

Об использовании системы отсчета для “точечной” модели фотона

Белинский А. В.^{1,a}, Шульман М. Х.^{2,b}

¹ Кафедра математического моделирования и информатики, Кафедра физики Земли, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия

² Кафедра времени как феномена расширения Вселенной, Институт исследований природы времени, Москва, 119991, Россия

Аннотация

Недавно в ряде публикаций нами был рассмотрен ряд феноменов, связанных с проблемами квантовой нелокальности. Было показано, что эти “загадочные” явления могут быть единообразно объяснены, если принять во внимание парадокс часов при распространении квантовых частиц. Действительно, известно, что для движущихся фотонов время как бы останавливается, а пройденное расстояние обращается в нуль. Более того, опираясь на волновые свойства материи, аналогичные представления удалось развить и для квантовых частиц, движущихся с досветовой скоростью. Как нами было установлено, некорректное понимание квантовой нелокальности основано на придании абсолютного характера наблюдению, выполняемому в лабораторной системе отсчета. Основываясь на относительности меры нелокальности в разных системах отсчета, мы в ходе нашего анализа использовали мысленную систему отсчета, связанную с упрощенной моделью “точечного” фотона, в которой игнорируется наличие спина и факт аксиальной симметрии при движении фотона. Такая модель вызвала настороженную реакцию у некоторых рецензентов, категорически отрицающих наличие системы отсчета, в которой фотон мог бы рассматриваться как покоящийся. В данной публикации нами проанализирована оригинальная работа Эйнштейна 1905 года, не учитывающая результатов квантовой электродинамики, а также проблемы, связанные с локализацией фотона. В результате показано, что использование упрощенной системы отсчета для точечного фотона не должно приводить к неверным физическим результатам, позволяя при этом эффективно объяснить различные аспекты квантовой нелокальности.

Ключевые слова: специальная теория относительности, квантовая механика, квантовая нелокальность, квантовая запутанность, коллапс волновой функции.

PACS numbers: 03.65.Ud, 42.65.Lm

On the use of the reference system for the “point” model of a photon

Belinsky A.^{1,a}, Shulman M.^{2,b}

¹ Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

² Institute for the Study of the Nature of Time, Moscow, 119991, Russia

Abstract

Alexander V. Belinsky and Michael H. Shulman

We recently considered a number of phenomena about quantum non-locality. We showed that these “mysterious” phenomena can be explained by the same manner if one applied the clock paradox to quantum particles propagation. Really, a duration of a moving photon travel and its travel distance become zero. The more, the wave properties of a massive particle predict the close issue. As we revealed, the incorrect understanding of quantum non-locality is based on the operation with the absolute laboratory reference frame. Contrary, we

^abelinsky@physics.msu.ru

^bshulman@dol.ru

consider a relative non-locality measure in the different reference frames that is associated with the simplified model of “pointed” where we ignored the spin existing and its motion axial symmetry photon. Such model initiated some rejections due to existing impossibility of any reference frame where a photon can be considered as immobile. In this paper we analyze the original Einstein work (1905) that did not account results of the quantum electrodynamics, and photon localization problems. Finally, we show that the simplified pointed photon model does not lead the incorrect physical issues.

Key words: special theory of relativity, quantum mechanics, quantum nonlocality, quantum entanglement, wave function collapse.

1 Введение

Можно ли связать систему отсчета с фотоном, движущимся со световой скоростью? Несмотря на ряд статей, опубликованных нами на эту тему (см., например, [1–5]), положительный ответ на поставленный вопрос часто вызывает несколько настороженную реакцию. Поэтому мы решили прояснить нашу позицию, чему и посвящена настоящая работа.

Как указано в [6], система отсчета есть воображаемое, лишенное массы, вообще говоря, произвольным образом деформирующееся тело отсчета, на котором проведена трехмерная координатная сетка, и в каждой точке тела отсчета есть прибор – часы, позволяющие фиксировать момент времени. Предполагается, что деформация тела отсчета происходит непрерывным образом, что события локализованы в одной точке и происходят мгновенно.

