# Моделирование волновой функции фотона в координатном представлении в электрическом дипольном приближении

***Девалют Дмитрий Алексеевич***
***Давыдов Александр Петрович***
*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова*
*Давыдов Александр Петрович, к.ф.-м.н.*
dimadevalyut@mail.ru

В настоящее время проводятся опыты с однофотонной интерференцией по схемам, эквивалентным опыту Юнга, например с интерферометром Маха-Цендера. При анализе этих опытов используется терминология, выражающая метафизическое утверждение, будто на делителях фотон «как бы расщепляется» на две части и, затем, интерферирует сам с собой. На квантовом языке однофотонная интерференция в литературе объясняется с помощью постулируемых амплитуд вероятностей, использующих понятие оператора напряженности электрического поля. Однако, очевидно, можно утверждать, что излучение фотона отдельным атомом нельзя описывать напряженностью поля, так как энергия кванта излучения $\hbar\omega$ не распределяется непрерывно по всему пространству. Поэтому излучение фотона атомом на самом деле представляет собой как бы распределенную в пространстве и во времени *волновую функцию фотона (ВФФ) в координатном представлении* [1-4], которая и определяет вероятность его обнаружения в любой точке пространства. Тем не менее, волновая функция является математическим, а не физическим объектом, поэтому ее «как бы» излучение, распространение, интерференция, коллапс и т. п. должны рассматриваться условно, подразумевая, что волновая функция (ВФ) определенным образом лишь *отображает* некие реальные соответствующие процессы, происходящие в физическом вакууме. Однако пока суть этих процессов не будет установлена, объяснение интерференционных явлений с помощью ВФФ, по нашему мнению, дает наглядное «метафизическое» представление о наблюдаемых явлениях и значительно ослабляет проблему корпускулярно-волновых свойств света и «микрочастиц», поскольку в таком случае все явления могут рассматриваться на одной основе – с помощью ВФ в координатном представлении. Цель статьи – проиллюстрировать возможность объяснения опыта Юнга с помощью ВФФ, построенной в рамках квантовой механики, исходя из напряженностей электромагнитного поля, излучаемого атомом в дипольном приближении классической электродинамики.

Пусть классический электрический диполь совершает гармонические колебания вдоль оси $z$ с частотой $\omega_0 = k_0 c$, излучая в волновую зону электромагнитное поле, напряженности которого (в системе СГС) равны

$$E_r = E_\varphi = 0\,, \quad E_\theta = A\sin\theta_r \cos(\omega_0 t - k_0 r)/r\,, \quad H_r = E_\theta = 0\,, \quad H_\varphi = A\sin\theta_r \cos(\omega_0 t - k_0 r)/r\,. \tag{1}$$

Согласно [1], используя (1) и переходя от сферической системы координат к декартовой, составляем вектор

$$\xi = \begin{pmatrix} \xi_x \\ \xi_y \\ \xi_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x + H_x \\ E_y + H_y \\ E_z + H_z \end{pmatrix} = A\,\frac{\sin\theta_r \cos(\omega_0 t - k_0 r)}{r} \begin{pmatrix} \cos\theta_r \cos\varphi_r - i\sin\varphi_r \\ \cos\theta_r \sin\varphi_r + i\cos\varphi_r \\ -\sin\theta_r \end{pmatrix} \tag{2}$$

и подставляем его в формулу для коэффициентов разложения ( $\mathrm{e}_{\pm1}(\mathbf{k})$ – комплексные векторы поляризации [1])

$$b(\mathbf{k}, \pm1) \equiv \frac{1}{8\pi^2\sqrt{\hbar k c}} \int d^3\mathbf{r} \left[\mathrm{e}_{\pm1}(\mathbf{k})\right]^+ e^{-i(\mathbf{kr} \mp k c t)} \xi(\mathbf{r}, t) \tag{3}$$

волновой функции фотона («волнового пакета») в координатном представлении произвольного состояния

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \int \frac{b(\mathbf{k}, +1)}{(2\pi)^{3/2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \mathrm{e}_{+1}(\mathbf{k}) e^{i(\mathbf{kr} - k c t)}\, d^3\mathbf{k} + \int \frac{\left[b(-\mathbf{k}, -1)\right]^*}{(2\pi)^{3/2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \mathrm{e}_{-1}(\mathbf{k}) e^{i(\mathbf{kr} - k c t)}\, d^3\mathbf{k}\,. \tag{4}$$

Поскольку формулы (1) имеют место лишь для волновой зоны, интегралы в (4) расходятся. Поэтому под знак интегралов приходится вводить обрезающие множители $\exp(-\varepsilon r)$ и после их взятия устремлять $\varepsilon$ к нулю. В результате, в важном случае $ak_0 >> 1$ и $|z| << a$, применимом в частности, к объяснению опыта Юнга, где $a = \sqrt{x^2 + y^2}$, в предположении $z/a \cong z/r = \cos\theta_r$, из (4) получается [5] приближенная формула для ВФФ:

$$\Psi^{(+)}(\mathbf{r}, t) = \frac{A e^{-ik_0 ct}}{4a\sqrt{\pi\hbar k_0 c}} \left[ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i\cos(ak_0) \\ \sin(ak_0)\cos\theta_r \\ -i\sin(ak_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i\cos(ak_0) \\ -\sin(ak_0)\cos\theta_r \\ -i\sin(ak_0) \end{pmatrix} \right]. \tag{5}$$

