vec{r}-\vec{r}') dV' dt'. \quad (53)$$

Выполняя в (53) интегрирование по t' , получаем:

$$\int_{-\infty}^t \exp(-i(\omega - i\gamma)t' - 2\gamma(t-t')) dt' = i \cdot \frac{\exp(-i(\omega - i\gamma)t)}{\omega + i\gamma}, \quad (54)$$

и мы приходим к следующему выражению для плотности вакуумного тока:

$$j(x) = -\kappa c \cdot \frac{\exp(-i(\omega - i\gamma)t)}{\omega + i\gamma} \times \int \Upsilon(\vec{r}') \cdot W_0(\vec{r}-\vec{r}') dV'. \quad (55)$$

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

² Строго говоря, вместо (51) 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.

$$W_0(\vec{r}) \approx W_{00} \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}') = \hbar\omega \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}'), \quad (56)$$

и выражение для плотности тока поляризации вакуума упрощается:

$$j(x) = -\kappa\hbar\omega c \cdot \frac{\exp(-i(\omega - i\gamma)t)}{\omega + i\gamma} \Upsilon(\vec{r}). \quad (57)$$

Построим уравнение для структурной функции фотона, исходя из уравнения (14). Для этого перепишем (14) в следующем виде

$$\left[\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right] \cdot f(t) \cdot \Upsilon(\vec{r}) = \frac{4\pi}{c} j(x), \quad (58)$$

и подставим выражение (57) в уравнение (58):

$$\begin{aligned} & \left[\frac{-(\omega - i\gamma)^2}{c^2} - \nabla^2 \right] \cdot e^{-i(\omega - i\gamma)t} \cdot \Upsilon(\vec{r}) = \\ & = -4\pi\kappa\hbar \frac{\omega}{\omega + i\gamma} \Upsilon(\vec{r}) \cdot e^{-i(\omega - i\gamma)t}. \end{aligned} \quad (59)$$

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

$$\nabla^2 \Upsilon(\vec{r}) = \left[\frac{(\omega - i\gamma)^2}{c^2} - 4\pi\kappa\hbar \frac{\omega}{\omega + i\gamma} \right] \Upsilon(\vec{r}). \quad (60)$$

В системе покоя фотона его структурная функция обладает сферической симметрией. В силу этого уравнение (60) превращается в обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) \Upsilon(r) + k^2(\omega) \Upsilon(r) = 0, \quad (61)$$

где

$$k^2(\omega) = \frac{(\omega - i\gamma)^2}{c^2} - 4\pi\kappa\hbar \frac{\omega}{\omega + i\gamma}, \quad (62)$$

решение которого имеет вид:

$$\Upsilon(r) = \Upsilon_0(k) \frac{\exp(ikr)}{r}. \quad (63)$$

Таким образом, структурная функция фотона представляет собой сферическую волну. Другими словами, электрический заряд фотона (бегущая константа связи в электродинамике) в среднем равен нулю, а в каждый момент времени отличен от нуля, но очень сильно экранирован. А 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 (63) переходит в известный закон Кулона. Из выражения (64) 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 (49). Для этого используем тот факт, что

$$\begin{aligned} \nabla \Upsilon(r) &= \Upsilon_0 \vec{e}_r \frac{\partial}{\partial r} \frac{\exp(ikr)}{r} = \\ &= \Upsilon_0 \vec{e}_r \left[ik \frac{\exp(-kr)}{r} - \frac{\exp(-kr)}{r^2} \right], \end{aligned} \quad (64)$$

откуда следует, что

$$W_0(\vec{r}) = \frac{\Upsilon_0^2}{8\pi} \left[ik \frac{\exp(ikr)}{r} - \frac{\exp(ikr)}{r^2} \right]^2, \quad (65)$$

и вытекает уравнение на Υ_0^2 :

$$\int \frac{\Upsilon_0^2}{8\pi} \left[ik \frac{\exp(ikr)}{r} - \frac{\exp(ikr)}{r^2} \right]^2 dV = \hbar\omega. \quad (66)$$

