

ФОТОН КАК КВАЗИЧАСТИЦА ФИЗИЧЕСКОГО ВАКУУМА

Давыдов А.П.¹, Злыднева Т.П.² Email: Davydov1797@scientifictext.ru

¹Давыдов Александр Петрович – кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра прикладной и теоретической физики;

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

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

Аннотация: обосновывается физическая природа фотона в рамках квантовой механики. Утверждается, что фотон не является элементарной (или фундаментальной) частицей, а по сути представляет собой квазичастицу – результат распространения в физическом вакууме спиновой квантово-механической волны, которую необходимо рассматривать на планковских расстояниях и временах. Взаимодействие этой волны с веществом, тем не менее, формально можно описывать посредством волновой функции фотона в координатном представлении. Такой подход в значительной мере проясняет корпускулярно-волновой дуализм 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 Alexander Petrovich – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,
DEPARTMENT OF APPLIED AND THEORETICAL PHYSICS;

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 substantiated within the framework of quantum mechanics. It is asserted that a photon is not an elementary (or fundamental) particle, but in essence it is a quasiparticle - the result of the propagation in a physical vacuum of a spin quantum-mechanical wave that must be considered at Planck distances and times. The interaction of this wave with matter, however, can be formally described by means of the wave function of the photon in the coordinate representation. Such approach largely clarifies 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

Изучение физической природы фотона в последнее время становится все более актуальной, в связи с появлением новых экспериментов по проверке неравенств Белла, конструированием запутанных состояний двух или нескольких фотонов, разработкой квантовых каналов связи в области квантовой криптографии и некоторых других направлений, рассматриваемых в перспективе, таких как квантовые компьютеры.

Относительно недавно в одной из экспериментальных работ [1] было заявлено, что фотон будто бы проявляет одновременно и корпускулярные, и волновые свойства. Как нам представляется, результаты этого эксперимента требует более тщательного анализа, и их интерпретация не может означать сформулированного утверждения авторов об одновременном проявлении упомянутых взаимоисключающих свойств фотонов. Присоединяясь к справедливой критике такой интерпретации авторов, высказанной в некоторых отзывах на данную работу, мы со своей стороны кратко изложим свой взгляд на корпускулярно-волновой аспект фотонов и электромагнитного излучения вообще.

Причина «загадочных» корпускулярно-волновых свойств фотонов в первую очередь проистекает не из-за того, что квантовым частицам присущи как корпускулярные, так и волновые свойства, а вследствие того, что фотон, во-первых, вовсе не является квантовой частицей, а во-вторых, если даже условно его и считать некой элементарной (или фундаментальной) частицей, то в таком случае для него до сих пор не получила широкого признания и применения волновая функция в координатном представлении.

Эта функция для фотона была изначально запрещена в [2], что, в конечном счете, связано с нулевой массой фотона. Однако в 90-х годах 20 века стали появляться работы [3] – [6], «реанимирующие» идеи о возможности построения волновой функции фотона в координатном представлении. Очевидно, с появлением источников и приемников одиночных фотонов эти идеи начали постепенно «материализовываться». В [7] – [14] и ряде других работ теория одночастичной волновой функции фотона получила дальнейшее развитие.

Для иллюстрации волновой функции фотона, в [15] – [22] осуществлялось моделирование распространения свободного фотона, описываемого пространственным волновым пакетом, соответствующим однофотонному состоянию в составе лазерного излучения фемтосекундного диапазона с гауссовским импульсным распределением. Проведенное моделирование дало наглядное представление об эволюции в пространстве и во времени данного волнового пакета, главной чертой которого является его специфическое расплывание, сопровождающееся отставанием движения (вперед) периферических частей, по сравнению с его центральной частью, движущейся со скоростью c . Важную роль в практических оценках некоторых параметров, характеризующих волновую функцию фотона в виде волнового пакета, нормированного на единичную вероятность обнаружения фотона во всем пространстве, при осуществлении указанного моделирования, сыграли соотношения неопределенностей для энергии и времени, получившие так называемую «дисперсионную» интерпретацию [23] – [30].

Трудности в построении волновой функции фотона всегда ранее проистекали вследствие того, что фотон нельзя *локализовать*. Однако идеи обычной для квантовой механики интерпретации волновой функции, квадрат модуля которой характеризует плотность вероятности *обнаружить* частицу в окрестности заданной точки пространства, в литературе широко распространены и по отношению к фотону, хотя и без строгого обоснования.

По-видимому, первоначально на эту тему высказался Эйнштейн еще в 1924 г. ([31], с. 160): «Нельзя ли явления дифракции и интерференции включить в квантовую теорию таким образом, чтобы полевые понятия теории выражали лишь взаимодействие между квантами, причем поля уже не приписывались бы самостоятельная физическая реальность». Заменив в этой фразе «*взаимодействие между квантами*» на «*компоненты волновой функции фотонов*», сейчас на этот вопрос в принципе можно ответить утвердительно, если использовать понятие *волновой функции фотона в координатном представлении*.

