

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

О возможности экспериментальной проверки второго постулата специальной теории относительности

Г.Б. Малыкин

PACS numbers: 03.30.+p, 06.20.Jr

Равенство скоростей света для прямого и обратного направлений распространения (здесь и далее речь идет о физической скорости света в вакууме, которая может быть измерена¹) является одним из следствий второго постулата специальной теории относительности (СТО). Вот как сформулировал второй постулат СТО А. Эйнштейн в своей основополагающей работе [2]: "...свет в пустоте всегда распространяется с определенной скоростью V , не зависящей от состояния движения излучающего тела". Таким образом, второй постулат СТО фактически содержит два утверждения: 1) скорость света постоянна для произвольного направления распространения; 2) скорость света не зависит от скорости источника излучения.

Сразу же после создания СТО В. Ритц выступил против второго утверждения [3, 4], выдвинув так называемую баллистическую (эмиссионную) теорию излучения, которая предполагает алгебраическое сложение скорости света со скоростью источника излучения по отношению к наблюдателю. Проведенные в разное время эксперименты К. Майораны [5], Р. Томашека [6] и А.М. Бонч-Бруевича [7] продемонстрировали ошибочность баллистической гипотезы В. Ритца. Аналогичные эксперименты, проведенные с γ -лучами, также показали, что в пределах точности измерений скорость света не зависит от скорости источника излучения [8]. Отметим, что попытка экспериментального доказательства справедливости баллистической гипотезы В. Ритца предпринималась У. Кантором [9] (см. также [10–12])².

Экспериментальная проверка первого утверждения до сих пор не проводилась, поскольку принятый в СТО способ

синхронизации часов в двух различных точках одной системы отсчета с помощью световых сигналов³ делает сравнение скорости света для прямого и обратного направлений невозможным. Как показано в [15–17], проблему синхронизации часов невозможно решить ни путем транспортировки часов, ни с помощью одновременного запуска часов в точках A и B некоторым механическим устройством. Вот что писал по этому поводу А. Пуанкаре [14]: "...скорость света [принимается] постоянной и, в частности, одинаковой во всех направлениях. Это есть постулат, без которого нельзя было бы предпринять никакого измерения этой скорости. Данный постулат никогда нельзя проверить прямо на опыте. Он мог бы войти в противоречие с опытом, если бы результаты различных измерений не согласовались между собой. Мы должны быть счастливы, что этого противоречия нет..." А. Эйнштейн утверждал [18], что равенство скоростей света для встречных направлений "...в действительности не является предпосылкой или гипотезой о физической природе света, а [является] утверждением, которое можно сделать на основе свободного выбора, чтобы прийти к определению одновременности".

Определение любой физической величины, в том числе и скорости света, всегда связано с методом ее экспериментального измерения. Вот какое определение скорости света дает А. Эйнштейн [1]: "Согласно опыту, мы положим также, что величина

$$\frac{2\overline{AB}}{t'_A - t_A} = V \quad (*)$$

есть универсальная константа (скорость света в пустоте)⁴. Существенным является то, что мы определили время с помощью покоящихся часов в покоящейся системе..." Определение (*) связано с применяющимся до настоящего времени способом измерения скорости света⁵, основанном на измерении временного промежутка между испусканием света и его возвращением в исходную точку после отражения от зеркала, расстояние до которого известно.

¹ Отметим, что существует понятие координатной скорости света, зависящей от выбора системы координат, т.е. от метрики пространства-времени, а при переходе от одной системы координат к другой — также и от вида используемых пространственно-временных преобразований (см., например, [1]).

² Эксперимент Кантора и его последующее опровержение подробно рассмотрены в обзоре [13].

Г.Б. Малыкин. Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова 46, Российская Федерация
Тел. (8312) 16-48-70
E-mail: malykin@ufr.appl.sci-nnov.ru

Статья поступила 19 сентября 2003 г., после доработки 15 марта 2004 г.