Выполняя в (66) интегрирование по угловым переменным, получаем:

$$\frac{\Upsilon_0^2 k}{2} \int_{k_0}^{\infty} \left| i \frac{\exp(ir)}{r} - \frac{\exp(ir)}{r^2} \right|^2 r^2 dr = \hbar\omega, \quad (67)$$

где r_0 - параметр обрезания. Введем функцию обрезания Λ с помощью соотношения:

$$\Lambda(kr_0) = \int_{k_0}^{\infty} \left| i \frac{\exp(ir)}{r} + \frac{\exp(ir)}{r^2} \right|^2 r^2 dr. \quad (68)$$

Из формулы (68) следует, что

$$\frac{\Upsilon_0^2 k}{2} \Lambda(kr_0) = \hbar\omega, \quad (69)$$

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

$$\hbar = \frac{\Upsilon_0^2}{2c} \Lambda(kr_0). \quad (70)$$

Если учесть, что обрезание производится на нижнем пределе, и вместо интегральной экспоненты необходимо использовать ее асимптотику в нуле, то мы получаем

$$\Lambda(kr_0) \xrightarrow[kr_0 \rightarrow 0]{} (kr_0)^{-1}, \quad (71)$$

откуда видно, что постоянная Планка действительно характеризует свойства электромагнитного волнового пакета, называемого фотоном. Она равна

$$\hbar \approx \frac{\Upsilon_0^2}{2ckr_0}. \quad (72)$$

Поскольку по своему физическому смыслу радиус обрезания $r_0 = const$, мы можем найти зависи-

мость $\Upsilon_0 = \Upsilon_0(k)$. Высокая точность, с которой постоянная Планка действительно является фундаментальной физической константой, позволяет найти величину Υ_0 :

$$\Upsilon_0(k) = \sqrt{2ckr_0\hbar}. \quad (73)$$

Из формулы (73) 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 бесконечное число фотонов, 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 (66) мы сталкиваемся со стандартной для практически всех версий теории поля (как классической, так и квантовой) – расходимостью интеграла (68) на нижнем пределе. Для того чтобы устранить эту расходимость, мы ввели в соотношение (68) 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):

$$r_0 = \frac{e^2}{2mc^2} \sim R_e. \quad (74)$$

При таком выборе параметра обрезания мы приходим к соотношению:

$$\Upsilon_0(\omega) = |e| \cdot \sqrt{\frac{\hbar\omega}{mc^2}}, \quad (75)$$

физический смысл которого абсолютно прозрачен. Из (75) следует, что амплитуда структурной функции фотона пропорциональна модулю заряду 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 «самопоглощения» и «самопреломления» электромагнитной волны в нулевом порядке теории возмущений описываются приведенными выше диаграммами 1-5.

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 виртуальной или реальной частицы, рождающейся из вакуума³.

Из вышесказанного следует, что физической причиной обрезания интеграла полной 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 (68) связана с тем, что при высоких энергиях фотон уже нельзя описывать одним нелинейным волновым уравнением (14). 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

³ Указанное условие строго выполняется только на пороге реакции распада фотона. Во всех остальных случаях имеет место закон сохранения мгновенного заряда.

результате флуктуаций физического вакуума, которые приводят к появлению нарастающих во времени решений уравнения (35):

$$A_{rest}^0(x) = f(t) \cdot Y(\vec{r}) = \exp(-i(\omega + i\gamma)t) Y(\vec{r}). \quad (80)$$

Не исключено, что области пространства, генерирующие подобные «саморазгоняющиеся» фотоны, представляют собой скопления «темной материи».

