

01;02

О возможности использования рентгеновских сверхсветовых „зайчиков“ для проверки изотропии скорости света

© Г.Б. Малыкин

Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: malykin@mail.nnov.ru

(Поступило в Редакцию 21 февраля 2005 г.)

Предложен метод экспериментальной проверки изотропии скорости света, основанный на возбуждении излучения Вавилова–Черенкова с помощью виртуального электрического заряда, движущегося со сверхсветовой скоростью.

В известных работах [1,2] (см. также [3–5]) было рассмотрено движение по экрану луча прожектора, вращающегося с угловой скоростью Ω (так называемого светового „зайчика“). При достаточно большом расстоянии R от источника излучения до экрана, когда выполняется условие $v_{\text{proj}} = R\Omega < c$ (где v_{proj} — линейная скорость движения „зайчика“ по экрану, c — скорость света в вакууме), „зайчик“ может иметь сверхсветовую фазовую скорость v_{proj} . В нашей работе [6] было предложено использовать сверхсветовые „зайчики“ различной природы (это может быть, например, вращающийся электронный луч) при условии $v_{\text{proj}} = R\Omega \gg c$ для синхронизации разнесенных в пространстве часов с целью экспериментальной проверки изотропии скорости света в прямом и обратном направлениях распространения, что могло бы послужить подтверждением справедливости второго постулата специальной теории относительности (СТО) [7].

В работе [2] (см. также [8]) была также рассмотрена возможность генерации излучения Вавилова–Черенкова с помощью сверхсветовых „зайчиков“ электромагнитной природы. Движущийся по внутренней поверхности металлического экрана цилиндрической формы „зайчик“ на короткий момент создает неоднородное распределение заряда на поверхности металла или, что значительно более эффективно для генерации излучения Вавилова–Черенкова, выбивает электроны из металла (в последнем случае металлический экран фактически является катодом). При этом создается виртуальный электрический заряд, который движется со скоростью $v_{\text{proj}} > c$. Однако для преодоления работы выхода электронов требуется существенно более коротковолновое по сравнению со светом электромагнитное излучение. Недавно подобный эксперимент, но с несколько отличной от предложенной в [2,8] схемой был успешно осуществлен с рентгеновским излучением [9].

Цель данной работы — предложить метод экспериментальной проверки изотропии скорости света, основанный на возбуждении излучения Вавилова–Черенкова с помощью виртуального электрического заряда [2,8,9], движущегося со сверхсветовой скоростью.

Прежде всего напомним, что в рамках СТО скорость света является изотропной, следовательно, эксперимен-

тальное подтверждение этого факта является прямым доказательством справедливости СТО, а точнее говоря, второго постулата СТО. Утверждения о наличии анизотропии скорости света имеют место, в частности, в теории „светоносного эфира“. В рамках этой, хотя и устаревшей, но, к сожалению, не полностью изжитой теории предполагается, что в некоторой гипотетической инерциальной системе отсчета (ИСО), относительно которой эфир неподвижен, скорость света изотропна и равна c . В любой другой ИСО скорость света есть сумма двух векторов: c направление которого совпадает с направлением источника излучения, и скорости эфира v_{aeth} . Без потери общности можно положить, что скорость эфира направлена вдоль оси X . Тогда величина скорости света от источника излучения, который ориентирован под углом φ к оси X , составит

$$V(\varphi) = c \sqrt{1 + \frac{2v_{\text{aeth}}}{c} \cos \varphi + \frac{v_{\text{aeth}}^2}{c^2}} \quad (v_{\text{aeth}} \ll c),$$

а угол, под которым он распространяется,

$$\psi(\varphi) = \arctan \frac{c \sin \varphi}{c \cos \varphi + v_{\text{aeth}}}.$$

Отметим, что если $v_{\text{aeth}} = 0$, то $V = c$ и $\psi = \varphi$. Если источник излучения, который расположен в центре цилиндрического экрана, вращается с угловой скоростью Ω , то путем несложных, но громоздких вычислений можно показать, что линейная скорость движения „зайчика“ по экрану составляет

$$v_{\text{proj}} = R\Omega \frac{(1 + \frac{v_{\text{aeth}}}{c} \cos \Omega t) \sqrt{1 + 2 \frac{v_{\text{aeth}}}{c} \cos \Omega t + \frac{v_{\text{aeth}}^2}{c^2}}}{1 + 2 \frac{v_{\text{aeth}}}{c} \cos \Omega t + R\Omega \frac{v_{\text{aeth}}}{c^2} \sin \Omega t + \frac{v_{\text{aeth}}^2}{c^2}}, \quad (1)$$

где t — время.