³ Этот способ синхронизации часов в СТО был введен А. Эйнштейном [2] и ранее рассматривался А. Пуанкаре [14].

⁴ Здесь \overline{AB} — расстояние от точки A , в которой находится источник света, приемное устройство и часы, до точки B , в которой находится отражатель света (зеркало); t_A и t'_A — соответственно, время испускания и возврата света в точку A ; V — символ, который А. Эйнштейн использовал для обозначения скорости света.

⁵ Этот способ был впервые реализован А.И. Физо [19, 20].

Иногда высказывают мнение, что постоянство скорости света для произвольного направления распространения подтверждается результатами экспериментов Майкельсона–Морли [21–23] и Кеннеди–Торндайка [24]⁶, однако это не соответствует действительности. Вот что писал по этому поводу А.С. Эддингтон [31]: "Строго говоря, опыт Майкельсона–Морли не доказывает непосредственно, что скорость света постоянна во всех направлениях, он только говорит о том, что средняя скорость распространения туда и обратно была постоянна во всех направлениях". Таким образом, эксперименты типа Майкельсона–Морли не имеют в строгом смысле доказательной силы по вопросу измерения изотропии скорости света, однако косвенно свидетельствуют в пользу последней. Это обстоятельство прекрасно понимали сами А.А. Майкельсон и Э.В. Морли, которые указали, что: "Если бы было возможно измерить с достаточной точностью скорость света без возврата луча в его исходную точку, то проблема измерения первого порядка относительной скорости Земли и эфира была бы решена" [22, 23]. Далее авторы [22, 23] предлагают две различные оптические схемы для данных измерений, принцип действия которых основан на использовании двух разнесенных зеркал, вращающихся с одинаковыми скоростями. Интересно отметить, что в одной из схем для регистрации разности времен прихода световых сигналов с противоположных направлений предлагается использовать селеновые фотоэлементы — прообраз современных фотодиодов.

Отметим, что еще в 1868 г., т.е. за 13 лет до первых экспериментов Майкельсона [21], М. Гек [32, 33] пытался обнаружить поступательное движение Земли относительно "светоносного эфира" (или, что то же самое, обнаружить анизотропию скорости света) с помощью неподвижного кольцевого интерферометра прямоугольной формы⁷. Одна из четырех сторон прямоугольника была заполнена оптической средой — стеклом или водой. Если заполненное оптической средой плечо кольцевого интерферометра совпадает с направлением движения Земли относительно эфира, то разности скоростей встречных световых волн в этом плече и в противоположном, "пустом" плече будут различаться, что может привести к появлению разности фаз встречных волн. Если повернуть интерферометр на 180°, то эта разность фаз должна сменить знак. Однако при повороте интерферометра М. Гек не обнаружил изменения разности фаз встречных волн. Недавно аналогичные эксперименты были повторены С. Мариновым [35] и, с существенно более высокой точностью измерений, В.В. Рагульским [36–38], причем результат [36–38] также был отрицательным. Для дальнейшего повышения точности рассматриваемых экспериментов предложено размещать оптическую среду в одном из плеч кольцевого лазера [39]. Другая возможность повышения точности заключается в использовании модуляционного метода, который был

предложен более полувека назад Г.С. Гореликом [40] и И.Л. Берштейном [41] и в настоящее время нашел широкое применение в прецизионной интерферометрии.