Дисперсионные соотношения для физического вакуума

Исследуем зависимость показателя преломления и коэффициента поглощения физического вакуума от частоты в системе покоя фотона. Для этого воспользуемся соотношением (62), согласно которому

$$k(\omega) = \sqrt{\frac{(\omega - i\gamma)^2}{c^2} - 4\pi\kappa\hbar \frac{\omega}{\omega + i\gamma}}. \quad (81)$$

Введем обозначение $\xi^2 = 2\pi\kappa\hbar > 0$. Тогда в соответствии с (81)

$$\begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} k(\omega) &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \sqrt{\frac{(\omega - i\gamma)^2}{c^2} - 4\pi\kappa\hbar} = \\ &= \sqrt{-\frac{4\pi\kappa\hbar e}{c}} = \sqrt{-2 \cdot e \cdot \xi^2} \neq 0. \end{aligned} \quad (82)$$

Из соотношения (82) следует, что фотон, даже при нулевой частоте ($\omega = 0$) имеет волновое число, отличное от нуля ($k(0) \neq 0$). Это эффект обусловлен тем, что флуктуации электромагнитного поля взаимодействуют сами с собой. С физической точки зрения описанный 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 (26) в этой системе отсчета лишено какого-либо физического смысла. Тем не менее, анализ выражения (81) 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:

$$n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega) = \frac{c^2}{2\omega} \frac{d}{d\omega} k^2(\omega). \quad (84)$$

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

Из формулы (81) вытекает, что

$$\frac{dk^2(\omega)}{d\omega} = \frac{1}{c^2} \frac{d}{d\omega} \left[(\omega - i\gamma)^2 + 2e\xi^2 \cdot \frac{\omega}{\omega + i\gamma} \right], \quad (85)$$

и в результате получаем:

$$\begin{aligned} n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega) &= \\ &= \frac{1}{2\omega} \frac{d}{d\omega} \left[(\omega - i\gamma)^2 - 2\xi^2 \cdot \frac{\omega}{\omega + i\gamma} \right], \end{aligned} \quad (86)$$

откуда следует, что

$$\begin{aligned} n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega) &= \frac{1}{2\omega} \times \\ &\times \left[2(\omega - i\gamma)(1 - i\gamma') - 2\xi^2 \frac{(\omega + i\gamma) - \omega(1 + i\gamma')}{(\omega + i\gamma)^2} \right]. \end{aligned} \quad (87)$$

Представим соотношение (87) в виде:

$$\begin{aligned} n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega) &= (1 - i\gamma\omega^{-1})(1 - i\gamma') - \\ &- \xi^2 \frac{(\omega + i\gamma) - \omega(1 + i\gamma')}{\omega(\omega + i\gamma)^2}, \end{aligned} \quad (88)$$

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

$$\gamma(\omega) = a\omega^2 + \sigma\omega^4 + \dots \quad (89)$$

В формуле (89) отсутствует нулевой член разложения, поскольку, фотон, обладающий нулевой энергией, не может ее терять. В силу этого условие

$$\gamma(\omega = 0) = 0, \quad (90)$$

является строгим.

Величина коэффициентов ряда (89) 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 (особенно, нерелятивистская квантовая механика) 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 (см. формулу (67)).

В силу указанных причин в рамках настоящей работы мы ограничимся двумя первыми членами разложения (89).

Покажем, что в коэффициент a формуле (89) строго равен нулю. Для этого заметим, что при $\sigma = 0$

$$n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega) = (1 - i\gamma\omega^{-1})(1 - i\gamma') - \xi^2 \frac{i\gamma - i\gamma'}{\omega(\omega + i\gamma)^2} \approx 1 + i \frac{ae\xi^2}{\omega} \quad (91)$$

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

$$\kappa_r(\omega = 0) = 0. \quad (92)$$

Из соотношений (91) и (92) следует, что $a = 0$. Таким образом, для вычисления зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения физического вакуума в пределе низких частот следует использовать приближение:

$$\gamma(\omega) = \sigma\omega^4. \quad (93)$$

Соотношение (93) 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 (93) в (88) и получим:

$$n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega) = 1 + 3ie\xi^2\sigma\omega. \quad (94)$$

Очевидно, что соотношение (94) удовлетворяет условию:

$$\begin{cases} n_r(\omega = 0) = 1, \\ \kappa_r(\omega = 0) = 0. \end{cases} \quad (95)$$

Особо подчеркнем, что входящие в выражение (95) 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 (84).