2 Релятивистские преобразования для точечной частицы в пространстве-времени

Достаточно полный анализ релятивистских преобразований для “точечных” объектов приведен в основополагающей публикации Альберта Эйнштейна [7], где ее автор определяет 4-мерные системы координат (отсчета) и правила преобразования от одной такой системы к другой. В этой работе содержатся две части. Первая часть посвящена кинематике и содержит пять разделов:

- § 1. Определение одновременности.
- § 2. Об относительности длин и промежутков времени.
- § 3. Теория преобразования координат и времени от покоящейся системы к системе равномерно и прямолинейно движущейся относительно первой.
- § 4. Физический смысл полученных уравнений для движущихся твердых тел и движущихся часов.
- § 5. Теорема сложения скоростей.

и в ней речь идет исключительно о пространственных и временных отрезках, при этом никаких логических противоречий даже для случая движения со скоростью света ($v = c$) не возникает. Во второй части, посвященной электродинамике, с разделами:

- § 6. Преобразование уравнений Максвелла – Герца для пустого пространства. О природе электродвижущих сил, возникающих при движении в магнитном поле.
- § 7. Теория аберрации и эффекта Доплера.
- § 8. Преобразование энергии лучей света. Теория давления, производимого светом на идеальное зеркало.
- § 9. Преобразование уравнений Максвелла – Герца с учетом конвекционных токов.
- § 10. Динамика (слабо ускоренного) электрона.

Эйнштейн отдельно рассматривает “световой комплекс” без массы покоя (фотон) в §8, а тело с массой покоя μ_0 (электрон) – в §10. В последнем случае он получает соотношения для продольной и поперечной массы

$$\mu'_{\text{прод}} = \mu_0 \beta^3, \mu'_{\text{попер}} = \mu_0 \beta, \beta = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}, \quad (1)$$

что, естественно, приводит к бесконечностям при наличии массы покоя μ_0 . Однако, еще до этого Эйнштейн специально рассматривает правила преобразования энергии и частоты фотонов (“световых комплексов”)

для движущейся системы отсчета. Он нашел, что если обозначить через E энергию света, заключенную внутри рассматриваемой поверхности и измеренную в покоящейся системе, а через E' ту же энергию, измеренную в движущейся системе, то получим:

$$E' = E\beta(1 - (v/c) \cos \phi), \quad (2)$$

где ϕ — угол между линией, соединяющей источник света с наблюдателем, и скоростью наблюдателя v , отнесенной к координатной системе, покоящейся относительно источника света. Замечательно, пишет Эйнштейн, что и энергия, и частота светового комплекса с изменением состояния движения наблюдателя изменяются по одному и тому же закону, т.е.

$$f' = f\beta(1 - (v/c) \cos \phi). \quad (3)$$

Таким образом, сам Эйнштейн, насколько можно судить, в определенном смысле вполне допускал анализ поведения фотонов при переходе от движущейся системы отсчета к покоящейся, и наоборот. Действительно, нетрудно заметить, что при $\phi = 0$ формула преобразования для энергии фотона переходит в

$$E' = E\beta(1 - (v/c)) = \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}, \quad (4)$$

т.е. никаких бесконечностей не возникает.

3 Почему не существует системы покоя для “реального” фотона?

Ответ на этот вопрос заключается в том, что фотон нельзя рассматривать в качестве точечной частицы. Дело в том, что фотон всегда движется со скоростью света и обязательно обладает одной из двух круговых поляризаций (моментом вращения), т.е. его спин может быть равным только $+1$ или -1 (но не нулю). Невозможность равенства спина нулю исключается требованием поперечности вектора волновой функции по отношению к направлению его импульса, т.е. движение фотона характеризуется аксиальной симметрией, а не сферической (как у точечного объекта). Если бы масса фотона не равнялась нулю, то электромагнитные волны имели бы три, а не два поляризационных состояния. Именно из-за отсутствия у фотона массы, ему необходимо двигаться в вакууме с максимально возможной скоростью — скоростью света. Он может существовать лишь в таком движении. Любая остановка фотона равносильна его поглощению. Поэтому, согласно квантовой электродинамике, “для фотона, движущегося со скоростью света, вообще не существует системы покоя” и к нему “неприменимо понятие спина как момента покоящейся частицы” [8, §6].