Однако, как показано в [13, 34], отрицательные результаты экспериментов М. Гека [32, 33] (и, разумеется, В.В. Рагульского [36–38]) могут найти объяснение в рамках теории частично увлекаемого эфира О. Френеля [42]⁸. В этом нет ничего удивительного, поскольку О. Френель создавал свою теорию специально для того, чтобы объяснить результаты экспериментов Ф.Д. Араго [43] (проведенных им и доложенных во Французской академии в 1810 г., но опубликованных только спустя 43 года), показавших, что коэффициент преломления призмы не зависит от скорости источника излучения. Может возникнуть недоумение: поскольку теория частично увлекаемого эфира Френеля давно опровергнута СТО, то объяснение отрицательных результатов экспериментов типа Гека–Рагульского в рамках теории Френеля, как это излагается в [13, 34], не имеет никакого смысла. Однако в соответствии с первым утверждением второго постулата СТО скорость света изотропна, и, следовательно, эксперименты типа Гека–Рагульского, равно как и типа Майкельсона–Морли, в рамках СТО должны *a priori* привести к нулевому результату. Уже сама постановка таких экспериментов является проверкой справедливости СТО и, следовательно, допускает их трактовку и с точки зрения других теорий, в частности теории Френеля. Эксперименты типа Гека–Рагульского демонстрируют изотропию коэффициента преломления оптической среды, но не могут служить строгим опровержением теории "светоносного эфира". Таким образом, эксперименты типа Гека–Рагульского так же, как и эксперименты типа Майкельсона–Морли, не имеют в строгом смысле доказательной силы по вопросу измерения изотропии скорости света, но косвенно свидетельствуют в пользу последней. Следовательно, рассмотренные выше эксперименты так же, как и любые другие эксперименты, основанные на явлении интерференции, не могут заменить прямого измерения скоростей света для прямого и обратного направлений распространения, поскольку регистрация интерференционной картины всегда предполагает измерение в одной точке пространства.

Отсутствие прямой экспериментальной проверки первого утверждения второго постулата СТО является одним из основных аргументов противников этой теории⁹ и приводит к появлению ряда спекуляций (см., например, [44–48]). Так, авторы [47, 48] полагают, что скорость света c' в системе отсчета, которая движется относительно некоторой "абсолютной системы отсчета, покоящейся относительно мирового пространства" [47], или "эфира" [48], анизотропна и для противоположных направлений составляет $c'_\pm = c/(1 \pm \beta)$ (где $\beta = v/c$). В этом случае суммарное время распространения света в прямом и обратном направлениях не зависит от скорости относительно "эфира", что позволяет объяснить результаты экспериментов Майкельсона–Морли и Гека–Рагульского. С. Маринов полагал, что ему удалось обнаружить движение Земли относительно "светоносного эфира" со скоростью

⁶ Эксперименты Майкельсона–Морли много раз повторялись. Большинство этих работ приведено в сборнике [25], а их подробное рассмотрение приводится в известной монографии С.И. Вавилова [26] и в обзоре [13]. После создания лазеров с нелинейно-поглощающей ячейкой — квантовых стандартов частоты — Дж. Холл с сотрудниками (Национальное Бюро Стандартов, г. Болдер, Колорадо, США) повторил эксперименты Майкельсона–Морли [27] и Кеннеди–Торндайка [28] на весьма высоком уровне точности. Недавно немецкие исследователи повторили эксперименты Кеннеди–Торндайка с резонатором Фабри–Перо из кристаллического сапфира, охлажденного до температуры жидкого гелия [29, 30].

⁷ Описание этих опытов приводится в [13, 34].

⁸ Напомним, что, согласно [42], в движущейся со скоростью $\pm v$ относительно "эфира" оптической среде с коэффициентом преломления n скорость света составляет $c/n \pm (1 - 1/n^2)v$, где $1 - 1/n^2$ — коэффициент увлечения Френеля, c — скорость света в вакууме.

⁹ Следует иметь в виду, что несостоятельность баллистической гипотезы В. Ритца не может служить опровержением теории "светоносного эфира", поскольку так же, как скорость акустических волн в газе или жидкости, в рамках этой теории скорость света в "эфире" не зависит от скорости источника излучения.

