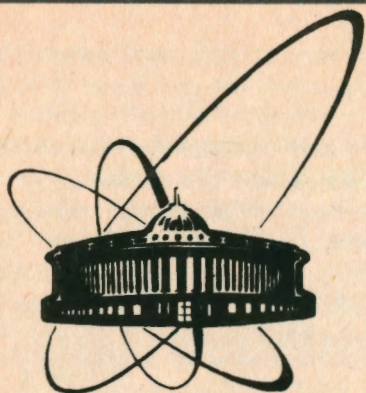


92-552



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

Д2-92-552

В.Н.Стрельцов

ОПЫТ АЙВСА — СТИЛУЭЛЛА
И РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДЛИНА

1992

Локационная формулировка теории относительности оперирует световыми, или запаздывающими, расстояниями и введенной на их основе релятивистской, или локационной, длиной. Следствием концепции релятивистской длины является формула удлинения. Прямым подтверждением ее справедливости (для средней длины волны света, испускаемого движущимися атомами в двух противоположных направлениях) служат опыты Айвса — Стилуэлла и др. по изучению квадратичного эффекта Доплера. При этом явление аберрации света следует рассматривать как первое проявление светового расстояния.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод автора

Strel'tsov V.N.

D2-92-552

Ives — Stilwell Experiment and Relativistic Length

The radar formulation of the relativistic theory operates with light or retarded distances and relativistic or radar length introduced on their basis. The elongation formula is the consequence of the relativistic length concept. The experiments of Ives and Stilwell and others on the study of quadratic Doppler effect are direct experimental confirmation of this formula (for mean wave length of light emitted by moving atoms in two opposite directions). In spite of this the aberration of light should be considered as the first manifestation of the light distance.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

«... законы всех физических событий ... совершенно одинаковы в бесконечном множестве систем отсчета, ... называемых инерциальными системами. ... результаты измерений всегда связаны друг с другом посредством преобразований Лоренца».

М. Борн [1].

ВВЕДЕНИЕ

Обычно опыт Майкельсона — Морли [2] рассматривается как «решающий» эксперимент, который послужил основанием для теории относительности. Хотя, по нашему мнению, имеется определенная недооценка его влияния на установление фундаментального принципа постоянства скорости света и вытекающей из него относительности одновременности [3]. Конечно, бесспорным следствием этого опыта надо считать гипотезу Фицджеральда — Лоренца. До настоящего времени явление сокращения продольных размеров движущихся тел считается одним из главных результатов теории относительности. Как было показано [3], обычная трактовка опыта Майкельсона — Морли существенным образом опирается на представление о твердых телах. Именно, плечи интерферометра мыслятся фактически в виде жестких стержней, что реализуется заданием их размеров посредством мгновенной (одновременной) длины, т.е. расстоянием между концами стержня, взятыми в один и тот же момент времени. Больше того, уже в рамках теории относительности согласно Эйнштейну [4] длина движущегося стержня определяется как расстояние между одновременными положениями его концов, т.е. опять-таки задается мгновенной длиной.

С другой стороны, привлечение локационной длины (выражаемой через световые расстояния) приводит к формуле удлинения для продольного плеча интерферометра [5]. Напомним, что локационной, или релятивистской, длиной называется полусумма расстояний, пройденных световым сигналом вдоль движущегося стержня (в прямом и обратном направлении).

ях). Основой этого определения служит радиолокационный метод измерения расстояний (см., например, [6]).

Но если опыт Майкельсона — Морли считается основой общепринятой в настоящее время эйнштейновской формулировки теории относительности, то выполненный почти 50 лет спустя эксперимент Айвса — Стилуэлла [7] можно рассматривать как свидетельство в пользу альтернативной, локационной формулировки. В этом опыте по исследованию квадратичного эффекта Доплера измерялась длина волны света, испускаемого движущимися атомами. А если учесть, что в настоящее время за эталон длины принята фактически длина волны, то опыты такого типа, очевидно, позволяют непосредственно проверить влияние движения на поведение эталона длины. Вообще же, основная область применимости теории относительности — это явления микромира. С одним из подобных явлений и имеет дело опыт Айвса — Стилуэлла.

