

Родионов А.И. Фотон – это квант или объект? / А.И. Родионов, В.Ф. Ким // Вестник СГГА. (Физика) - Новосибирск: Изд-во СГГА, - 2003. - Выпуск 8. - С. 211-216.

УДК 530.145

Родионов А.И., Ким В.Ф.

СГГА-НГТУ, Новосибирск

ФОТОН – ЭТО КВАНТ ИЛИ ОБЪЕКТ?

Обсуждается понятие “фотон” с позиций эксперимента, а так же теории первичного и вторичного квантования электромагнитного поля, теории когерентных состояний. Рассматривается вопрос о соответствии квантовой механики фотона классическому описанию поля излучения. Уравнения Максвелла для поля излучения представляются в квантовой форме, подобной уравнениям Шредингера – Дирака - Вейля, но для частицы нулевой массы, единичным спином, правой и левой поляризациями. В координатном представлении приводится система уравнений, определяющая волновую функцию фотона и устанавливающая соответствие с полями \vec{E} и \vec{B} .

фотон, квант поля излучения, естественная ширина спектра, уравнения Максвелла, векторы Крамерса, операторы спина и импульса, круговая поляризация, когерентные состояния

ВВЕДЕНИЕ

Время от времени в науке возникает такая ситуация, когда по ряду внутренних или внешних причин начинают вновь обсуждаться, казалось бы, хорошо сложившиеся и установившиеся понятия. В данной работе мы попытаемся обсудить то, что понимается под словом “фотон” и поставить вопрос: **“фотон это квант или объект?”**.

Что же заставляет это сделать? - Те недоговоренности и противоречия, которые имеют место у разных авторов, пишущих на эту тему. Так, например, Физическая энциклопедия (т.5) [1] определяет фотон как “элементарную частицу - квант электромагнитного поля”. Как элементарная частица трактуется “фотон” в [2]. В справочнике концепций “Кванты” [3] о фотоне говорится уже так: “...пучок света частоты ω с энергией $n\hbar\omega$ можно считать состоящим из n световых корпускул. Эти кванты возбуждения, или **гипотетические** корпускулы, и называются фотонами”, и так далее. Не правда ли интересно?

1. Взгляд со стороны Его Величества Эксперимента

Исторически **квант излучения** был назван **фотоном** в 1926 году в работе [4]. Для того, чтобы понять, что такое “фотон” кратко вспомним, что об этом говорит Его Величество Эксперимент? А он говорит следующее: есть фотоэффект и комптон - эффект, есть образование и аннигиляция пар и так далее. Однако для обсуждения данного вопроса наиважнейшим является то, что **каждый химический элемент обладает характерными спектрами излучения и поглощения**. Эта особенность не ограничивается областью только атомных спек-

тров, но распространяется на молекулы и ядра. Все эти системы испускают и поглощают электромагнитное излучение совершенно определенных частот, которые заключены в пределы от радиочастот до рентгеновских или γ -лучей (для ядер). Уровни энергии в атомах, молекулах и ядрах таковы, что их разности соответствуют частотам, на которых системы резонируют. Таким образом, **разности уровней энергии являются резонансами**. Однако **линии** в спектрах поглощения и испускания атома и других систем **имеют конечную ширину**. **Естественная ширина $\Delta\omega$** спектральной линии атома связана со средним временем жизни τ возбужденного состояния формулой

$$\Delta\omega = 1/\tau \quad (1)$$

При этом неопределенность ΔE в энергии уровня равна

$$\Delta E = \hbar/\tau \quad (2)$$

Таким образом, излучаемый или поглощаемый объект, который отождествляется с фотоном, **представляет собой волновой пакет**, что отнюдь не есть квант как монохромата. Так, например, известно, что перо зеленого лука как источник поштучных фотонов излучает последние за $\tau \sim 0.1$ нс. Пространственный размер образования под названием “луковый фотон” имеет протяженность порядка 3-х метров. За последние 40 лет в ведущих физических лабораториях мира была проведена серия определяющих экспериментов по квантовой природе света. Были получены, например, фемтосекундный световой импульс длиной порядка $5 \cdot 10^{-4}$ мм, “замороженный” в веществе пикосекундный световой импульс. А Хенбери, Браун и Твис показали, что фотоны как Бозе-объекты в обычном пучке света с малой спектральной шириной имеют отчетливую тенденцию входить в детектор коррелированными парами. Создание источников когерентного света в тот же период позволили уменьшить на несколько порядков спектральную ширину и пространственную расходимость. Все это позволило почти в любой области спектра электромагнитных волн создавать и детектировать когерентные поля, регистрируя отдельные фотоны этих полей. Это привело нас к мысли о том, что отдельный **фотон, который может быть создан и зарегистрирован как устойчивый “солитон подобный” волновой пакет, является “многоквантовым” объектом**. А его энергия и, например, импульс определяются формулами

$$E_\phi = \hbar \sum \omega_i, \quad \vec{p}_\phi = \hbar \sum \vec{k}_i \quad (3)$$

Где суммирование производится по всему спектру, определяющему пакет. Все это указывает на необходимость различать понятия “квант” как порция энергии, импульса и т.д. и “фотон” как объект Реальности. Это подводит нас к мысли о том, что **фотон следует рассматривать, в отличие от электрона и т.п., скорее не как элементарную частицу, а как квазичастицу вакуума по аналогии с фононами в твердом теле**. Заметим, что фактически эти мысли находят подтверждение в ряде работ по теории первичного и вторичного квантования электромагнитного поля и в теории когерентных состояний.