$362 \pm 40 \text{ км с}^{-1}$ путем измерения скоростей света для встречных направлений с помощью двух обтюраторов (дисков с расположенными по кругу отверстиями), надеты на расстоянии 1,2 м друг от друга на ось вращающегося с угловой скоростью 400 об с^{-1} электромотора [46]¹⁰. Излучение от двух независимых лазеров пропусклось через оба обтюратора во встречных направлениях. Первый обтюратор формировал последовательность световых импульсов, второй же, который успевал незначительно повернуться за время прохождения импульса, в зависимости от начального смещения углового положения его отверстий относительно отверстий первого обтюратора несколько уменьшал или увеличивал длительность каждого импульса. Однако схема обработки сигналов с фотоприемников, находящихся за обтюраторами [46], была настолько несовершенна, что результаты этой работы по обнаружению "светоносного эфира" нельзя рассматривать как достоверные.

Следует отметить, что в работах А.А. Майкельсона и Э.В. Морли [22, 23] и соответственно [44–46] содержалось позитивное предложение: разнесенные на некоторое расстояние два вращающихся с постоянной угловой скоростью зеркала или обтюратора можно рассматривать как своего рода пару "часов", которые синхронизированы за счет жесткой связи с осью. Однако рассматриваемые механические устройства реально не могут обеспечить сколько-нибудь приемлемую точность измерений скорости света. Тем не менее с принципиальной точки зрения эксперименты типа эксперимента Майкельсона–Морли–Маринова имеют доказательную силу по вопросу измерения анизотропии скорости света.

Отметим, что даже известный специалист по СТО О. Коста де Борегар не исключал возможности, что при прохождении света в одном направлении величина его скорости зависит от направления эфирного ветра [49] (см. также [50]; весьма подробно данный вопрос рассмотрен в [15]).

Все указанные выше противоречащие основам СТО утверждения связаны с тем, что имеется своего рода порочный круг: для измерения скоростей света для встречных направлений необходимо синхронизовать разнесенные часы, для чего в СТО принято использовать световые сигналы. Следовательно, необходимо предложить такую процедуру синхронизации разнесенных часов, чтобы измеряемая величина (в данном случае скорость света) не имела отношения к синхронизации часов.

Для синхронизации разнесенных часов, с нашей точки зрения, целесообразно использовать предложенный более 30 лет назад в работе В.Л. Гинзбурга [51] и более подробно рассмотренный в работе Б.М. Болотовского и В.Л. Гинзбурга [52]¹¹ так называемый световой "зайчик", который может иметь сверхсветовую фазовую скорость. В [51, 52] рассмотрено движение по экрану луча прожектора, вращающегося с угловой скоростью Ω . Если точки A и B равноудалены от прожектора на достаточно большое расстояние r , то для линейной скорости "зайчика" v будет выполняться условие $v = r\Omega \gg c$. Разумеется, "зайчик" не

может переносить со сверхсветовой скоростью информацию из точки A в точку B : фотоны, пришедшие в точку A , никогда не попадут в точку B , и, следовательно, принцип причинности не нарушается.

Пусть имеется предварительная договоренность о том, что в момент прихода "зайчика" в точку A срабатывает управляемое фотоэлементом малоинерционное устройство, запускающее короткий световой импульс в точку B , а в момент прихода "зайчика" в точку B идентичное устройство запускает такой же импульс в точку A . Одновременно с испусканием импульсов в точках A и B запускаются часы. Разностью времен прихода "зайчика" в точки A и B можно пренебречь, поскольку она много меньше времени распространения светового импульса. Измерение скоростей света для встречных направлений в этом случае сведется к измерению временных интервалов между испусканием "своего" и приемом пришедшего импульса в точках A и B при известной длине прямой \overline{AB} . Таким образом, предложенный способ синхронизации разнесенных часов имеет доказательную силу по вопросу измерения изотропии скорости света.

Рассмотрим вопрос о соответствии предложенной процедуры синхронизации часов основам СТО. Вот что по этому поводу пишут авторы [52]: "...отметим, что применение скорости света для синхронизации часов, обычно используемое при изложении теории относительности, во-первых, является не единственным, а лишь одним из возможных методов; во-вторых, этот метод действительно в большинстве случаев наиболее удобен и целесообразен не в связи с тем, что скорость света является максимально возможной, а потому, что эта скорость универсальна — одинакова во всех инерциальных системах отсчета..." Поскольку в рассматриваемом случае точки A и B находятся в одной инерциальной системе отсчета, то отсутствуют какие-либо основания сомневаться в возможности использования световых "зайчиков" для синхронизации часов в точках A и B . Процессы, перемещающиеся в пространстве с произвольными скоростями, рассматривались и в других работах (см., например, [51, 56–58]), но только в [52] указано, что традиционный метод синхронизации часов с помощью световых импульсов не является единственно возможным.