Если в выражении (1) пренебречь малыми величинами v_{aeth}/c , $v_{\text{aeth}}^2/c^2 \ll R\Omega/c$, то оно существенно упростится

$$v_{\text{proj}} \simeq \frac{R\Omega}{1 + R\Omega \frac{v_{\text{aeth}}}{c^2} \sin \Omega t}. \quad (2)$$

Поскольку скорость движения „зайчика“, а следовательно, и виртуального заряда периодически меняется со временем, то соответственно будут меняться и параметры излучения Вавилова—Черенкова: угол при вершине конуса и частота излучения. Более того, при достаточно больших радиусах R , когда выполняется условие

$$R\Omega v_{\text{aeth}} > c^2, \quad (3)$$

периодически должно меняться даже направление движения „зайчика“ по экрану,¹ а его скорость в отдельные моменты времени будет бесконечно большой. Такие изменения можно зарегистрировать, и их отсутствие и будет служить прямым доказательством справедливости второго постулата СТО. Заметим, что в соответствии с различными предположениями сторонников теории „светоносного эфира“ величина v_{aeth} составляет от 30 (орбитальная скорость Земли) до 360 km/s (скорость солнечной системы относительно ИСО, в которой анизотропия реликтового фона отсутствует [13]). Таким образом, для выполнения условия (3) достаточно, чтобы величина $v_{\text{proj}} = R\Omega$ составляла $\sim 10^4 c - 10^3 c$.

Рассмотрим вопрос о том, как реализовать движение виртуального заряда со сверхсветовой скоростью, как это предлагалось в [2,8], т.е. от вращающегося источника непрерывного рентгеновского излучения на экране цилиндрической формы. Во-первых, можно приводить во вращение сам источник рентгеновского излучения, как это было сделано в [14] с целью регистрации эффекта Саньяка. Однако поскольку сам источник имеет достаточно большой вес, то реализовать большую угловую скорость его вращения затруднительно. Во-вторых, можно использовать предсказанное в 1946 г. переходное излучение [15], которое возникает при пересечении пучком электронов границы двух диэлектриков с различным коэффициентом диэлектрической проницаемости. В настоящее время разрабатываются портативные источники переходного рентгеновского излучения в многослойных периодических наноструктурах [16]. В-третьих, сам источник может оставаться неподвижным, а пучок рентгеновских лучей может отражаться от вращающегося рентгеновского зеркала, в качестве которого может применяться дифракционная решетка, например монокристалл кремния [14].

Однако для реализации сверхсветового рентгеновского „зайчика“ вовсе не обязательно осуществлять вращение источника рентгеновского излучения или самого луча. Для этого можно использовать весьма короткий импульс рентгеновского излучения, который одновременно излучается в достаточно широком угловом направлении, и экран специальной формы. Эта идея и была использована в экспериментах [9].² Короткий

импульс (0.3–0.5 ns) с диаметром пучка ~ 1 mm от мощного оптического лазера ($\lambda = 1.315 \mu\text{m}$) падал на плоскую золотую мишень и генерировал короткий импульс рентгеновского излучения (0.6–1 ns), который имел сферический волновой фронт. Попадая на алюминиевый катод, рентгеновский импульс на короткий момент выбивал из поверхности алюминия электроны. Над катодом размещался сетчатый анод, который находился под напряжением несколько десятков kV. Анод практически свободно пропускал рентгеновское излучение и поток электронов, его назначение заключалось в увеличении скорости выбитых электронов, что приводило к многократному увеличению мощности излучения Вавилова—Черенкова. На рассматриваемые в данной работе релятивистские эффекты наличие анода влияния практически не оказывало. Если бы рентгеновский импульс падал на катод (экран) цилиндрической формы, то вследствие сферичности волнового фронта он достигал бы всей поверхности катода одновременно, что соответствует $v_{\text{proj}} = \infty$. Однако, как известно, при бесконечно большой скорости движения виртуального заряда по экрану (катоде) излучение Вавилова—Черенкова не имеет места. Вследствие этого в экспериментах [9] катод имел форму плоской пластины длиной 850 mm, плоскость которой находилась на расстоянии 340 mm от мишени — точечного источника рентгеновского излучения. Ближний из концов пластины находился на расстоянии 400 mm от источника, дальний — на расстоянии 1100 mm. Излучение падало на катод под углами от ~ 70 до $\sim 25^\circ$. При этом, однако, скорость движения виртуального заряда по катоду v_{proj} не оставалась постоянной при условии, что скорость света изотропна и равна c , величина v_{proj} составляла от $\sim 1.3c$ у ближнего к источнику конца катода до $\sim 1.05c$ у дальнего конца, что согласуется с измеренными в [9] параметрами излучения Вавилова—Черенкова. Вследствие этого результаты [9] позволяют сделать заключение только о том, что в интервале углов $\sim 40^\circ$ анизотропия скорости света не превышает 25–30%, в противном случае излучение Вавилова—Черенкова от некоторых участков катода не имело бы места. Поскольку измерения [9] проводились в различное время суток, когда экспериментальная установка была по-разному ориентирована относительно Мирового Пространства, то данное заключение имеет силу для более широкого интервала углов.