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]:

$$\text{Re}[n(\omega) - n(0)] = P \int_0^\infty \frac{2\omega'^2 \text{Im}(n(\omega'))}{\pi\omega'((\omega')^2 - \omega^2)} d\omega', \quad (96)$$

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 (89). По способу своего построения оно справедливо только в приближении низких частот, поскольку с ростом энергии фотона открываются все новые и новые каналы его распада в физическом вакууме (рождение векторных мезонов с квантовыми числами фотона и их дальнейший распад в адроны, рождение протонов, нейтронов и всех остальных видов материи). В соответствии с вышесказанным очевидно, что выражение (89) в пределе высоких частот следует скорректировать. В нем появятся следующие члены разложения показателя преломления и коэффициента поглощения в ряд Тейлора по степеням частоты ω . Именно благодаря вкладу этих слагаемых время жизни фотона в системе покоя стремительно уменьшается с ростом его частоты.

Из (94) 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 во всех частотных диапазонах.

В заключение добавим, что для того, чтобы определить значения параметров теории κ , ν 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. В работе 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.
 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 статический электрический заряд сохраняется только в пределе низких частот (энергий).
 7. Показано, что закон сохранения мгновенного электрического заряды 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 сохранения. Таким образом, в области сверхвысоких энергий в некотором смысле нарушается закон сохранения электрического заряда.
8. Продемонстрировано, что асимметрия распространения вещества и антивещества во Вселенной связана с тем, что в выражение для тензора поляризации физического вакуума электрический заряд виртуальных частиц входит в нечетной степени.
 9. Предложен универсальный механизм генерации вещества во Вселенной, и образования «моря Дирака».
 10. 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.
 11. Интересно отдельно исследовать процесс спонтанной генерации материи во Вселенной, обусловленный нестабильностью электромагнитного вакуума, и определить порог, при котором вакуумные флуктуации приводят к появлению нарастающих во времени решений уравнения (35).
 12. Представляет несомненный интерес рассчитать присутствующие в теории параметры в рамках квантовой электродинамики.

Благодарности

Выражаю глубокую благодарность В.А. Сойферу за неизменную моральную и организационную поддержку, Н.Л. Казанскому за административную поддержку, Л.Г. Сапогину за плодотворнейшие дискуссии и за первоначальный толчок, стимулировавший появление на свет этой работы (в первую очередь, за обсуждение пионерских работ [7, 8], без ко-

торых данная статья никогда бы не появилась на свет), А.М. Зубрилину за финансовую поддержку, В.А. Джанибекову за неоценимую организационную помощь, Ф.А. Гарееву за ценные советы, В.А. Гурашвили за помощь в проведении исследований, Ю.В. Попову за помощь в подборе библиографического списка, В.И. Фурману за многочисленные подсказки и Лауреату Нобелевской премии профессору Мюррею Гелл-Манну, после продолжительного разговора с которым я приступил к интенсивной работе над выкладками и текстом.

Особую благодарность выражаю моей жене Е.В. Ратис и сыну Г.Ю. Ратису за безграничное терпение.

Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля, Курс теоретической физики. - М.: Наука, 1973. - Т. 2. - 504 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая электродинамика, Курс теоретической физики. - М.: Наука, 1989. - Т.4. - 728 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред, Курс теоретической физики. - М.: Наука, 1992 - Т.8. - 664 с.
4. Бьёркен Дж.Д., Дрелл С.Д., Релятивистская квантовая теория, т.1. Релятивистская квантовая механика, М.: Наука, 1978, 296 с.
5. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействия высокоэнергетических частиц с атомными ядрами. - М.: Атомиздат (1972) - 648 с.
6. Гольдберггер М., Ватсон К. Теория столкновений -М.: Мир (1967) - 825 с.
7. Sapogin L.G. On Unitary Quantum Mechanics, Nuovo Cimento, vol. 53A, No2, p.251,1979
8. Sapogin L.G., Ryabov Yu.A., Boychenko V.A. Unitary Quantum Mechanics and a New Source of Energy, Moscow, Izvestia, 278p, 2005
9. Эрикссон Т., Вайзе В. Пионы и ядра - М.: Наука (1991) 512 с.
10. Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М., Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике. - М.: Наука (1971) 544 с.
11. Гареев Ф.А., Ратис Ю.Л. Ядерная Физика, **59**, №6 (1996). - С. 1005.
12. Ратис Ю.Л. Естествознание. Экономика. Управление. Межвузовский сборник научных работ, посвященный памяти Александра Ивановича Федосов, вып.7, т.1. Актуальные проблемы современного естествознания. - Самара, СГАУ-ИСОИ, 2006. - С.49-66.

