

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ФОТОНА

Давыдов А.П.¹, Злыднева Т.П.² Email: Davydov1795@scientifictext.ru

¹Давыдов Александр Петрович – кандидат физико-математических наук, доцент;

²Злыднева Татьяна Павловна – кандидат педагогических наук, доцент,
кафедра прикладной математики и информатики,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск

Аннотация: анализируется физическая природа фотона с точки зрения квантовой механики. Обосновывается, что понятие элементарной частицы не применимо по отношению к фотону, так же, как и понятие некоего кванта электромагнитной волны, занимающего определенную часть пространственно-временного континуума. Утверждается, что фотон, в рамках корпускулярно-волнового дуализма, проявляет себя как квазичастица – результат распространения в физическом вакууме спиновой квантово-механической волны, характеристики которой должны рассматриваться на планковских расстояниях и временах. Взаимодействие этой волны с веществом, однако, вполне можно описывать с помощью волновой функции фотона в координатном представлении, что в значительной степени устраняет проблему корпускулярно-волнового дуализма фотонов и электромагнитных волн.

Ключевые слова: квантовая механика, волновая функция, координатное представление, спин, планковские параметры, корпускулярно-волновой дуализм, физический вакуум, квазичастица.

PHYSICAL NATURE OF PHOTON

Davydov A.P.¹, Zlydneva T.P.²

¹Davydov Alexandr Petrovich – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor;

²Zlydneva Tatiana Pavlovna – PhD in Pedagogy, Associate Professor,

DEPARTMENT OF APPLIED MATHEMATICS AND INFORMATICS,

NOSOV MAGNITOGORSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY, MAGNITOGORSK

Abstract: the physical nature of the photon is analyzed from the point of view of quantum mechanics. It is substantiated that the concept of an elementary particle is not applicable with respect to a photon, as well as the concept of a quantum of an electromagnetic wave occupying a certain part of the space-time continuum. It is claimed that the photon, within the framework of wave-particle duality, manifests itself as a result of the propagation in the physical vacuum of a spin quantum-mechanical wave whose characteristics should be considered at Planck distances and times. The interaction of this wave with matter, however, can be described with the help of the photon wave function in the coordinate representation, which largely eliminates the problem of the wave-particle duality of photons and electromagnetic waves.

Keywords: quantum mechanics, wave function, coordinate representation, spin, Planck parameters, corpuscular-wave duality, physical vacuum, quasiparticle.

УДК 530.145

В настоящее время интерференционные оптические явления теоретически описываются либо с точки зрения классической электродинамики, либо на языке вторичного квантования. «Первичное квантование» поведения фотона попало под запрет с момента появления работы [1], в которой отрицалась принципиальная возможность построения волновой функции фотона в координатном представлении. Однако в середине 90-х годов предыдущего столетия начали появляться работы [2] – [4], в которых при интерпретации волновой функции фотона был смещен акцент с плотности вероятности локализации фотона на плотность вероятности его обнаружения в некоторой пространственной точке. Очевидно, потребность построения волновой функции фотона в координатном представлении вновь становится актуальной в связи с появлением принципиально новых экспериментов и чисто практических запросов, например, при проверке неравенств Белла и квантовой нелокальности, в квантовой криптографии и вычислениях. Эти эксперименты, в частности, стимулировали разработку источников и детекторов одиночных фотонов. В [6] – [13] и других работах одночастичная волновая функция фотона получила дальнейшее развитие в теоретическом обосновании.

В [14] – [20] для ее наглядной иллюстрации проведено моделирование свободного распространения в пространстве волнового пакета, описывающего однофотонное состояние, соответствующее лазерному излучению длительностью 80 фс с центральной длиной волны 10 мкм, с гауссовским распределением по импульсам (фотона), представленным в этом пакете. В результате моделирования установлен характер расплывания волнового пакета: его пространственная форма из первоначальной «шарообразной» формы эволюционирует в некую «конусообразную», напоминая картину излучения Вавилова-Черенкова,

поскольку периферические части плотности вероятности пакета отстают от центральной части, перемещающейся со скоростью света c в вакууме.