В конце статьи [31] Эйнштейн, выражая свое сомнение относительно реальности (электромагнитного) волнового поля пишет: «Но даже если эта возможность созреет в подлинную теорию, мы не можем в теоретической физике обойтись без эфира, т. е. континуума, наделенного физическими свойствами, ибо общая теория относительности, основных идей которой физики, вероятно, будут придерживаться всегда, исключает непосредственное дальнее действие; каждая же теория ближнего действия предполагает наличие непрерывных полей, а, следовательно, существование «эфира» (*конец цитаты*).

Обсудим теперь вопрос, «материальны» ли фотоны и существует ли для них волновая функция, если «вдруг» они не «материальны». С одной стороны, конечно, фотоны должны быть материальны, так как, во-первых, по всем понятиям, они переносят энергию, импульс и момент импульса, осуществляя обменный механизм электромагнитных взаимодействий, и, во-вторых, фиксируются приборами и даже органами зрения практически поодиночке, в том числе в схемах совпадений, проявляя как будто при этом даже корпускулярные свойства. С другой стороны, у фотонов отсутствует масса «покоя», и, следовательно, нельзя убедиться в их реальности, локализовав один и тот же фотон в некоторой малой области, как, например, электрон в атоме или протон в ядре. Поэтому в обзоре [32] фотон и отнесен к «метафизической» категории как реально не существующий *самостоятельно* материальный объект. С этим, с третьей стороны, трудно согласиться, ибо фотоны, летящие с далеких звезд, живут миллиарды лет, неся информацию и фиксируясь в телескопах иногда *заведомо поодиночке*. Может ли «не существовать» фотон, *существующий* 13 – 14 миллиардов лет в течение жизни Мегалактики, пока он летит с ее «задворков» и, наконец, попадает к нам в телескоп, осуществляя *единственный отсчет за несколько часов наблюдений?* Философский ли это вопрос или все же физический, с четвертой стороны? Для нас должно быть очевидным, что это, прежде всего, важный чисто физический вопрос, связанный с изучением фундаментальных взаимодействий на планковских расстояниях с привлечением концепции *физического вакуума*.

Становится ясно, что, для того чтобы согласовать все противоречивые положения, упомянутые здесь относительно фотона, способа описания его распространения и взаимодействия с «материальными» *фундаментальными* частицами, на данном этапе наших знаний достаточно привлечь утверждения о фотоне как о «квазичастице», возникающей в результате *возбуждения* бегущей волны *переворотов* спина (вдоль одной, так сказать, spin-flip-цепочки) *некоторых вакуумных частиц*, – по нашим представлениям, *экстремальных максимонов* или *антимаксимонов I класса* (ЭМ-I или ЭАМ-I), *виртуально присутствующих в каждой точке* (с точностью до планковской длины) *физического вакуума* [33] – [35].

Действительно, поскольку фотон движется всегда со скоростью света, то его, разумеется, нельзя *локализовать* в пространстве, и, следовательно, для него в принципе не может существовать волновой функции, определяющей плотность вероятности *локализации* в пространстве. Так как у фотона, *к тому же*, нет массы «покоя», то его и нельзя считать *самостоятельно существующей* материальной частицей, в соответствии с [31]. Но фотоны, будучи испущенными источниками света, могут *неограниченно долго* пролетать сквозь *вакуум* и при взаимодействии с частицами вещества проявлять, тем не менее, *корпускулярные свойства*, например, при рассеянии в эффекте Комптона, передавая в *момент*

взаимодействия целиком всю свою энергию, импульс и момент импульса электрону (который, правда, затем сразу испускает другой фотон, согласно одному из возможных процессов и соответствующей диаграмме Фейнмана). Хорошо также известно, что поглощение света веществом происходит дискретными порциями перечисленных динамических характеристик, импульс и энергия из которых определяются соотношениями де Бройля. Особенно это очевидно из приведенного примера регистрации *заведомо поодиночке* отдельных фотонов с помощью телескопа, улавливающего излучение *чрезвычайно малой интенсивности* от далеких объектов Метагалактики. Следовательно, *в самый момент передачи* вся энергия, импульс и момент импульса «фотона» сосредоточены *в одной пространственной точке* – в той точке, в которой (с определенной вероятностью) в данный момент находится *частица вещества* (например, *физический электрон*), принимающая у «фотона» *все, что у него есть*. Однако, как мы выяснили, никакого *реального* фотона нет. Значит, все что есть, как будто, у «фотона», – на самом деле, это есть у *физического вакуума*. Но у вакуума *самого по себе* тоже ничего нет, кроме *энергии нулевых колебаний* и подобных ей характеристик, которые, в данном случае, не имеют значения (в том числе пока не обнаруженная «темная энергия»). Очевидно, перевороты спина структурных единиц физического вакуума, соответствующие распространению в пространстве одного фотона тесно связаны со строением фундаментальных частиц, в первую очередь электронов, на планковских расстояниях [36] – [42].

