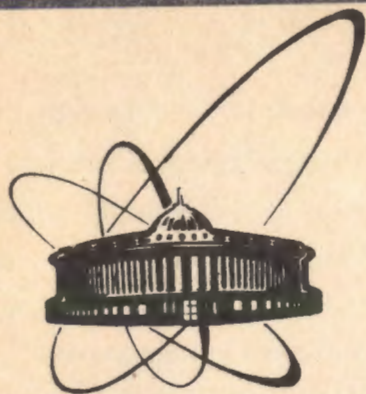


91-569



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

P2-91-569

В. Н. Стрельцов

ОБ ОПЫТЕ МАЙКЕЛЬСОНА-МОРЛИ

1991

ВВЕДЕНИЕ

До сих пор существуют достаточно противоречивые мнения о роли опыта Майкельсона-Морли [1] в открытии и становлении теории относительности*, хотя подавляющее большинство все же рассматривает его как "решающий" эксперимент, который привел к научной революции и далеко идущим следствиям.

По нашему мнению, существует определенная недооценка влияния опыта Майкельсона-Морли на установление фундаментального принципа постоянства скорости света, и как его практического следствия - на установление относительности одновременности. Конечно, бесспорным результатом этого эксперимента следует считать гипотезу Фидже-ральда-Лоренца. До настоящего времени явление сокращения продольных размеров движущихся тел рассматривается как один из главных результатов теории относительности. Как нам кажется, далеко не все выводы были извлечены из полученного отрицательного результата. Как это ни странно, но такими же недостатками страдают и ретроспективные суждения о значении опыта Майкельсона-Морли. Может быть, как раз с этим и связана встречающаяся недооценка роли этого эксперимента.

Эти и другие вопросы будут предметом нашего последующего рассмотрения.

I. ПОСТАНОВКА ОПЫТА МАЙКЕЛЬСОНА

Идея самого известного опыта по обнаружению эффекта движения Земли сквозь светонесущий эфир основывалась на сравнении времен распространения световых лучей в двух взаимно перпендикулярных направлениях [4].

* В этой связи см., например, [2,3].

При расчете времени прохождения света вдоль продольного плеча интерферометра (ab) учитывалось, что скорость света в направлении движения Земли (навстречу "эфирному ветру") равна $c-v$. В обратном же направлении (когда "эфирный ветер" "подгоняет" световой сигнал) она составляет $c+v$. Здесь v - скорость движения Земли относительно эфира. Откуда для соответствующих времен имеем

$$t_{ab} = \frac{L}{c-v}, \quad (1)$$

$$t_{ba} = \frac{L}{c+v}. \quad (2)$$

Суммарное же время составит

$$t_{\parallel} = \frac{2cL}{c^2 - v^2} = 2 \frac{L}{c} (1 - \beta^2)^{-1}. \quad (3)$$

Когда свет распространяется вдоль другого (перпендикулярного) плеча влияние "эфирного ветра" меньше. Оно приводит к уменьшению скорости света до величины $(c^2 - v^2)^{1/2}$. В результате для соответствующего времени имеем

$$t_{\perp} = 2 \frac{L}{c} (1 - \beta^2)^{-1/2} = 2 \frac{L}{c} \gamma. \quad (4)$$

Таким образом, ожидавшийся эффект запаздывания должен был составить

$$\Delta t \approx \frac{L}{c} \beta^2. \quad (5)$$

Представленные вычисления относятся, очевидно, к системе отсчета, связанной с Землей (З-система). Ниже (в п.2) мы рассмотрим подобные расчеты с точки зрения эфира или С-системы (если, как полагают, скоростью движения Солнечной системы относительно эфира можно пренебречь).

2. ТЕОРЕМА ВЗАИМОСВЯЗИ

Теорема. Если длина движущегося стержня задается мгновенной длиной, то скорость распространения света вдоль стержня (в его системе покоя) является непостоянной величиной. (Здесь подразумевается, что твердый стержень (ab) движется вдоль своего максимального размера. Мгновенная или одновременная длина - это расстояние между концами стержня, взятыми в один и тот же момент времени).