Хотя о свете как о *потоке фотонов* достаточно много известно, в ракурсе *корпускулярно-волнового дуализма* самого света и *материальных* частиц, имеющих массу «покоя», до сих пор, однако, остаются не ясными ответы на главные вопросы: *что такое фотон, и существует ли он как материальная частица?* Если существует, но не как *самостоятельная материальная частица*, то что нас тогда подталкивает создавать образ о фотоне как о *материальной* частице, распространяющейся по законам квантовой механики, практически совпадающим в отношении фотона с законами классической электродинамики? Насколько правомерно ставить вопрос, в связи с этим, о построении для фотона *квантово-механической волновой функции в координатном представлении?*

Подчеркнем, что на эти вопросы требуется ответить отнюдь не в рамках *философского* аспекта корпускулярно-волнового дуализма, а сосредоточить усилия на том, чтобы, прояснив картину с *физической* точки зрения, можно было бы констатировать, что этот «*дуализм*», по сути, *вообще устранен из науки*.

Сформулируем ряд утверждений, в которых, на наш взгляд, либо уже содержатся удовлетворительные, на данном этапе, ответы на большую часть поставленных вопросов, либо заключены просматриваемые предпосылки ответов на оставшуюся часть из них.

Эти утверждения заключаются в следующем:

1) Электромагнитные волны и, в частности, свет – это поток «последовательно» (в квантово-механическом смысле) распространяющихся в пространстве и во времени отдельных чередующихся друг за другом кратковременных (длительностью порядка планковского времени) актов *переворота* (на 180°) и *возвращения* в исходное состояние *спина экстремальных максимумов* (ЭМ-I) или «*антимаксимонов*» I класса, образующих попарно (ЭМ-I + ЭАМ-I) при полном их слиянии одну из возможных безмассовых, незаряженных, бесспиновых структурных «единиц» *физического вакуума* (которая, однако, «сама по себе», обладает по порядку величины планковским магнитным моментом) [21] – [28]. Каждый регистрируемый *в отдельности* фотон является, таким образом, *не* материальной самостоятельно существующей *до регистрации* «безмассовой» частицей, а своеобразным «магноном», распространяющимся в вакууме (до регистрации) только по *одной* возбужденной цепочке указанных переворотов спина в виде бегущей волны наподобие спиновой волны в твердом теле. *Регистрация* фотона является результатом *передачи* определенного количества динамических характеристик (энергии, импульса и момента импульса) «массивным» частицам от *одной* такой spin-flip-цепочки. Вероятность ее возбуждения (воспринимаемого как «излучение фотона»), ориентация ее в пространстве («направление движения фотона») и передача динамических характеристик этого возбуждения материальным частицам («поглощение фотона») определяются физикой еще не исследованных процессов на планковских расстояниях.

2) Для практических целей рассмотрение большинства процессов, связанных со spin-flip-цепочками, условно можно заменить рассмотрением процессов, как бы осуществляемых «точечными» фотонами – *якобы* материальными, но безмассовыми частицами. При этом излучение, распространение, рассеяние и поглощение фотонов должно описываться квантово-механическими законами, часть из которых (уравнения Максвелла) совпадает с уравнениями классической электродинамики, а другая часть (уравнение типа Шредингера) связана с чисто квантово-механическим описанием, *атрибутом которого должна быть также и волновая функция фотона в координатном представлении*. В «промежутке» между рассмотрением spin-flip-цепочки и практическим использованием эквивалентного ей в указанном смысле «материального» фотона следует все же считать, что последний должен иметь *конечный*, а не бесконечно малый радиус, равный радиусу экстремального максимума I класса [17, 26, 27].

На рис. 1 для иллюстрации изображен некоторый участок одной и той же spin-flip-цепочки в последовательные моменты времени t , $t+T_P$, $t+2T_P$, $t+3T_P$ и т. д. (где $T_P = \sqrt{\hbar G/c^5} = 5,391 \cdot 10^{-44}$ с – планковское время), вдоль которой происходит распространение одного «фотона», представляющее собой на самом деле процесс переворотов спина одной из двух вакуумных частиц, ЭМ-I или ЭАМ-I. В каждый из этих моментов времени спины обеих вакуумных частиц ЭМ-I и ЭАМ-I совпадают, что и дает значение максимальной проекции спина фотона равной \hbar .

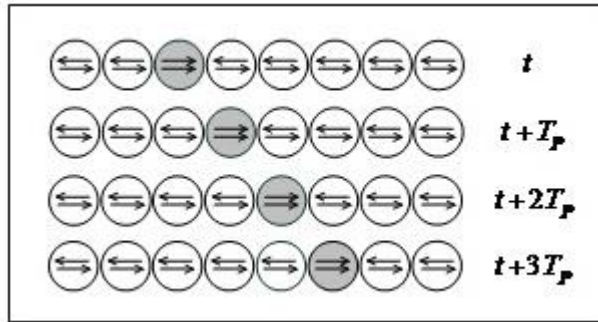


Рис. 1. Участок spin-flip-цепочки (в последовательные моменты времени), возникающей в физическом вакууме при распространении фотона

Длительность же самого процесса очередного переворота спина, конечно, не может быть рассмотрена в рамках квазиклассического подхода, и, скорее всего, постановка вопроса об ее определении не вполне некорректна. В рамках данного подхода можно лишь утверждать, что планковское время T_p равно средней продолжительности возбужденного состояния структурной «единицы» вакуума, в котором направления спинов ее составляющих (ЭМ-I и ЭАМ-I) удерживаются параллельно друг другу.