Означает ли это, что представление о системе отсчета, связанной с фотоном, ни в каких случаях не может быть использовано? Мы считаем, что (слегка перефразируя автора работы [9]), может быть принят более прагматический подход, согласно которому систему отсчета для “точечного” фотона можно применять в той мере, в которой это не приводит к физически неверным результатам. А применительно к “остановившемуся” времени фотона и “сжатому” до нуля пройденному расстоянию ситуация именно такая.

4 Можно ли локализовать фотон?

Объект, движущийся с досветовой скоростью, может быть охарактеризован:

- эволюцией текущего положения объекта в функции времени (например, собственного);
- пространственным размером объекта (возможно, в терминах его волновых свойств).

“В нерелятивистской квантовой механике термин “координатное представление” используется для обозначения представления, в котором волновая функция $\psi(\vec{r})$ определена как проекция вектора состояния $|\psi\rangle$ на собственные состояния $|\vec{r}\rangle$ компонент $\hat{x}$, $\hat{y}$, $\hat{z}$ оператора положения $\hat{r}$:

$$\psi(\vec{r}) = \langle \vec{r} | \psi \rangle. \quad (5)$$

Волновая функция в координатном представлении, следовательно, автоматически становится функцией собственных значений оператора положения $\hat{r}$. Операторы положения действуют на волновые функции просто с помощью умножения. Однако в квантовой механике фотонов этот подход не работает из-за трудностей с определением оператора положения фотона. Вместе с тем, можно ввести функции координатного

вектора $\vec{r}$ для описания квантовых состояний фотона. Принимая эту менее строгую точку зрения, которая не связывает волновую функцию в координатном представлении с приведенным соотношением, устраняются последствия несуществования оператора положения $\hat{r}$. В принципе любая функция $\vec{r}$, которая адекватно описывает состояния фотона, может называться волновой функцией фотона в координатном представлении, и это предмет вкуса и используемого соглашения”. [9]. Между тем, “волновая функция фотона в координатном представлении может быть идентифицирована с функцией моды самой по себе. Она описывает состояние единичного фотона, а не состояние квантованного поля.” [9].

В этой ситуации уместно вернуться к подходу Эйнштейна и оперировать не с положением фотона в привычном смысле, а с положением “светового комплекса” без массы покоя, но характеризуемого определенной энергией $h\nu$. Тогда текущая “координата” фотона, движущегося со скоростью c , казалось бы, с очевидностью может быть задана выражением $x = ct$. Однако это, по всей видимости, неверно. В действительности перемещение фотона в лабораторной системе отсчета представляет собой нелокальный процесс, и лишь перемещение серии фотонов, достигающих промежуточных точек, создает для лабораторного наблюдателя иллюзию, что существует некая общая для них траектория.

Наконец, методами квантовой электродинамики может быть выведено соотношение неопределенностей для одиночного фотона [9]. “Чтобы преодолеть трудность, связанную с несуществованием оператора положения фотона, роль плотности вероятности в конфигурационном пространстве играет плотность энергии. $\langle \dots \rangle$ Рассмотрим хорошо коллимированный вдоль оси z пучок света. Будем измерять ширину пучка, используя оператор центра энергии $\hat{R}$, введенный более 80 лет назад Бомом и Инфельдом. Даже полагая, что компоненты этого оператора не коммутируют, мы все еще располагаем наилучшей доступной заменой для несуществующего истинного оператора положения фотона. Поперечный размер пучка будет измеряться дисперсией оператора центра энергии $\hat{R}$ в поперечной плоскости:

$$\Delta \vec{R}_{\perp}^2 = \langle \vec{R}^2 \rangle - \langle \vec{R} \rangle^2, \quad (6)$$

а рассеяние поперечного импульса – дисперсией оператора поперечного импульса:

$$\Delta \vec{P}_{\perp}^2 = \langle \vec{P}^2 \rangle - \langle \vec{P} \rangle^2, \quad (7)$$

При этом выполняется следующее соотношение неопределенностей [9]:

$$\sqrt{\Delta \vec{R}_{\perp}^2} \sqrt{\Delta \vec{P}_{\perp}^2} \geq \hbar \gamma_{\perp}. \quad (8)$$

Безразмерный параметр $\gamma_{\perp}$ зависит от среднего значения $\langle k_z \rangle$ компоненты волнового вектора в направлении распространения пучка. В пределе, когда $\langle k_z \rangle$ стремится к бесконечности, $\gamma_{\perp}$ стремится к 1.