Заключение. Из всего сказанного выше можно сделать вывод, что физический вакуум выступает лишь в роли посредника, или *эфира* (в существовании которого, по своим соображениям, был уверен Эйнштейн, передающего возбуждение из одной точки, в которой происходит элементарный акт «излучения фотона», в другую точку, в которой происходит элементарный акт «поглощения фотона»). Если эти два элементарных акта достаточно далеко отделены друг от друга в пространстве и во времени, то, очевидно, передача возбуждения вакуума из начальной точки в конечную интуитивно может рассматриваться как распространение по законам квантовой механики безмассовой частицы – «фотона», в частности, возможно, по траекториям в духе *фейнмановских траекторий*. Точнее говоря, это распространение в принципе должно описываться волновой функцией в координатном представлении, определяющей плотность вероятности *не локализации* «фотона», а его *обнаружения*. Хотя такая волновая функция в литературе еще не общепризнанна, но «метафизическое» понятие о фотоне как о *реальной* частице прочно вошло в физику элементарных частиц (и физику вообще). Для полноты «комплекта», однако, как раз не хватает волновой функции фотона, с помощью которой можно было бы описать многие «чисто волновые» явления на более адекватном языке квантовой механики, который во многих случаях, впрочем, лишь не на много должен отличаться от языка классической электродинамики, в силу квантово-механического характера самих уравнений Максвелла.

Список литературы / References

1. *Piazza L., Lummen T.T.A., Quiñonez E., Murooka Y., Reed B.W., Barwick B. & Carbone F.* Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field. *Nature Communications* 6, Article number: 6407 (2015). doi:10.1038/ncomms7407.
2. *Landau L., Peierls R.* Quantenelectrodynamik im Konfigurationsraum // *Zeit. F. Phys.*, 1930. V. 62. Pp. 188-198.
3. *Mandel M., Wolf E.* Optical coherence and quantum optics. Cambridge University Press, 1995.
4. *Sipe J.E.* Photon wave functions // *Physical Review A.*, 1995. V. 52. Pp. 1875-1883.
5. *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.
6. *Bialynicki-Birula I.* Photon Wave Function // *Progress in Optics*, edited by E. Wolf (North-Holland, Elsevier, Amsterdam, 1996). Vol. XXXVI. Pp. 248-294.
7. *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.*
8. *Saari P.* Photon localization revisited // *Quantum Optics and Laser Experiments*, Edited by S. Lyagushyn S. In Tech, Open Access Publisher. Croatia. Pp. 49-66, 2012.
9. *Давыдов А.П.* Квантовая механика фотона: волновая функция в координатном представлении // *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2015. Т. 20. № 5. С. 43-61.
10. *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
11. *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

12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Давыдов А.П. Моделирование распространения в трехмерном пространстве волнового пакета фотона // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 73-й международной научно-технической конференции / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. Т.3. С. 133-137.
17. 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. URL: <http://vestnik-nauki.ru/>.
18. 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> (accessed: 30.10.2016).
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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). doi:10.2991/itsmssm-16.2016.100
23. 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.
24. 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.
25. Давыдов А.П. О соотношении неопределенностей для энергии и времени при квазиклассическом описании электромагнитного излучения / А.П. Давыдов // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Том 1. – Материалы VII Международного симпозиума. М.: РАН, 2012. С. 80-88.
26. 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.
27. 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.
28. *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.
 29. *Давыдов А.П.* Курс лекций по квантовой механике. Математический аппарат квантовой механики: учеб. пособие / А.П. Давыдов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 188 с.
 30. *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.
 31. *Эйнштейн А.* Об эфире // *Собрание научных трудов. Т. 2 / Под ред. И.Е. Тамма, Я.А. Смородинского, Б.Г. Кузнецова.* М.: Наука, 1966. 878 с.
 32. *Клышко Д.Н.* Квантовая оптика: квантовые, классические и метафизические аспекты // *УФН.* 1994. Т. 164, № 11. С. 1187-1215.
 33. *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.
 34. *Давыдов А.П.* Волновая функция фотона, вакуумные процессы на планковских расстояниях и современная квантовая механика // *Современные проблемы науки и образования: тез. докл. XLIV внутривуз. науч. конф. преподавателей МаГУ.* Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та, 2006. С. 175.
 35. *Давыдов А.П., Злыднева Т.П.* Физическая природа фотона // *Проблемы современной науки и образования.* 2017. № 13(95). С. 19-25. doi: 10.20861/2304-2338-2017-95-003
 36. *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.
 37. *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.
 38. *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.
 39. *Давыдов А.П.* Квазиклассический подход к проблеме структуры лептонов // *Современные проблемы науки и образования: Сб. тез. докл. науч. конф. Магнитогорск: МГМИ, 1997. С. 137.*
 40. *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.
 41. *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.
 42. *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.