2. Взгляд со стороны Ее Величества Теории

А что говорит о фотоне Ее Величество Теория? Кратко обсудим два традиционных подхода к квантованию электромагнитного поля: первичное и вторичное квантование. По-видимому, первым, кто обратил внимание на тот факт, что уравнения Максвелла являются не только релятивистскими, но и по форме квантовыми, был Archibald W.J. [5]. Он заметил, что уравнения Максвелла для вакуума можно записать в виде уравнения Шредингера для двух трехкомпонентных Ψ - функций. Независимо от [5] один из нас повторил этот результат в более общей форме в [6].

Действительно, согласно [7], для электромагнитного поля в свободном пространстве можно записать уравнения Максвелла в форме уравнений Дирака-Вейля [7]

$$\begin{cases} c(\hat{\sigma} \cdot \hat{p})\vec{F} = i\hbar \frac{\partial \vec{F}}{\partial t} \\ c(\hat{\sigma} \cdot \hat{p})\vec{G} = -i\hbar \frac{\partial \vec{G}}{\partial t}, \end{cases} \quad \begin{cases} (\hat{p} \cdot \vec{F}) = 0 \\ (\hat{p} \cdot \vec{G}) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

Здесь \vec{F} и \vec{G} - векторы Крамерса [7, 10]:

$$\begin{cases} \vec{F} = \vec{E} + i \cdot \vec{H} \\ \vec{G} = \vec{E} - i \cdot \vec{H}, \end{cases} \quad (4)$$

$\hat{\sigma}$ и $\hat{p} = -i\hbar\nabla$ - операторы спина S , равного 1, и импульса [7].

По форме уравнение для \vec{F} аналогично уравнению для компонент волновой функции фотона со спиральностью $\nu = 1$ (правая поляризация), а уравнение для \vec{G} аналогично уравнению для компонент волновой функции фотона со спиральностью $\nu = -1$ (левая поляризация) [10]. Это говорит о возможности рассмотреть вопрос о волновой функции фотона с позиции, отличной от общепринятых. Таких позиции две. Так, согласно [8,9], волновая функция в X - Представлении **не существует**, а может быть введена только в K - Представлении. Однако здесь следует заметить, что в работе [8] речь идет о **квантах** электромагнитного поля, а не о **фотонах**, как их понимаем мы. И, поэтому, противоречия здесь нет. Монография [10] говорит опять же о фотонах как квантах. А для кванта волновой функции в X - Представлении просто нет. Об уравнении движения фотона и его волновой функции Р. Фейнман пишет в [11] на с.499 так: “Фотонное уравнение попросту совпадает с уравнениями Максвелла, а **волновая функция - с векторным потенциалом \vec{A}** ”. Не правда ли, не менее интересно, чем при обсуждении результатов экспериментов!

Возникает вопрос, а возможно ли построить волновую функцию отдельного фотона в X - Представлении и связать ее с полями \vec{F} и \vec{G} , исходя из наших взглядов? Согласно [10] для описания вектора состояния фотона в координатном представлении требуется введение 6-и компонентной функции:

$$\Psi(x) = \begin{pmatrix} \alpha(S)\tilde{\Psi}^R(x) \\ \beta(S)\tilde{\Psi}^L(x) \end{pmatrix}, x = (\vec{x}, t), \quad (5)$$

Где $\tilde{\Psi}^R(x), \tilde{\Psi}^L(x)$ - трехкомпонентные Ψ -функции, удовлетворяющие с учетом условий поперечности

$$\begin{cases} (\hat{p} \cdot \tilde{\Psi}^R(x)) = 0 \\ (\hat{p} \cdot \tilde{\Psi}^L(x)) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

уравнениям

$$\begin{cases} c(\hat{\sigma} \cdot \hat{p})\tilde{\Psi}^R = i\hbar \frac{\partial \tilde{\Psi}^R}{\partial t} \\ c(\hat{\sigma} \cdot \hat{p})\tilde{\Psi}^L - i\hbar \frac{\partial \tilde{\Psi}^L}{\partial t}, \end{cases} \quad (7)$$

Формальное сходство этих уравнений с уравнениями Максвелла (3) подтверждается введением эрмитовых операторов [10]:

$$\hat{E}(x) = (i/\sqrt{V}) \sum_{\chi} \sum_S \sqrt{\hbar\omega/2} (\hat{\sigma}(S) \hat{a}(\chi, S) \exp(-i\chi x) - \hat{\sigma}^*(S) \hat{a}^*(\chi, S) \exp(i\chi x)) \quad (8)$$

$$[\nabla \times \hat{H}(x)] = (i/\sqrt{V}) \sum_{\chi} \sum_S \sqrt{\hbar\omega/2} (\hat{\sigma}(S) \hat{a}(\chi, S) \exp(-i\chi x) + \hat{\sigma}^*(S) \hat{a}^*(\chi, S) \exp(i\chi x)), \quad (9)$$

где $\chi x = \omega t - (\vec{k} \cdot \vec{x})$.