5 Примеры использования упрощенных систем отсчета для фотонов другими авторами

В качестве чисто иллюстративного примера можно сослаться на статью А.Н. Ораевского в статье [10], где ее автор из соображений наглядности приводит график “неподвижного” светового импульса в системе координат, движущейся со скоростью света.

Более глубокий пример приводится в книге [11] со ссылкой на оригинальные публикации Эддингтона [12] и Финкельштейна [13]. Речь идет о системе отсчета, связанной с фотонами, свободно падающими по радиусу к центру черной дыры. Для них координата r уменьшается с ростом времени t , $\langle \dots \rangle$ и ее можно записать в виде $t = t(V)$, где V – константа, характеризующая радиальную координату для фиксированного момента t . $\langle \dots \rangle$ Если мы возьмем множество фотонов при фиксированном t и припишем каждому фотону номер V , который в дальнейшем не меняется при движении фотона, то $\langle \dots \rangle$ V можно выбрать в качестве другой новой координаты. Правда, есть и существенное отличие – никакой наблюдатель не может двигаться вместе с фотоном, и в этом смысле новая система, не подходит, строго говоря, под определение системы отсчета. Но в некоторых случаях такая “система” из пробных фотонов бывает удобна. Надо только всегда помнить, что V – световая координата (не пространственная и не временная).”

6 Заключение

Итак, анализ литературы и несложные соображения приводят к тому, что связать систему отсчета с движущимся фотоном не является каким-то экстравагантным поступком. Но если так, то перестают быть

загадочными и удивительными такие до конца непонятные явления как мгновенный коллапс волновой функции или таинственная связь квантовых частиц в запутанном состоянии. При этом нет необходимости прибегать к привлечению взаимодействий неизвестной природы и «подправлению» специальной теории относительности. Не нужно также «расщеплять» волновую функцию на «пустые» и «непустой» волновые пакеты [14,15] и использовать концепцию «множественности миров» [16]. И все это достигается «минимальными затратами» и достаточно аргументированными соображениями. Вместе с тем, мы, конечно, отчетливо понимаем, что предложенное нами решение является всего лишь вполне допустимой гипотезой, нуждающейся в дальнейшем исследовании.

Работа поддержана грантом РФФИ №18-01-00598А.

Список литературы

- [1] Белинский А.В., Шульман М.Х. Квантовые корреляции и сверхсветовое взаимодействие. // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2016. № 4. С. 29–38.
- [2] Белинский А.В., Шульман М.Х. Об относительности нелокальности для фотонных корреляций. // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2017. № 1. С. 38–45.
- [3] Belinsky A.V., Shulman M.H. A possible origin of quantum correlations. // Journal of Russian Laser Research. 2017. Vol. 38. No 3. P. 230–240.
- [4] Белинский А.В., Шульман М.Х. О возможном объяснении квантовых корреляций. Метафизика. 2018. №2(28). С. 71–77.
- [5] Белинский А.В., Шульман М.Х. Об относительности меры нелокальности в квантовой механике. // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2018. № 3(24). С. 38–53.
- [6] Зельманов А.Л., Агаков В.Г. Элементы общей теории относительности. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 240 с.
- [7] Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел (1905). Собрание научных трудов, том 1. М., Наука, 1965. 397 с.
- [8] Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика.— 3-е изд., испр.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1989. 728 с.
- [9] Bialynicki-Birula I., Bialynicka-Birula Z. Uncertainty relation for focal spots in light beams. // Phys. Rev. A. 2013. V. 88. No. 6. P. 052103-1 — 052103-6.
- [10] Ораевский А.Н. Сверхсветовые волны в усиливающих средах. // УФН. 1998. Т. 168. № 12. С.1311–1321.
- [11] Новиков И.Д., Фролов В.П. Физика черных дыр. М.: Наука 1986. 328 с.
- [12] Eddington A.S. A comparison of Whitehead’s and Einstein’s formulas // Nature. 1924. V.113. 192 p.
- [13] Finkelstein D. Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle // Phys. Rev. 1958. V. 110, P. 965–967.
- [14] Bohm D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. I, // Phys. Rev. 1952 V.85. P. 166–179.
- [15] Bohm D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. II, // Phys. Rev. 1952 V.85. P. 180–193.
- [16] Everett Hugh III. ‘Relative State’ Formulation of Quantum Mechanics, // Reviews of Modern Physics, 1957 V. 29. No. 3. P. 454–462.