Из общих физических соображений, с учетом (1) и выражения для плотности энергии электромагнитного поля классической электродинамике, в формуле (5) величину $a$ следует заменить на $r$, принимая во внимание, что формула (5) получена в нулевом приближении. Возникающее при этом выражение почти совпадает по структуре с ВФФ, полученной в [5], исходя из других соображений и для другого вида моделирования. Тогда волновая функция фотона, проходящего «через оба отверстия» в первом экране опыта Юнга принимает вид

$$\Psi(\mathbf{r},t) = \Psi_1(\mathbf{r},t) + \Psi_2(\mathbf{r},t) = \frac{Be^{-ik_0ct}}{r_1}\left[\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}-i\cos(r_1k_0)\\ \sin(r_1k_0)\cos\theta_{r1}\\ -i\sin(r_1k_0)\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}-i\cos(r_1k_0)\\ -\sin(r_1k_0)\cos\theta_{r1}\\ -i\sin(r_1k_0)\end{pmatrix}\right] +$$

$$+\frac{Be^{-ik_0ct}}{r_2}\left[\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}-i\cos(r_2k_0)\\ \sin(r_2k_0)\cos\theta_{r2}\\ -i\sin(r_2k_0)\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}-i\cos(r_2k_0)\\ -\sin(r_2k_0)\cos\theta_{r2}\\ -i\sin(r_2k_0)\end{pmatrix}\right] \equiv \Psi_1\left(\mathbf{r_1}+\frac{\mathbf{d}}{2},t\right)+\Psi_2\left(\mathbf{r_2}-\frac{\mathbf{d}}{2},t\right), \quad (6)$$

где $B$ включает все константы, вектор $\mathbf{d}$ соединяет отверстия; $r_1$, $r_2$ – расстояния от отверстий до точки наблюдения P, находящейся на втором экране (отстоящем от первого на расстоянии $\ell$). Записав плотность вероятности обнаружения фотона [1] как $\Psi^+(\mathbf{r},t)\Psi(\mathbf{r},t)$, получаем в ней интерференционный член, который после преобразований и пренебрежения слагаемым, включающим произведение $\cos\theta_{r1}\cos\theta_{r2}$, сводится к виду

$$\rho_{\text{int}} = \frac{4B^2}{r_1r_2}\left[\sin(k_0r_1)\sin(k_0r_2) + \cos(k_0r_1)\cos(k_0r_2)\right] = \frac{4B^2}{r_1r_2}\cos\left[k_0(r_2-r_1)\right] = \frac{4B^2}{r_1r_2}\cos\delta, \quad (7)$$

где предполагается, что $r_1 + r_2 \approx 2\ell$, $r_2 - r_1 = \Delta$, где $\Delta$ – оптическая разность хода лучей, исходящих из обоих отверстий, $\delta = 2\pi\Delta/\lambda_0$ – их разность фаз с точки зрения классической электродинамики, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$.

*Таким образом, ВВФ в координатном представлении, объясняет волновые явления на равноправной основе для всех квантовых частиц и фотонов*, испускаемых в эксперименте заведомо поодиночке.

Список публикаций:
[1] *Давыдов А. П. Волновая функция фотона в координатном представлении: монография. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. 2015. 180 с.*
[2] *Davydov A. P., Zlydneva T. P. // 2018 14th International scientific-technical conf. APEIE – 44894 proceedings: Novosibirsk. 2018. V. 1. Part. 4. P. 58-69.*
[3] *Davydov A. P., Zlydneva T. P. // Proc. of the IV Int. research conf. "Information technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine" (ITSMSSM 2017). 2017. P. 257-265.*
[4] *Давыдов А. П., Злыднева Т. П. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23 (8). С. 27-38.*
[5] *Давыдов А. П., Злыднева Т. П. // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: сб. науч. ст. II Всерос. науч. конф. Тольятти: Издатель Качалин А. В., 2019. Часть 1. С. 136-144.*

# Расчет энтропии кротовой норы Дамура-Солодухина

***Киреева Гульдар Милхатовна***
***Каримов Рамис Халилович***
*Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы*
*Измаилов Рамиль Наилевич, к.ф.-м.н.*
kireevaguldar11@gmail.com

На сегодняшний день интересным исследованием в физике является исследование квантовых процессов проходящих в компактных астрофизических объектах. Одним из таких возможных процессов является энтропия. В работе будет рассчитана энтропия кротовой норы Дамура-Солодухина [1], используя термодинамические законы механики компактных астрофизических объектов.

Энтропию черных дыр впервые рассматривали Хокинг и Беккенштейн [2,3], где они вывели соотношение между энергией $E$ и энтропией $S$, которое имеет вид:

$$dE = T_H dS, \quad (1)$$

где $T_H$ – температура Хокинга.