Следует также заметить, что большое значение опытам такого типа придавал Эйнштейн [8]. Более того, по словам Зоммерфельда [9]: «Эйнштейн видел в ожидавшемся красном смещении *experimentum crucis* для теории относительности». По нашему мнению, значение этого опыта существенно недооценивается, особенно в свете современной (локационной) формулировки теории относительности (см., например, [10]) хотя, если уж быть последовательным до конца, то надо упомянуть и явление абберации [11], в котором впервые проявилось световое расстояние.

Поставленные вопросы и будут в основном предметом нашего последующего рассмотрения.

ОПЫТ АЙВСА — СТИЛУЭЛЛА

В обсуждаемом опыте определялось смещение средней длины волны отдельной спектральной линии, испускаемой движущимися атомами водорода. А именно, измерялась величина

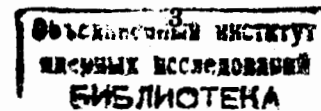
$$\lambda_r = \frac{1}{2}(\lambda_v + \lambda_n). \quad (1)$$

Здесь λ_v — длина волны света, испускаемого атомом в направлении движения (вперед), λ_n — в обратном направлении (назад). Полученное (красное) смещение

$$\delta\lambda = \lambda_r - \lambda^* \approx \frac{1}{2}\beta^2\lambda^*, \quad (2)$$

где βc — скорость движения атомов, подтверждает справедливость релятивистской формулы удлинения

$$\lambda_r = \lambda^*(1 - \beta^2)^{-1/2} = \lambda^*\gamma. \quad (3)$$



Здесь λ^* — длина волны света, испускаемого покоящимся атомом. Выражение (1) легко получить из общей формулы

$$\lambda = \lambda^*(1 - \beta \cos \theta) \gamma, \quad (4)$$

полагая $\theta_{\text{в}} = 0$ и $\theta_{\text{н}} = \pi$.

Заметим, что изменение длины волны при движении в сторону красного конца спектра (красное смещение) — достаточно хорошо известный факт, так же, как и сама формула (3) (см., например, [12]). Однако при этом совершенно упускается из виду то, что здесь по сути дела мы имеем другой (отличный от общепринятого) закон преобразования длины движущегося масштаба. Действительно, в формуле (3) λ описывает, например, расстояние между соседними гребнями волны, которые «берутся» в разные моменты времени. Тогда как согласно общепринятому (эйнштейновскому) определению длиной движущегося масштаба называется расстояние между одновременными положениями его концов. При этом в случае справедливости формулы сокращения эффект, очевидно, имел бы другой знак, т.е. смещение линий должно было бы происходить в фиолетовую сторону спектра.

Очевидно, что известная «классическая» процедура засечек для длины волны совершенно не применима. Больше того, как видно из формулы преобразования (4) для λ , угол наблюдения сокращенной длины волны зависит от скорости движения ($\cos \theta = \beta$). А это означает зависимость данного понятия от системы отсчета, характеристикой которой служит ее скорость движения. Но с точки зрения принципа относительности, подобная зависимость совершенно не допустима. Напротив, определение релятивистской длины волны на основе формулы (1) или поперечного эффекта Доплера ($\theta = \pi/2$) полностью удовлетворяет требованию принципа относительности, поскольку не зависит от системы отсчета.

Таким образом, можно сказать, что на микроуровне сокращенная длина является чуждым элементом. Это же подтверждает и детальный анализ пространственных соотношений, реализуемых в физике высоких энергий [13].

КОНЦЕПЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДЛИНЫ (КРД)

Измерительная (локационная) процедура, служащая основой КРД [14], мыслилась первоначально (по аналогии с эйнштейновской [4]) как макроскопическая. Именно, известный радиолокационный метод измерения расстояний был применен к движущемуся стержню. Напомним, что согласно КРД релятивистской, или локационной, длиной l_r (такого стержня) называется полусумма расстояний, пройденных световым или радиосигна-

лом в направлении движения ($l_{\text{в}}$) стержня и обратно ($l_{\text{н}}$), т.е. в двух противоположных направлениях. В дальнейшем [15] пришло понимание того, что $l_{\text{в}}$ в точности соответствует запаздывающему (R_{ret}), а $l_{\text{н}}$ — опережающему (R_{adv}) расстояниям в электродинамике. С учетом этого по определению

$$l_r = \frac{1}{2}(R_{\text{ret}} + R_{\text{adv}}) = l^* \gamma, \quad (5)$$

где l^* — длина данного стержня в покое.