References

- [1] Belinsky A.V., Shulman M.X. Kvantovyye korrelyatsii i sverkhsvetovoye vzaimodeystviye. // Prostranstvo. vremya i fundamentalnyye vzaimodeystviya. 2016. № 4. P. 29–38.
- [2] Belinsky A.V., Shulman M.X. Ob otnositelnosti nelokalnosti dlya fotonnykh korrelyatsiy. // Prostranstvo. vremya i fundamentalnyye vzaimodeystviya. 2017. № 1. P. 38–45.
- [3] Belinsky A.V., Shulman M.H. A possible origin of quantum correlations. // Journal of Russian Laser Research. 2017. Vol. 38. No 3. P. 230–240.
- [4] Belinsky A.V., Shulman M.X. O vozmozhnom obyasnении kvantovykh korrelyatsiy. Metafizika. 2018. №2(28). P. 71–77.
- [5] Belinsky A.V., Shulman M.Kh. Ob otnositelnosti mery nelokalnosti v kvantovoy mekhanike. // Prostranstvo. vremya i fundamentalnyye vzaimodeystviya. 2018. № 3(24). P. 38–53.
- [6] Zelmanov A.L., Agakov V.G. Elementy obshchey teorii otnositelnosti. M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit.. 1989. 240 p.
- [7] Einstein A. On The Electrodynamics Of Moving Bodies. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik. 1905. V. 322 No. 10. P. 891–921.
- [8] Berestetskiy V.B., Lifshits E.M., Pitayevskiy L.P. Kvantovaya elektrodinamika.— 3-e izd.. ispr.— M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. 1989. 728 p.
- [9] Bialynicki-Birula I., Bialynicka-Birula Z. Uncertainty relation for focal spots in light beams. // Phys. Rev. A. 2013. V. 88. No. 6. P. 052103-1 – 052103-6.
- [10] Orayevskiy A.N. Sverkhsvetovyye volny v usilivayushchikhsya sredakh. // UFN. 1998. T. 168. № 12. P.1311-1321.
- [11] Novikov I.D., Frolov V.P. Fizika chernykh dyr. M.: Nauka 1986. 328 p.
- [12] Eddington A.S. A comparison of Whitehead’s and Einstein’s formulas // Nature. 1924. V.113. 192 p.
- [13] Finkelstein D. Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle // Phys. Rev. 1958. V. 110, P. 965–967.
- [14] Bohm D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. I, // Phys. Rev. 1952 V.85. P. 166–179.
- [15] Bohm D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. II, // Phys. Rev. 1952 V.85. P. 180–193.
- [16] Everett Hugh III. ‘Relative State’ Formulation of Quantum Mechanics, // Reviews of Modern Physics, 1957 V. 29. No. 3. P. 454–462.

Авторы

Белинский Александр Витальевич, д. ф.-м. н., профессор физического факультета, Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, 119991, Россия
e-mail belinsky@physics.msu.ru

Шульман Михаил Хананович, пенсионер
e-mail shulman@dol.ru

Authors

Belinsky Alexander Vital’evich, Doctor of Physics, professor at the Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Leninskiye Gory, 1-2, 119991, Russia
e-mail belinsky@physics.msu.ru

Shulman Mihael Hananovich, pensioner e-mail shulman@dol.ru