Для доказательства теоремы подсчитаем время прохождения света от левого конца стержня (a) до правого (b) и обратно*. Пусть время "туда", когда свет догоняет правый конец, равно t_{ab} , а обратно t_{ba} . Очевидно, что пока свет движется к b , правый конец, который в момент $t=0$ посылки света находился на расстоянии L^{**} , уйдет на расстояние $v t_{ab}$. Так что свету придется пройти путь $L + v t_{ab}$ со скоростью c . Этот путь поэтому можно обозначить и как $c t_{ab}$, следовательно,

$$c t_{ab} = L + v t_{ab}, \quad (6)$$

откуда для времени t_{ab} получим формулу (1). На обратном пути, поскольку левый конец движется навстречу световому сигналу, свет пройдет только $L - v t_{ba}$. Тогда

$$c t_{ba} = L - v t_{ba}, \quad (7)$$

откуда для t_{ba} получим формулу (2). Но выше мы пришли к этим формулам, учтя, что в результате движения продольного плеча (того же стержня) сквозь эфир в первом случае скорость света меньше, а во

* Эти расчеты соответствуют, очевидно, С-системе.

** Именно здесь неявно предполагается, что L - одновременная или мгновенная длина.

втором: больше c , т.е. непостоянна. Таким образом, прямую теорему можно считать доказанной.

Легко показать, что справедлива и обратная теорема. Действительно, исходя из выражений (1) и (2), которые получены на основе галилеевского правила сложения скоростей (приводящего к непостоянству скорости света), и умножая обе стороны на $c - v$ и $c + v$ соответственно, приходим к формулам (6) и (7). А поскольку последние формулы опираются на представление о мгновенной длине, то обратную теорему также можно считать доказанной.

Доказанная (прямая) теорема свидетельствует, что бытующее представление об отсутствии связи между введением мгновенной длины и существованием бесконечной скорости распространения взаимодействий не совсем верно. В самом деле, при больших значениях v и, в частности, в результате ряда последовательных сложений скоростей можно получить суммарную величину, превосходящую любое, наперед заданное значение.

Лемма. Мгновенная длина является физическим следствием существования взаимодействий, передающихся с бесконечной скоростью.

Для доказательства этой леммы рассмотрим твердый (недеформируемый) покоящийся стержень (ab). Пусть в момент времени $t = 0$ вместе с посылкой светового сигнала к его левому концу (a) в том же направлении (т.е. вдоль стержня) прикладывается очень короткий импульс силы. Как известно, недеформируемость предполагает, что возмущение, например, от одного конца стержня к другому распространяется практически мгновенно. А это значит, что в тот же момент времени $t = 0$ весь стержень придет в движение (например, со скоростью v). При этом очевидно, что свет догонит правый конец через время t , которое определяется из равенства

$$ct = L + vt. \quad (8)$$

Ясно, что здесь мгновенная длина L выражает уже нечто большее* чем просто расстояние между одновременными положениями концов при выводе формулы (6). Действительно, последнее равенство получено непосредственно на основе условия существования взаимодействий, распространяющихся с бесконечной скоростью. Впрочем, выше при выводе формул (1) и (2) мы фактически опирались на условие непостоянства скорости света, которое допускает и какие угодно большие, т.е. в принципе и бесконечные, значения скорости.

С другой стороны, если считать, что возмущение передается со скоростью c , то в рассматриваемом примере правый конец стержня придет в движение только через время t . Таким образом, возмущение и световой сигнал достигнут правого конца одновременно, поэтому теперь вместо (8) будем иметь

$$ct = l. \quad (9)$$

Здесь l представляет "световую длину", которая задается уже расстоянием между неодновременными положениями концов стержня.