В литературе рассматривались различные способы реализации сверхсветовых скоростей "зайчика" произвольной природы: излучение пульсара [51, 52, 59]; вращающийся луч [51, 52, 58]; вращающийся электронный пучок [52]; наклонно падающая на проводящую плоскость заряженная нить [52, 56]; движущийся по проводящей плоскости электрический заряд [52, 56]; отражение светового импульса от дифракционной решетки конической формы [60, 61]. Наибольшую скорость ($R\Omega = 1,2 \times 10^{19} \text{ м с}^{-1}$) имеет "зайчик", образованный излучением пульсара NP 0532 в Крабовидной туманности [51, 52, 59] ($\Omega = 200 \text{ рад с}^{-1}$, расстояние до Земли $R = 6 \times 10^{19} \text{ м}$). Отметим, что использование "зайчика" от вращающегося электронного пучка может иметь некоторое преимущество перед световым "зайчиком", поскольку скорость электронов не связана со скоростью света.

Таким образом, утверждение А. Пуанкаре [14] о принципиальной невозможности измерения скорости света для встречных направлений не соответствует действительности. Имеется по крайней мере два способа синхронизации разнесенных в пространстве часов: с помощью двух жестко связанных между собой механических элементов (зеркал [22, 23, 44, 45] или обтюраторов [46]) и с помощью "зайчиков" произвольной природы, имеющих сверхсветовые скорости [51, 52]. Отметим здесь, что А. Эйнштейн никогда

¹⁰ В ранних работах С. Маринова [44, 45] использовалась схема с двумя вращающимися зеркалами, предложенная еще А.А. Майкельсоном и Э.В. Морли [22, 23], схема же с обтюраторами является модификацией последней и гораздо проще в изготовлении, но существенно уступает по точности измерения скорости света схеме работ [22, 23].

¹¹ Эта важная для понимания основ СТО работа переиздавалась с некоторыми изменениями [53–55].

не рассматривал, но и не отрицал возможность измерения скорости света для встречных направлений.

Имеет ли смысл проводить такой эксперимент? С нашей точки зрения, в этом нет необходимости. Результаты измерений [30] демонстрируют равенство скоростей света для ортогональных направлений распространения на уровне $2-3 \times 10^{-15}$. Очень трудно представить, что для встречных направлений распространения будет иметь место другая ситуация. Отметим, что эксперименты В.В. Рагульского [36–38] демонстрируют равенство коэффициентов преломления оптической среды и скоростей света для встречных направлений, соответственно, с точностью 5×10^{-8} и 5×10^{-10} , что также косвенно свидетельствует об изотропии скорости света в вакууме.

Тем не менее полезно оценить возможную точность предлагаемого метода измерения однонаправленной скорости света. Реальная точность измерений будет лимитироваться не скоростью "зайчика", которая может быть сделана произвольно большой, а длительностью световых импульсов и инерционностью и идентичностью устройств, запускающих световые импульсы от лазеров и часы. Если в качестве источника коротких световых импульсов использовать фемтосекундные лазеры с длительностью до 5–10 фс, а в качестве часов — квантовые стандарты с относительной стабильностью частоты 10^{-14} – 10^{-16} , то можно обеспечить точность измерения скорости света в лабораторных условиях до ± 30 м с⁻¹, т.е. на уровне 10^{-7} . Однако несмотря на то, что эта точность уступает точности современных экспериментов типа Майкельсона–Морли [30] и типа Гека–Рагульского [36–38]¹², предлагаемый тип измерений (в отличие от предложенных в [30] и [36–38]) является прямым, а не косвенным методом измерения однонаправленной скорости света.