Это дает выражение для энергии электромагнитного поля

$$\sum_{\chi} \sum_S \hbar\omega \hat{a} \hat{a}_b = (1/2) \int_V (\vec{E}^2 + \vec{B}^2 + (i/\sqrt{-\nabla^2}) [\hat{E}[\nabla \hat{B}] - [\nabla \hat{B}]\hat{E}]) dV \quad (10)$$

Без учета операторной природы векторов \vec{E} и \vec{H} член в квадратных скобках обращается в нуль, и устанавливается требуемое соответствие с классическими полями. Введение этого члена жизненно необходимо, так как он точно компенсирует “нулевую” энергию вакуума:

$$\langle 0 | (1/2) \int_V (\vec{E}^2 + \vec{B}^2) dV | 0 \rangle = (\hbar/2) \sum_{\kappa} \omega \quad (11)$$

Кратко обсудим теперь так называемые **когерентные состояния** электромагнитного поля [12, 13]. Это набор чистых состояний поля, для которых все корреляционные функции факторизуются и которым отвечают **локальные волновые пакеты** как в X , так и в K -Представлениях [12]. Заметим, что неопределенности этих сопряженных переменных минимизированы в соответствии с [12]

$$(\Delta p)(\Delta q) = \hbar^2 / 4 \quad (12)$$

Чтобы найти явные выражения когерентных состояний, операторы и с-значения электромагнитного поля представляются в виде

$$\begin{aligned} \hat{E}^{(+)}(\vec{x}, t) &= i \sum_k \sqrt{\hbar\omega_k/2} \hat{a}_k u_k(\vec{x}) \exp(-i\omega_k t) \\ \vec{E}(\vec{x}, t) &= i \sum_k \sqrt{\hbar\omega_k/2} \alpha_k u_k(\vec{x}) \exp(-i\omega_k t) \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда вектор когерентного состояния $|\alpha\rangle$ удовлетворяющий уравнению

$$\hat{a}_k |\alpha\rangle = \alpha_k |\alpha\rangle \quad (14)$$

примет вид [12,13]:

$$|\alpha\rangle = \exp(|\alpha|^2/2) \sum_0^{\infty} (\alpha^n / \sqrt{n!}) |n\rangle \quad (15)$$

Заметим, что в классическом пределе только **когерентное состояние** $|\alpha\rangle$ соответствует **классической волне** [13], фаза которой равна фазе величины α , а амплитуда электрического поля связана с $|\alpha|$ соотношением [13]:

$$A_0 = (1/\omega)(\hbar\omega/2\varepsilon_0V)^{1/2} |\alpha| \quad (16)$$

Подведем итоги. Все вышесказанное заставляет сделать вывод о том, что, по-видимому, отдельный **фотон как объект** можно описать в случае малой естественной ширины спектра как **многоквантовое когерентное состояние**. При достаточно большом $\Delta\omega$, по-видимому, необходимо введение матрицы плотности, но это уже предмет другой статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физическая энциклопедия. Т.5 / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Большая Российская Энциклопедия. - 1996. – 760 с.
2. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия. – 1963. – 927с.
3. Эткинс П. Кванты. Справочник концепций. – М.: Мир. – 1977. - 496с.
4. Levis G.N. Nature – 1926. -118, p.674
5. Archibald W.J. Field equations from particle equations. // Canadian Journ. Phys., Halifax. –1955. - V.33. - P. 565 - 574.
6. Родионов А.И. Фотон и классическое электромагнитное поле. // Материалы докл. науч.-тех. конф. ФТФ. 21-22 апреля 1974г.- Новосибирск, 1974. - С.93-97.
7. Родионов А.И., Ким В.Ф. Уравнения Максвелла в различных представлениях и их решения // Вестник СГГА. – Новосибирск. – 2002. – С.12–17.
8. Ландау Л.Д., Пайерлс Р. Квантовая электродинамика в конфигурационном пространстве // Собр. трудов.: В 2Т.-М.: Наука, 1969.-Т.1.-С.32-46.
9. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. – М: Наука, 1969. - 624с.
10. Кемпфер Ф. Основные положения квантовой механики. – М.: Мир, 1967. – 391с.
11. Фейнмановские лекции по физике: В 9 т./ Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс.М... М.: Мир, 1967 -Т.9: Квантовая механика. Ч2.- 259с.
12. Глаубер Р. Когерентность и детектирование квантов // Сб. статей: Новости фундаментальной физики.: Когерентное состояние в квантовой теории. – М.: Мир, 1972. - Вып. 1– С.26-70.
13. Лоудон Р. Квантовая теория света. – М.: Мир, 1976. – 488 с.