И еще одно замечание общего характера. Проведенные в двух разных системах отсчета вычисления эффекта дали один и тот же результат. Таким образом, и в теории неподвижного эфира в каком-то смысле можно говорить о выполнении принципа относительности.

* Имеет, так сказать, оттенок "динамичности".

3. СЛЕДСТВИЯ ОПЫТА МАЙКЕЛЬСОНА-МОРЛИ

Отсутствие сдвига интерференционных полос в усовершенствованном опыте Майкельсона-Морли, указывавшего на равенство $t_{||}$ и t_{\perp} , привело Фицджеральда [5] и Лоренца [6] к гипотезе, что все движущиеся тела должны испытывать сжатие в направлении движения.

Поскольку приведенные в п. 1 расчеты базировались на существовании (неподвижного) светоносного эфира, то, казалось бы, отрицательный результат опыта должен был вести к отказу от выделенной или абсолютной системы отсчета, связываемой с эфиром. А это, в свою очередь, должно было означать постоянство (инвариантность) скорости света, т.к. в противном случае система отсчета, относительно которой эта скорость равна C , опять-таки становилась бы выделенной.

С другой стороны, подчеркнем снова, непостоянство скорости света - это, фактически, следствие галилеевского правила сложения скоростей. Именно на его основе рассчитывалось, например, время распространения света вдоль продольного плеча интерферометра в формулах (1) и (2). Но это правило, в свою очередь, является следствием преобразований Галилея. Поэтому отрицательный результат опыта Майкельсона-Морли должен был, по существу, означать отказ от преобразований Галилея.

Вместе с тем введение сокращения Фицджеральда-Лоренца также означает отказ от преобразований Галилея*, поскольку согласно им (мгновенная) длина не преобразуется при переходе от покоящейся системы отсчета к движущейся. Иными словами, продольные размеры движущихся тел не должны изменяться. Но отказ от преобразований

*Или, может быть, точнее, замену их другими, которые переходят в галилеевские, когда членами порядка β^2 можно пренебречь.

Галилея должен означать, естественно, и отказ от галилеевского правила сложения скоростей и, следовательно, от приведенных в п. 1 формул для $t_{||}$ и t_{\perp} . А ведь именно условие равенства этих величин послужило основой для введения сокращения Фицджеральда-Лоренца. Поэтому нельзя согласиться с замечанием Эйнштейна [7], что, как якобы показал Лоренц, результат эксперимента Майкельсона-Морли по крайней мере не противоречит теории покоящегося эфира.

С учетом приведенных замечаний представляется самым разумным принять наиболее распространенную точку зрения на результат эксперимента (см., например, [8]). А именно, что "эфирный ветер" не существует, и скорость света не испытывает влияние движения Земли, т.е. является инвариантной величиной. Но коль скоро это так, то мы должны пересмотреть прежний вывод и в формулах (1) - (4) для величины скорости света взять C . Тогда, очевидно, времена $t_{||}$ и t_{\perp} будут равны и сдвига полос действительно не должно быть.

Как мы показали выше, формулы (1) и (2) взаимосвязаны с формулами (5) и (6), а поэтому встает вопрос: как теперь должна измениться трактовка опыта с точки зрения C -системы? Если для t_{\perp} сохранится прежнее значение, то с учетом предельности или постоянства скорости света выражения (6) и (7) мы должны заменить формулами вида (9), зависящими от световых расстояний (см., например, [9]). При этом для суммарного времени будем иметь

$$t_{||} = 2 \frac{l_{\perp}}{c} \quad (10)$$

Здесь индекс "L" показывает, что введенная таким образом длина соответствует локационному методу измерения расстояний. Чтобы теперь объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона-Морли, с точки зрения С-системы, нужно приравнять выражения (10) и (4). С учетом того, что фигурирующая в формуле (4) длина поперечного плеча по сути дела представляет длину в покое l^* , найдем

$$l_L = l^* \gamma, \quad (11)$$

откуда следует, что длина продольного плеча при движении должна возрастать.

4. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

На первый взгляд кажется, что указанная в заглавии проблема прямо не связана с результатом опыта Майкельсона-Морли. Однако согласно широко принятому мнению его главным результатом, как мы уже отмечали, было установление неизменности скорости света *. А, как известно, именно на основе принципа постоянства скорости света Эйнштейном позднее был сделан вывод [10], что не следует придавать абсолютного (или инвариантного) значения понятию одновременности. Но как только пришло понимание этого, то, казалось бы, следовало тут же отказаться и от мгновенной (одновременной) длины. Однако до сих пор общепринятое изложение теории относительности, по существу, опирается на понятие мгновенного расстояния. Напомним, что согласно Эйнштейну длиной движущегося стержня называется расстояние между одновременными положениями его концов.

*Поскольку скорость света является максимальной из известных скоростей физических сигналов, то это должно было означать и существование предельной скорости передачи всякого взаимодействия.

Очевидно, что это определение охватывает и какие угодно малые скорости движения, т.е. в пределе относится и к покоящимся телам.

Но, как в свое время заметил Гамба [11], результаты вычислений, в которых фигурируют величины, зависящие от мгновенных расстояний, в разных системах отсчета должны относиться к различным совокупностям физических событий*. В то время как преобразования Лоренца, которые по выражению Майкельсона "... содержат суть всей теории относительности" [13], имеют дело с одной и той же совокупностью событий. Поэтому, чтобы удовлетворить последнему условию, мы должны отказаться от мгновенных расстояний. С другой стороны, это требование будет автоматически выполнено, если вместо мгновенных расстояний мы будем опираться на "приготовленные природой" световые или запаздывающие расстояния.

Таким образом, если уж не вытекающий из опыта Майкельсона-Морли принцип постоянства скорости света, то, во всяком случае, осознание базирующегося на этом факте относительности понятия одновременности все же заставляет нас отказаться от мгновенных расстояний.

5. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (в окончательном виде)

В дальнейшем мы намерены, по возможности, отойти от прежнего названия "локационная формулировка". Этот термин** уже выполнил свое назначение в "переходный период". Хотя его использование породило представление, что выбор одной из двух возможных формулировок просто дело вкуса.

Напомним, что локационная формулировка теории относительности (см., например, [14, 15]) имеет дело с непосредственно наблюдае-

* Именно подобные вычисления импульса и энергии электромагнитного поля заряда приводят нас к трудности, известной как "проблема 4/3" (см., например, [12]).

** Подразумевается, что он охватывает и более раннее название "асинхронная формулировка".

мыми на опыте световыми или запаздывающими расстояниями и измеряемой локационным методом релятивистской или локационной длиной. Иными словами, эта формулировка оперирует с расстояниями между точками, взятыми в разные моменты времени, т.е. с "неодновременными расстояниями".

Как мы показали выше, детальный анализ прежней трактовки опыта Майкельсона-Морли однозначно свидетельствует в пользу этой формулировки. Здесь следует отметить, что рассматриваемому опыту значительно предшествовало установление Брэдлеем явления аберрации света звезд [16]. Причем угол аберрации определялся именно световым или запаздывающим расстоянием от источника (звезды) до точки наблюдения. Поэтому можно сказать, что элементы локационной формулировки зародились значительно раньше общепринятого (эйнштейновского) подхода. В свете всего сказанного традиционный подход следовало бы (согласно Дираку [17]) скорее называть "мгновенной формой" теории относительности.