Следует подчеркнуть, что запаздывающее расстояние* — это расстояние между точками, которые берутся в разные моменты времени. При этом величина неодновременности составляет R_{ret}/c . Как известно, рассматриваемые «неодновременные расстояния» обязаны своим происхождением запаздывающим потенциалам, или потенциалам Лиенара — Вихерта. Синонимом R_{ret} является световое расстояние, которое, в частности, определяет угол aberrации. Отметим, что в терминах запаздывающих расстояний эквипотенциальные поверхности электрического поля движущегося заряда имеют форму эллипсоидов вращения, вытянутых в направлении движения [17]. С помощью сравнения потенциала Лиенара — Вихерта и кулоновского потенциала легко получить формулу преобразования запаздывающего расстояния [16]:

$$R_{\text{ret}} = R^* [(1 - \beta \cos \theta) \gamma]^{-1}. \quad (6)$$

Полагая $\theta = 0$ и π , приходим к соответствующим выражениям для величин, фигурирующих в (5); отсюда с учетом $R^* = l^*$ следует формула удлинения. Однако обычно в электродинамике переходят к «мгновенным расстояниям» (см., например, [18]), которые связывают точку наблюдения (в «настоящий момент») с «истинным» положением заряда, т.е. его положением в тот же момент времени**. В случае движущегося со скоростью $v = \beta c$ заряда соответствующая формула имеет вид

$$R_{\text{in}} = R_{\text{ret}} - \beta R_{\text{ret}}. \quad (7)$$

В случае заряда, движущегося вдоль оси X , представим (7) в компонентах

$$R_{\text{in}} \cos \theta_i = R_{\text{ret}} (\cos \theta_r - \beta), \quad R_{\text{in}} \sin \theta_i = R_{\text{ret}} \sin \theta_r; \quad (8)$$

*В дальнейшем для краткости под этим термином мы будем понимать оба указанных понятия. Тем более, что при замене угла наблюдения $\theta \rightarrow \pi + \theta$ они переходят друг в друга [16].

**Что отвечает духу общепринятого определения длины стержня как расстояния между одновременными положениями его конца.

откуда следует, что «мгновенный» и «запаздывающий» углы связаны соотношением

$$\operatorname{ctg} \theta_l = \frac{\cos \theta_r - \beta}{\sin \theta_r}. \quad (9)$$

Следуя терминологии Дирака, мы имеем здесь переход к мгновенной форме теории относительности [19].

Поскольку электромагнитное поле действует на большие расстояния, то величина R_{ret} может, очевидно, принимать макроскопические значения. С другой стороны, длина световой волны, речь о которой шла выше, может рассматриваться как микроскопическая реализация запаздывающего расстояния. Хотя в этом случае все же лучше использовать термин «световое расстояние».

ЭФФЕКТ БРЕДЛИ

Обнаруженная Бредли абберация, или отклонение, света звезд [11] явилась результатом серии точных измерений кажущихся сезонных изменений положения звезд, в частности звезды γ Дракона. Было установлено, что указанные положения несколько смещаются в направлении движения Земли. Для звезды, находящейся в зените, абберация является максимальной. При этом угол наклона телескопа определяется равенством

$$\operatorname{tg} \alpha = v/c, \quad (10)$$

где v — скорость Земли.

Для нас здесь существенно то, что в этом явлении впервые проявилось упомянутое световое расстояние (R_l), т.е. расстояние между точками, которым отвечают разные моменты времени, причем «степень неодновременности» $\Delta t = R_l/c$. Согласно современным воззрениям свет представляет собою совокупность (реальных) фотонов*, тогда как электромагнитное поле описывается множеством виртуальных фотонов. При этом, например, в процессе излучения (движущегося заряда) виртуальные фотоны просто превращаются в реальные. Таким образом, сходство поведения R_l и R_{ret} имеет глубокую физическую природу. Следует отметить, что неявное применение R_l исторически значительно опередило возникновение «главного пользователя» этого понятия — теорию относительности, а тем более ее локационную формулировку.