DISPERSION AND ELECTROMAGNETIC ABSORPTION IN THE PHYSICAL VACUUM

Yu.L. Ratis¹

¹Samara State Aerospace University (SSAU), Samara, Russia,

²Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara, Russia

Abstract:

This paper clarifies the definition of Einstein's special principle of relativity. The mechanism of photon formation is determined. It is shown that the quantization of the electromagnetic field is derived from interaction of the polarized vacuum with the polarizing electromagnetic wave.

Keywords: Einstein's special principle of relativity, photon formation mechanism, polarizing electromagnetic wave

Citation: Ratis YuL. Dispersion and electromagnetic absorption in the physical vacuum [In Russian]. Computer Optics 2007; 31(3): 93-104.

Acknowledgements: The author is deeply indebted to V.A. Soifer for his moral and organizational support; to N.L. Kazanskiy – for his administrative support; to L.G. Sapogin – for his useful discussions and efforts in pushing this paper (first of all, for his deep communication referring pioneer papers [7, 8] that this paper would never appear without); to A.M. Zabrilin – for his financial support; to V.A. Dzhanibekov – for his invaluable organization assistance; to F.A. Gareev – for his valuable advices; to V.A. Gurashvili – for his assistance in conducting research; to Yu.V. Popov- for his help in selection of references; to V.I. Furman – for his numerous guiding suggestions and to Professor Murrey Gell-Mann, a Nobel Prize winner, whose follow-up conversation helped the author to intensively commence working at this subject. The author is especially thankful to his wife E.V. Ratis and his son G.Yu. Ratis G. Yu. for their infinite patience.

References:

- [1] Landau LD, Lifshits EM. Course of Theoretical Physics. The Classical Theory of Fields [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher 1973; 2: 504 p.
- [2] Landau LD, Lifshits EM. Course of Theoretical Physics. The Quantum Electrodynamics [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher 1989; 4: 728 p.
- [3] Landau LD, Lifshits EM. Course of Theoretical Physics. Electrodynamics of Continuous Media [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher 1992; 8: 664 p.
- [4] Bjorken JD, Drell SD. Relativistic Quantum Theory. Relativistic Quantum Mechanics [Russian translation]. Moscow: "Nauka" Publisher 1978; 1: 296 p.
- [5] Barashenkov VS, Toneev VD. Interaction of high energy particles and nuclei with atomic nuclei [In Russian]. Moscow: Atomizdat, 1972; 648 p.
- [6] Goldberger M, Watson K. Collision Theory [Russian translation]. Moscow: "Mir" Publisher, 1967; 825 p.
- [7] Sapogin LG. On Unitary Quantum Mechanics, Nuovo Cimento 1979; 53A(2): 251.
- [8] Sapogin LG, Ryabov YuA, Boychenko VA. Unitary Quantum Mechanics and a New Source of Energy. Moscow, Izvestia, 2005; 278 p.
- [9] Ericson T, Weise W. Pions and Nuclei [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher, 1991; 512 p.
- [10] Baz AI, Zeldovich YaB, Perelomov AM. Scattering, reactions and decompositions in nonrelativistic quantum mechanics [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher, 1971; 544 p.
- [11] Gareev FA, Ratis YuL. Nuclear Physics [In Russian]. Physics of Atomic Nuclei 1996; 59(6): 1005.
- [12] Ratis YuL. Natural Sciences. Economics. Management [In Russian]. Interuniversity Proceedings Dedicated to the Memory of Alexander I. Fedosov. Actual Problems of Modern Natural Sciences 2006; 7(1): 49-66.