Таким образом, «заполненные» кружки на рис. 1 схематично изображают spin-flip-возбужденные структурные «единицы» вакуума, время возбуждения которых $\tau \sim T_p$. Местоположение такой возбужденной «единицы» в некий момент t , по сути, совпадает с «точкой» обнаружения «фотона» при его взаимодействии с другими частицами (в частности, внутри детекторов фотонов).

Фотон, таким образом, можно упрощенно трактовать как квазичастицу, распространяющуюся в физическом вакууме подобно магнону в твердом теле. В пределах применимости геометрической оптики это распространение происходит вдоль прямолинейного луча света, который наиболее полно соответствует утверждению о возбуждении одной spin-flip-цепочки, отвечающей траектории движения одного фотона, хотя, конечно, в одном луче могут распространяться достаточно большое число практически невзаимодействующих между собой фотонов. Их взаимодействие начнет проявляться в виде известных в оптике нелинейных эффектов, если объемная плотность фотонов станет достаточно велика, так что виртуальные перевороты спина вакуумных частиц (ЭМ-I или ЭАМ-I, у которых спин $s = 1/2$), эффективно создающие в «обычных условиях» спиральность фотона $\lambda = \pm 1$, также начнут влиять друг на друга. Точность же обнаружения фотонов в пространстве, в самом общем случае, должна удовлетворять общим положениям квантовой механики, в частности соотношениям неопределенностей Гейзенберга и соотношениям неопределенностей для энергии и времени [29] – [34].

Что касается того, почему именно экстремальные максимоны I класса (ЭМ-I) и экстремальные «антимаксимоны» I класса (ЭАМ-I) должны выступать в роли вакуумных частиц, у которых переворачивается спин на планковское по порядку время (в одном акте переворота спина), то их выбор обоснован тем, что именно эти частицы претендуют на роль «затравочных» частиц в центре, соответственно, электрона и позитрона [17, 27]. Между тем, именно последние, согласно представлениям квантовой электродинамики виртуально «образуются из фотона» вблизи материальных частиц. В отсутствие же таковых, виртуальное образование (возбуждение) электрон-позитронной пары сводится только к перевороту спина одной из вакуумных частиц (ЭМ-I или ЭАМ-I) без их «заметного» пространственного разделения. Через планковское время это возбуждение снимается, но передается далее по spin-flip цепочке. Механизм этой передачи, очевидно, определяется сложнейшим характером взаимодействий на планковских расстояниях, и, скорее всего, не может быть выяснен на основе простых квазиклассических представлений. Поэтому процесс распространения фотона, соответствующий распространению спиновой волны в физическом вакууме, на данном этапе как раз только и должен описываться, по сути, феноменологической квантовой механикой. Но для этого нам и требуется волновая функция фотона.

Заключение. Результаты моделирования [14] – [20] позволяют проиллюстрировать возможность одночастичного подхода к описанию электромагнитных явлений. В частности, явления интерференции и дифракции, такие как в картине опыта Юнга, которые всегда описывались на языке классической электродинамики, очевидно, могут быть также описаны на языке квантовой механики без вторичного квантования электромагнитного поля. Это существенно расширяет область применения «обычной» квантовой механики и значительно снижает проблему корпускулярно-волнового дуализма на современном уровне знаний. Хотя, по нашему мнению, фотон является квазичастицей, а свет представляет собой результат распространения «spin-flip» волны в физическом вакууме, структура и природа которого должна рассматриваться на планковских расстояниях. Возможно, это обстоятельство

позволит взглянуть с новой точки зрения на такие проблемы как квантовая запутанность частиц и нелокальность их взаимодействий.