*Интересно, что Бредли оперировал частицами света.

Переходя к дополнительному («абберационному») углу $\alpha = \pi/2 - \theta$, перепишем формулу (9) в виде

$$\operatorname{tg} \alpha_l = \frac{\sin \alpha_r - \beta}{\cos \alpha_r}, \quad (11)$$

где мы также заменили индекс «r» на «l». С учетом малости α_r для звезд в полюсе эклиптики $\sin \alpha_l \approx \alpha_l \approx \beta$, $\cos \alpha_l \approx 1$. Откуда следует, что в терминах мгновенных расстояний, а следовательно, в рамках общепринятого подхода абберация не должна иметь места [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, опыт Айвса — Стилуэлла является прямым экспериментальным подтверждением локационной формулировки (и в частности, формулы удлинения) в области микромира. Эффект аббераций можно считать самым первым проявлением указанного подхода к макроскопическим объектам, хотя и кажущимся нам малыми.

ПРИЛОЖЕНИЕ (Что видит летящий мюон)

«Мюонный эксперимент многогранен. Он подтверждает целых три предсказания теории относительности: замедление хода времени, сокращение длин и сходное релятивистское поведение часов всех типов».

Б.Гоффман [21].

Мюоны суть элементарные частицы, входящие в состав космических лучей. Образующиеся в верхних слоях атмосферы, они движутся со скоростями, очень близкими к скорости света. Мы не будем касаться «временной стороны» приведенной цитаты, а остановимся только на довольно известном утверждении, что летящий мезон «видит» земные длины сокращенными (см., например, [16]). А это, в свою очередь, ведет к увеличению его времени жизни.

Рассмотрим поведение мюонов с точки зрения двух наблюдателей. На рис. 1 представлена картина, которую видит наблюдатель, покоящийся относительно Земли. Давайте теперь проанализируем ту же самую ситуацию

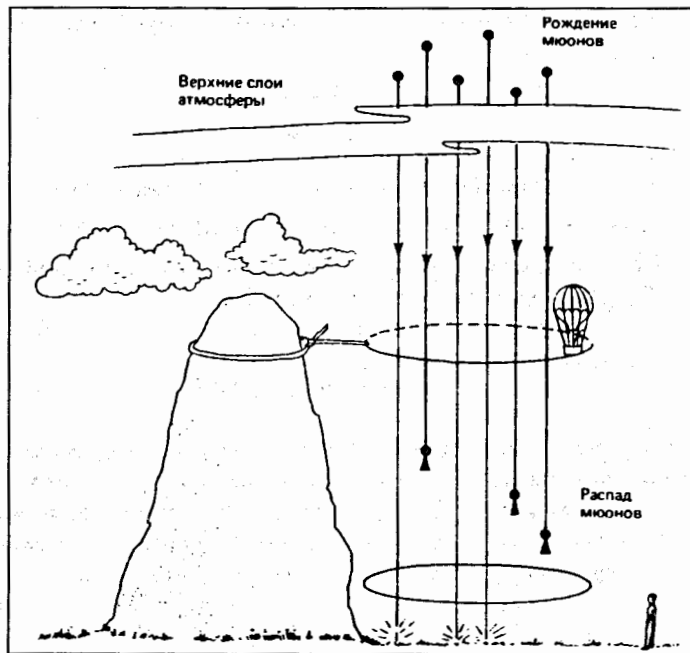


Рис.1

с точки зрения наблюдателя, движущегося вместе с мюоном. Этот μ -наблюдатель увидит, что Земля приближается к нему (а значит и к мюону) почти со скоростью света, в результате чего она претерпевает сокращения «длины» [21]. Например, расстояние между вершиной горы для μ -наблюдателя много меньше, чем для наблюдателя, стоящего на поверхности Земли (рис.2). С «точки зрения» мюона, скорость которого $v_1 = 0,998 c$, высота горы меньше в 16 раз, чем для земного наблюдателя. С «точки зрения» друго-