Невысокая точность оценки изотропии скорости света, которую позволяют сделать результаты [9], не должна приводить к отрицанию перспективы развития данных направлений исследований применительно к проверке основных постулатов СТО. Напомним, что первые эксперименты А.А. Майкельсона [18] также продемонстрировали очень низкую точность измерения, более того, как показал Г.А. Лоренц [19], в [18] она была ошибочно завышена в два раза. Тем не менее в дальнейшем А.А. Майкельсон и Э. Морли смогли существенно повысить точность измерений [20], а в настоящее время она возросла на много порядков [21,22]. Отметим, что

¹ Последнее предположение весьма трудно допустить, в частности, никто не наблюдал изменения направления движения световых „зайчиков“ от пульсаров [1,2,10] или дифракционной решетки [11,12], что косвенно свидетельствует в пользу изотропии скорости света.

² Подробное теоретическое рассмотрение экспериментов [9] приводится в [17].

эксперименты типа Майкельсона–Морли показывают только то, что средняя скорость распространения туда и обратно была постоянна во всех направлениях (этот вопрос подробно рассмотрен в [6]). Работа [9] впервые демонстрирует возможность экспериментальной проверки изотропии однонаправленной скорости света, вследствие чего значение результатов [9] для СТО трудно переоценить.

Можно предложить такое видоизменение формы катода, которое позволит существенно повысить точность определения верхней границы анизотропии скорости света. Для этого катод должен иметь форму отрезка так называемой архимедовой спирали [23], что обеспечит постоянство скорости движения виртуального заряда со скоростью v_{proj} , разумеется, при условии, что скорость света изотропна. Для того чтобы при наличии изотропии скорости света реализовать условие $v_{\text{proj}} = Kc$ (где K — коэффициент, определяющий превышение „зайчиком“ скорости света) зависимость расстояния R от точечного источника рентгеновского излучения до катода от угла φ должна меняться по закону

$$R(\varphi) = R_0 \cdot \left(1 + \frac{\varphi c}{v_{\text{proj}}}\right) = R_0 \left(1 + \frac{\varphi}{K}\right), \quad (4)$$

где R_0 — расстояние до ближнего к источнику конца катода.

Если положить $v_{\text{proj}} = 10^3 c$, то при $R_0 = 1000$ мм и изменении угла φ вдоль катода на $\sim 40^\circ$ в соответствии с (4) дальний конец катода должен находиться на расстоянии 1000.4 мм от источника рентгеновского излучения. Такая точность изготовления и установки катода может быть реализована практически. Если скорость света была бы анизотропна и анизотропия составляла бы более чем 10^{-3} от ее средней величины c (чему, согласно терминологии противников СТО, соответствует условие $v_{\text{aeth}} > 300$ км/с), то нетрудно показать, что, так же как и в случае с вращающимся рентгеновским лучом и цилиндрическим экраном (см. выражение (2), (3)), направление движения „зайчика“ от сферического фронта по экрану (катоде) в виде архимедовой спирали должно было бы периодически меняться. Отсутствие такого необычного движения „зайчика“ будет служить прямым доказательством справедливости второго постулата СТО. Разумеется, при этом отклонения волнового фронта рентгеновского излучения от идеальной сферической формы должны быть существенно менее, чем на 0.4 мм, а для регистрации параметров излучения Вавилова–Черенкова следует установить большое число датчиков вблизи различных участков катода (в [9] их было три). В рассматриваемом случае очень важна и длительность рентгеновского импульса: если он будет слишком продолжительным, то его волновой фронт практически одновременно достигнет всего катода и размер „зайчика“ будет порядка размера катода. Для того чтобы размер „зайчика“ был достаточно мал, длительность рентгеновского импульса для рассматриваемого случая должна быть существенно меньше 1 ps.

Чем больше требуемый коэффициент K — превышение „зайчиком“ скорости света, тем меньше должен быть шаг архимедовой спирали и соответственно тем короче должна быть длительность рентгеновского импульса.