Конечно, с математической точки зрения, можно все формулы, зависящие от запаздывающих расстояний, выразить через мгновенные расстояния, как это, скажем, и делается в электродинамике (см., например, [18]). Однако, при последовательном учете условия 4-ковариантности, в этом случае обнаруживаются серьезные трудности. Одним из характерных примеров здесь может служить неравенство нулю импульса электромагнитного поля покоящегося заряда ($\vec{G}^* \neq 0$)* при решении упомянутой "проблемы 4/3" в рамках традиционного подхода (см., например, снова [12], а также [19]). В данном случае, чтобы устранить указанную трудность, условие математической ковариантности мы должны дополнить физическим требованием: $\vec{G}^* = 0$. Но такой путь, когда в каждом конкретном случае вводится

"свое" физическое требование, вызывает естественное чувство неудовлетворенности. Все подобные требования будут автоматически выполнены, если при обобщении (распространении) такого фундаментального понятия, как длина, на быстрые движения в полной мере опираться на принцип относительности. Это понятие, в свою очередь, выражается через более простые. Так вот, согласно принципу относительности все указанные понятия не должны зависеть от системы отсчета, т.е. быть инвариантными. Этому требованию, как мы уже отмечали, безусловно не удовлетворяет понятие одновременности. А ведь именно на него опирается общепринятое (эйнштейновское) определение длины движущегося стержня [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя, как отмечает Эйнштейн [7], теория Лоренца объяснила все известные в то время электромагнитные и оптические процессы, она обладала одним существенным недостатком: опиралась на гипотезу покоящегося эфира. Причем эфир выступал как бы воплощением абсолютно покоящегося пространства. Чтобы объяснить отрицательный результат эксперимента Майкельсона-Морли в рамках эфирной теории Фицджеральду и Лоренцу пришлось ввести гипотезу сокращения. При этом они существенно опирались на понятие мгновенной длины (расстояния). Теория относительности основывалась на эквивалентности всех инерциальных систем отсчета. Тем самым устранив предпочтение особой системы, связанной с покоящимся светоносным эфиром. Больше того, эта теория модифицировала временные понятия, установив, в частности, относительность одновременности. Однако при этом основной пространственных отношений остались по-прежнему мгновенные расстояния. Только после отказа от мгновенных расстояний - последнего атрибута ньютоновской физики - построение "полностью релятиви-

* И, напротив, обращение в нуль импульса поля в некоторой системе отсчета, не совпадающей с системой покоя заряда.

стской" теории относительности можно считать завершенным. И в этом, по нашему мнению, определенная заслуга принадлежит опыту Майкельсона-Морли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Michelson A.A. and Morley E.W. - Phil. Mag. 1887, 24, p.449.
2. Пайс А. - Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна, М.: Наука, 1989, часть Ш.
3. Холтон Д. - Эйнштейновский сборник 1972, М.: Наука, 1974, с.104.
4. Michelson A.-Am. J.Sci. 1881, 22, p.120.
5. Fitzgerald G.E. - Science 1889, 13, p.390.
6. Lorentz H.A. - Versl. K. Akad Wet. 1892, I, p.74.
7. Эйнштейн А. - Собр.научных трудов, М.: Наука, 1966, с. 752.
8. Born M.-Die Relativitätstheorie Einsteins (Berlin, Springer, 1920) p.158.
9. Стрельцов В.Н. - Сообщение ОИЯИ Д2-91-125, Дубна, 1991.
10. Einstein A. - Ann.Phys. 1905, 17, p.891.
11. Gamba A. - Am. J.Phys. 1967, 35, p.83.
12. Strel'tsov V.N. - Hadronic J. 1990, 13, p.345.
13. Michelson A. - Astrophys. J: 1928, 68, p.344.
14. Стрельцов В.Н. - Сообщения ОИЯИ P2-426 и P2-90-484, Дубна, 1990.
15. Idem - Сообщение ОИЯИ Д2-91-436, Дубна, 1991.
16. Bradley J. - Phil.Trans.Roy Soc.London A, 1728, 35, p.722.
17. Дирак П.А.М.- К созданию квантовой теории поля, М.:Наука, 1990, с.284
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. - Теория поля, М.: Наука, 1988, с. 218.
19. Полубаринов И.В. - Сообщение ОИЯИ P2-7532, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел

27 декабря 1991 года.