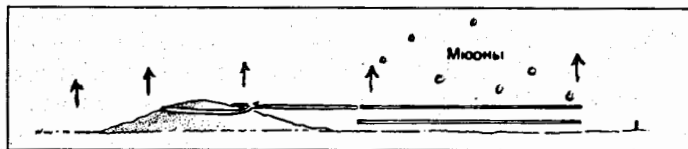


Рис.2

го мюона, скорость которого $v_2 = 0,992 c$, эта высота меньше в 8 раз. Из сказанного следует, что за время своего существования первый, более быстрый, мюон пройдет вдвое меньшее расстояние, чем второй. А поскольку $v_1 \approx v_2 \approx c$, то так же должны соотноситься их времена жизни. Но, как мы знаем, в действительности первый мюон живет вдвое дольше, чем второй. Таким образом, мы пришли к парадоксу. Проанализируем поэтому внимательно наши прежние рассуждения.

Строго говоря, сам по себе опыт по определению времени жизни движущихся мезонов не может дать ответа на вопрос о поведении размеров движущихся объектов. Обычно же его неявно дополняют условием, что мюон (или μ -наблюдатель) может также фиксировать видимые размеры объектов, мимо которых он пролетает. При этом, как известно [22,23]*, видимая высота приближающейся к мюону горы не только не будет испытывать лоренцева сокращения, а напротив, будет больше земной пропорционально γ . Тогда, очевидно, жить дольше будет более быстрый мюон, что полностью соответствует формуле замедления времени. Тем самым парадокс устраняется, и устранение его обусловлено отказом от формулы сокращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М. — Эйнштейновская теория относительности, М.: Мир, 1964, а) с.370, б) с.315.
2. Michelson A., Morley E.W. — Am. J. Sci., 1987, 34, p.333.
3. Стрельцов В.Н. — Сообщ. ОИЯИ P2-91-569, Дубна, 1991.
4. Эйнштейн А. — Собр. научных трудов. М.: Наука, 1965, т.1, с.12.
5. Стрельцов В.Н. — Сообщ. ОИЯИ Д2-91-125, Дубна, 1991.
6. Strel'tsov V.N. — Found. Phys., 1976, 6, p.293.
7. Ives H.E., Stilwell G.R. — J. Opt. Soc. Am., 1938, 28, p.215.
8. Эйнштейн А. — Собр. научных трудов, М.: Наука, 1965, т.1, с.49.
9. Зоммерфельд А. — Электродинамика. М.: ИИЛ, 1958, с.316.
10. Стрельцов В.Н. — Сообщ. ОИЯИ Д2-92-3416 Дубна, 1992.
11. Bradley J. — Phil. Trans. Roy. Soc. London A, 1728, 35, p.637.
12. Дитчберн Р. — Физическая оптика. М.: Наука, 1965, с.327.
13. Стрельцов В.Н. — ЭЧАЯ, 1991, 22, с.1129.

*Общую формулу, описывающую поведение видимых размеров движущихся объектов, можно найти в [24]. Весьма знаменательно, что в работе Террелла «Невидимость лоренцева сокращения» [22] наряду с общеизвестным примером рассмотрен случай, когда длина движущегося стержня определяется именно формулой удлинения (5).

14. Idem — Сообщ. ОИЯИ P2-5555, Дубна, 1971; P2-6709, Дубна, 1972.
15. Idem — Сообщ. ОИЯИ P2-7647, Дубна, 1973.
16. Idem — Сообщ. ОИЯИ Д2-92-147, Дубна, 1992.
17. Idem — Сообщ. ОИЯИ Д2-82-234, Дубна, 1989.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. — Теория поля, М.: Наука, 1988, с.217.
19. Стрельцов В.Н. — Сообщ. ОИЯИ Д2-92-63, Дубна, 1992.
20. Idem — Сообщ. ОИЯИ E2-92-160, Дубна, 1992.
21. Гоффман Б. — Корни теории относительности, М.: Знание, 1987, с.172.
22. Terrell J. — Phys. Rev., 1959, 116, P.1041.
23. Weinstein R. — Am. J. Phys., 1960, 28, p.607.
24. Стрельцов В.Н. — Сообщ. ОИЯИ Д2-92-435, Дубна, 1992.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 декабря 1992 года.