В заключение автор выражает благодарность В.Л. Гинзбургу за обсуждение результатов работы и полезные замечания, позволившие существенно улучшить изложение материала, Б.М. Болотовскому за обсуждение ряда вопросов, Л.Б. Окуню, который в своем критическом отзыве на первый вариант моего письма указал на эксперименты Рагульского, не известные автору ранее, В.И. Поздняковой за помощь в работе. Работа частично поддержана грантом РФФИ № НШ-1622.2003.2.

Список литературы

1. Тяпкин А А *УФН* **106** 617 (1972); см. также Кадомцев Б Б, Келдыш Л В, Кобзарев И Ю, Сагдеев Р В *УФН* **106** 660 (1972)
2. Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 7 [Einstein A *Ann. Phys.* (Leipzig) **17** 891 (1905)]
3. Ritz W *Ann. Chim. Phys.* **8** (13) 145 (1908)
4. Ritz W *Arch. Sci. Phys. Nat. Geneva* **26** 209 (1908)
5. Majorana Q *Phys. Rev.* **11** 411 (1918)
6. Tomaschek R *Ann. Phys.* (Leipzig) **73** 125 (1924)
7. Бонч-Бруевич А М *ДАН СССР* **109** 481 (1956)
8. Alväger T, Farley F J, Kjellman J M, Wallin L *Phys. Lett.* **12** 260 (1964)
9. Kantor W J. *Opt. Soc. Am.* **52** 978 (1962)
10. Kantor W *Spectrosc. Lett.* **3** 303 (1970)
11. Kantor W *Spectrosc. Lett.* **3** 335 (1970)
12. Brecher K *Phys. Rev. Lett.* **39** 1051 (1977)
13. Франкфурт У И, Франк А М *Оптика движущихся тел* (М.: Наука, 1972)
14. Пуанкаре А, в сб. *Принцип относительности* (Сост. А А Тяпкин) (М.: Атомиздат, 1973) с. 12 [Poincaré H *Rev. Metaphys. Morale* **4** 1 (1898)]
15. Грюнбаум Ф *Философские проблемы пространства и времени* (М.: Прогресс, 1969) [Grünbaum A *Philosophical Problems of Space and Time* (New York: Knopf, 1963)]
16. Молчанов Ю Б, в сб. *Эйнштейновский сборник* (Под ред. И Е Тамма, Г И Наана) (М.: Наука, 1972) с. 226
17. Рейхенбах Г *Философия пространства и времени* (М.: Прогресс, 1985) [Reichenbach H *The Philosophy of Space and Time* (New York: Dover Publ., 1958)]
18. Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 530 [Einstein A *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* (Braunschweig: F. Vieweg, 1919)]
19. Fizeau H *CR Acad. Sci.* **29** 90 (1849)
20. Fizeau H *Ann. Phys.* (Leipzig) **79** 167 (1850)
21. Michelson A A *Am. J. Sci. Ser. III* **22** 120 (1881) [Майкельсон А А, в сб. *Творцы физической оптики* (Сост. У И Франкфурт) (М.: Наука, 1973) с. 223]
22. Michelson A A, Morley E W *Am. J. Sci. Ser. III* **34** 333 (1887)
23. Michelson A A, Morley E W *Philos. Mag. Ser. 5* **24** 449 (1887)
24. Kennedy R J, Thorndike E M *Phys. Rev.* **42** 400 (1932)
25. *Эфирный ветер* (Под ред. В А Ащоковского) (М.: Энергоатомиздат, 1993)
26. Вавилов С И "Экспериментальные основания теории относительности", в кн. *Собрание сочинений* Т. 4 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 9–109
27. Brillet A, Hall J L *Phys. Rev. Lett.* **42** 549 (1979)
28. Hils D, Hall J L *Phys. Rev. Lett.* **64** 1697 (1990)