Основной результат данной работы заключается в том, что характеристики излучения Вавилова–Черенкова от рентгеновского „зайчика“, движущегося по экрану (катоде) со сверхсветовой скоростью, позволяют сделать заключение об изотропии однонаправленной скорости света. При этом может быть использован „зайчик“ от вращающегося непрерывного источника рентгеновского излучения на экране цилиндрической формы [2,8] или „зайчик“ от импульсного источника рентгеновского излучения со сферическим волновым фронтом на экране в форме плоскости [9] или отрезка архимедовой спирали.

В заключение автор выражает благодарность С.П. Мартыненко за обсуждение результатов работы [9], В.И. Поздняковой за помощь в работе, А.М. Сергееву за полезное замечание, О.В. Чеботаренко за обсуждение вопросов, связанных с движением вращательного луча при наличии анизотропии скорости света.

Работа частично поддержана грантом совета при президенте РФ по поддержке ведущих научных школ (№ НШ-1622.2003.2).

Список литературы

- [1] Гинзбург В.Л. // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. Вып. 1. С. 173–175.
- [2] Болотовский Б.М., Гинзбург В.Л. // УФН. 1972. Т. 106. Вып. 4. С. 577–592.
- [3] Болотовский Б.М., Гинзбург В.Л. // Эйнштейновский сборник 1972 / Под ред. В.Л. Гинзбург, Г.И. Наан. М.: Наука, 1974. С. 212–236.
- [4] Гинзбург В.Л. // Теоретическая физика и астрофизика. М.: Наука, 1981. С. 211–228.
- [5] Гинзбург В.Л. // О теории относительности. М.: Наука, 1979. С. 212–236.
- [6] Малыкин Г.Б. // УФН. 2004. Т. 174. № 7. С. 801–804.
- [7] Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел. Собр. соч. М.: Наука, 1965. Т. 1. С. 7–35. Einstein A. // Ann. der Phys. (Leipzig). 1905. Vol. 17. N 10. P. 891–921.
- [8] Эйдеман В.Я. // Изв. вузов. Радиофизика. 1972. Т. 15. № 4. С. 634–635.
- [9] Bessarab V.A., Gorbunov A.A., Martynenko S.P., Prudkoy N.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32. N 3. P. 1–4.
- [10] Гинзбург В.Л. // УФН. 1971. Т. 103. Вып. 3. С. 393–429.
- [11] Баранова Н.Б., Скалли М.О., Зельдович Б.Я. // ЖЭТФ. 1994. Т. 105. Вып. 3. С. 469–486.
- [12] Зельдович Б.Я., Кундикова Н.Д., Подгорнов Ф.В., Рогачева Л.Ф. // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 12. С. 1128–1130.
- [13] Smoot G.F., Gorenstein M.V., Muller R.A. // Phys. Rev. Lett. 1977. Vol. 29. N 14. P. 898–901.
- [14] Высоцкий В.И., Воронцов В.И., Кузьмин Р.Н., Безирганян П.А., Ростомян А.Г. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 309–324.

- [15] Гинзбург В.Л., Франк И.М. // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. Вып. 1. С. 15–24.
- [16] Kaplan A.E., Law C.T., Shkolnikov P.L. // Phys. Rev. 1005. Vol. 52E. N 6. P. 6795–6808.
- [17] Лазарев Ю.Н., Петров П.В., Сырцова Ю.Г. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 11. С. 83–91.
- [18] Michelson A.A. // Am. J. Sci. 1881. Ser. III. Vol. 22. N 128. P. 120–129. (Майкельсон А.А. Творцы физической оптики / Под ред. У.И. Франкфурт. М.: Наука, 1973. С. 223–235).
- [19] Lorentz H.A. // Arch. Neerl. 1886. Vol. 21. P. 103. (Lorentz H.A. Collected Papers. The Hague: M. Nijhoff, 1936. Vol. 4. P. 153).
- [20] Michelson A.A., Morley E.W. // Am. J. Sci. 1887. Ser. III. Vol. 34. N 203. P. 333–345.
- [21] Braxmaier C., Müller H., Pradl O., Mlynek J., Peters A.T. // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 88. N 1. P. 010401.1–010401.4.
- [22] Müller H., Herrmann S., Braxmaier C., Schiller S., Peters A. // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 91. N 2. P. 020401.1–020401.4.
- [23] Бронштейн И.Н., Семендяев А.С. Справочник по математике. М.: ГИТТЛ, 1954. 608 с.