Список литературы / References

1. *Landau L., Peierls R.* Quantenelectrodynamik im Konfigurationsraum // *Zeit. F. Phys.*, 1930. V. 62. Pp. 188 - 198.
2. *Mandel M., Wolf E.* Optical coherence and quantum optics. Cambridge University Press, 1995.
3. *Sipe J.E.* Photon wave functions // *Physical Review A.*, 1995. V. 52. Pp. 1875 - 1883.
4. *Давыдов А.П.* Квантовая механика фотона // НАУКА И ШКОЛА: тезисы докладов XXXIII науч. конф. препод. МГПИ / под ред. доц. З. М. Уметбаева. Магнитогорск: Изд-во МГПИ, 1995. С. 206 - 207.
5. *Bialynicki-Birula I.* Photon Wave Function // *Progress in Optics*, edited by E. Wolf (North-Holland, Elsevier, Amsterdam, 1996). Vol. XXXVI. Pp. 248 - 294.
6. *Давыдов А.П.* Волновая функция фотона в координатном представлении // *Вестник МаГУ: Периодический научный журнал*. Вып. 5. Естественные науки. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та, 2004. С. 235 - 243.
7. *Saari P.* Photon localization revisited // *Quantum Optics and Laser Experiments*, Edited by S.Lyagushyn, S., InTech, Open Access Publisher, Croatia. Pp. 49 - 66, 2012.
8. *Давыдов А.П.* Квантовая механика фотона: волновая функция в координатном представлении // *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2015. Т. 20. № 5. С. 43 - 61.
9. *Давыдов А.П.* О релятивистской инвариантности уравнения непрерывности в квантовой механике фотона / А.П. Давыдов, Т.П. Злыднева // *Международный научно-исследовательский журнал*, 2016. № 4 (46). Часть 6. С. 134-137. doi: 10.18454/IRJ.2016.46.145.
10. *Давыдов А.П.* О волновой функции фотона в координатном и импульсном представлениях / А.П. Давыдов, Т.П. Злыднева // *Международный научно-исследовательский журнал*, 2016. № 11 (53). Часть 4. С. 152-155. doi: 10.18454/IRJ.2016.53.104.
11. *Давыдов А.П.* Линеаризация волновых уравнений для потенциалов свободного электромагнитного поля с целью его квантовомеханического описания / А.П. Давыдов // *Проблемы физ.-мат. образования в педагогич. вузах России на соврем. этапе: тез. докл. межвуз. науч.-практич. конф. / Магнитогорский гос. пед. ин-т. Магнитогорск: МГПИ, 1996. С. 116-120.*
12. *Давыдов А.П.* О волновой функции фотона в координатном представлении в терминах электромагнитных потенциалов // *Современные проблемы науки и образования: материалы I внутривузовской научной конференции преподавателей МаГУ. Магнитогорск: МаГУ, 2012. С. 228–229.*
13. *Давыдов А.П.* Выбор комплексных потенциалов электромагнитного поля при моделировании эволюции однофотонного волнового пакета // *Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине : сб. науч. трудов III Межд. конф. «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине».* Часть I. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 25-27.
14. *Давыдов А.П.* Эволюция в пространстве и во времени волнового пакета фотона фемтосекундного излучения с точки зрения квантовой механики // *Современные проблемы науки и образования: тез. докл. XLIII внутривуз. науч. конф. преподавателей МаГУ. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та, 2005. С. 269-270.*
15. *Давыдов А.П., Злыднева Т.П.* Однофотонный подход к моделированию короткоимпульсного лазерного излучения // *Вестник науки и образования Севера-Запада России: электронный журнал*, вып. 1, № 4, 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vestnik-nauki.ru/> (дата обращения: 07.04.2017).
16. *Davydov A., Zlydneva T.* Modeling of short-pulse laser radiation in terms of photon wave function in coordinate representation [Electronic resource] / A. Davydov, T. Zlydneva // *Instrumentation engineering, electronics and telecommunications – 2015: Paper book of the International Forum IEET-2015.* P. 51-63. Izhevsk: Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2016. 208 p. 7 MB. URL: <http://pribor21.istu.ru/proceedings/IEET-2015.pdf/> (date of accessed: 30.10.2016).
17. *Давыдов А.П.* Волновая функция фотона в координатном представлении: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 180 с.
18. *Давыдов А.П.* О снижении скорости свободных фотонов при моделировании их распространения в пространстве с помощью волновой функции в координатном представлении / А.П. Давыдов, Т.П. Злыднева // *Труды XIII междунар. научно-технической конф. АПЭП-2016. Том 8. Новосибирск, 2016. С. 50 - 57.*
19. *Davydov A.P.* On the reduction of free photons speed in modeling of their propagation in space by the wave function in coordinate representation / A.P. Davydov, T.P. Zlydneva // 2016 13th International scientific-

- technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 39281 proceedings. V. 1. Novosibirsk, 2016. P. 233 - 240.
20. *Davydov A.P., Zlydneva T.P.* The Young's interference experiment in the light of the single-photon modeling of the laser radiation [Electronic resource] // Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016). 2016. P. 208-215. URL: <http://www.atlantispress.com/php/pub.php?publication=itsmssm-16> (accessed: 30.10.2016).
 21. *Давыдов А.П.* Новая классическая интерпретация спина электрона и его энергия связи // Наука - вуз - школа: Тезисы докладов XXXI науч. конф. препод. МГПИ / Магнитогорск. пед. инт; Под ред. доц. З.М. Уметбаева. Магнитогорск: Изд-во МГПИ, 1993. С. 308-311.
 22. *Давыдов А.П.* Гипотеза черной дыры в центре электрона и неинвариантность электрического заряда (при его вращении) как следствие КЭД, ОТО, СТО // Проблемы физ.-мат. образования в пед. вузах России на соврем. этапе: Тез. докл. межвуз. науч. конф. 19-21 марта 1996. Магнитогорск: Изд-во МГПИ, 1996. С. 120 - 126.
 23. *Давыдов А.П.* Новые квантовые объекты космофизики – элементарные бессингулярные черные дыры – как следствие КЭД и ОТО // Фундаментальные и прикладные исследования: сб. науч. труд. Магнитогорск: Изд-во МГПИ, 1997. С. 22-41.
 24. *Давыдов А.П.* Квазиклассический подход к проблеме структуры лептонов // Современные проблемы науки и образования: Сб. тез. докл. науч. конф. Магнитогорск: МГМИ, 1997. С. 137.
 25. *Давыдов А.П.* Возможность квантовых бессингулярных черных дыр с планковскими параметрами и экстремальной метрикой в физике и космологии // Электромагнитные волны и электронные системы. 1998. Т. 3, № 2. С. 67-78.
 26. *Давыдов А.П.* Фотон как квазичастица при возбуждении спиновой волны в физическом вакууме на планковских расстояниях // Современные проблемы науки и образования: тез. докл. XLIV внутривуз. науч. конф. преподавателей МаГУ. Магнитогорск: МаГУ, 2006. С. 174.
 27. *Давыдов А.П.* Экстремальные максимоны, структура фундаментальных частиц, КЭД, ОТО и РТГ А.А. Логунова // Электромагнитные волны и электронные системы. 2001. Т. 6. № 5. С. 4-13.
 28. *Давыдов А.П.* О построении специальной теории относительности (СТО) из симметрии пространства и времени без постулатов СТО // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т. 8. № 1. С. 49 - 58.
 29. *Давыдов А.П.* Строгое доказательство соотношения неопределенностей для энергии и времени в духе доказательства соотношений неопределенностей Гейзенберга // Современные проблемы науки и образования: Матер. докл. XLVII внутривуз. науч. конф. преподавателей МаГУ. Магнитогорск: МаГУ, 2009. С. 338 - 340.
 30. *Давыдов А.П.* Общее доказательство соотношения неопределенностей для энергии и времени в дисперсионной трактовке в квазиклассическом и квантовом случаях // Современные проблемы науки и образования: Матер. докл. XLVIII внутривуз. науч. конф. препод. МаГУ. Магнитогорск: МаГУ, 2010. С. 323 - 325.
 31. *Давыдов А.П.* Дисперсионная интерпретация соотношения неопределенностей для энергии и времени и короткоимпульсное лазерное излучение в квазиклассическом подходе // Инновации в науке / Сб. ст. по материалам XXXII междунар. науч.-практ. конф. № 4 (29). Новосибирск: Изд. «СибАК», 2014. С. 6-14.
 32. *Давыдов А.П.* О дисперсионной трактовке соотношений неопределенностей для энергии и времени в квантовой механике // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Т. 2. Материалы IX Международного симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. М.: РАН, 2014. С. 17 - 24.
 33. *Давыдов А.П.* Оператор энергии и соотношение неопределенностей для энергии и времени в квантовой механике // Инновации в науке / Сб. ст. по материалам XLIII междунар. науч.-практ. конф. № 3 (40). Новосибирск: Изд. «СибАК», 2015. С. 7 - 19.
 34. *Давыдов А.П.* О соотношении неопределенностей для энергии и времени для однофотонных состояний с гауссовским импульсным распределением // Инновации в науке / Сб. ст. по материалам LV междунар. науч.-практ. конф. № 3 (52). Новосибирск: Изд. «СибАК», 2016. С. 115-123.