29. Braxmaier C et al. *Phys. Rev. Lett.* **88** 010401 (2002)
30. Müller H et al. *Phys. Rev. Lett.* **91** 020401 (2003)
31. Эддингтон А С *Теория относительности* (Л.-М.: ГТТИ, 1934) [Eddington A S *The Mathematical Theory of Relativity* 2nd ed. (Cambridge: The Univ. Press, 1923)]
32. Hoek M *Arch. Neerl.* **3** 180 (1868)
33. Hoek M *Arch. Neerl.* **4** 443 (1869)
34. Уиттекер Э *История теории эфира и электричества* (М.–Ижевск: РХД, 2001) [Whittaker E T *A History of the Theories of Aether and Electricity* Vol. 1 (London: T Nelson, 1951)]
35. Marinov S *Indian. J. Theor. Phys.* **39** 267 (1991)
36. Рагульский В В *УФН* **167** 1022 (1997)
37. Ragulsky V V *Phys. Lett. A* **235** 125; **236** 609 (1997)
38. Рагульский В В *Изв. РАН. Сер. Физ.* **63** 818 (1999)
39. Кравцов Н В, Рагульский В В *Квантовая электрон.* **30** 1025 (2000)
40. Горелик Г С *ДАН СССР* **83** 549 (1952)
41. Берштейн И Л *УФН* **53** 631 (1953)
42. Френель О *Избранные труды по оптике* (М.: Гостехиздат, 1955) с. 516–526 [Fresnel A *Ann. Chim. Phys.* (9) **57** (1818)]
43. Arago F D *CR Acad. Sci.* **36** 38 (1853)
44. Marinov S *Czech. J. Phys. B* **24** 965 (1974)
45. Marinov S *Gen. Relativ. Grav.* **12** 57 (1980)
46. Маринов С, в сб. *Проблемы пространства и времени в современном естествознании* Т. 1, 2-е изд. (Сер. "Проблемы исследования вселенной", Вып. 15, Под ред. М П Варина и др.) (СПб.: Природа и мы, 1991) с. 357
47. Купряев Н В *Изв. вузов. Физика* **42** (7) 8 (1999)
48. Обухов Ю А, Захарченко И И *Физ. мысль России* (3) 71 (2001)
49. Costa de Beauregard O *La Théorie de la Relativité Restreinte* (Paris: Masson, 1949) p. 15
50. Тоннела М А *Основы электромагнетизма и теории относительности* (М.: ИЛ, 1962) с.126. [Tonnelat M A *Les Principes de la Théorie Électromagnétique et de la Relativité* (Paris: Masson, 1959)]
51. Гинзбург В Л *ЖЭТФ* **62** 173 (1972)
52. Болотовский Б М, Гинзбург В Л *УФН* **106** 577 (1972)
53. Болотовский Б М, Гинзбург В Л, в сб. *Эйнштейновский сборник 1973* (Под ред. В Л Гинзбурга) (М.: Наука, 1974) с. 212
54. Гинзбург В Л *Теоретическая физика и астрофизика: дополнительные главы* 2-е изд. (М.: Наука, 1981) с. 211
55. Гинзбург В Л *О теории относительности* (М.: Наука, 1979) с. 212
56. Болотовский Б М *Крат. сообщ. по физике ФИАН* (7) 34 (1972)
57. Болотовский Б М, Быков В П *УФН* **160** (6) 141 (1990)
58. Эйдман В Я *Изв. вузов. Радиофизика* **15** 634 (1972)
59. Гинзбург В Л *УФН* **103** 393 (1971)
60. Баранова Н Б, Скалли М О, Зельдович Б Я *ЖЭТФ* **105** 469 (1994)
61. Зельдович Б Я и др. *Квантовая электрон.* **23** 1128 (1996)

¹² Очевидно, что точность интерференционных измерений может на много порядков превышать точность временных измерений, поскольку первые позволяют регистрировать до 10^{-7} – 10^{-8} периода световых колебаний, точность же последних ограничена несколькими периодами световых колебаний.