

# «Релятивистское» замедление времени и относительность одновременности

Валерий ПЕТРОВ

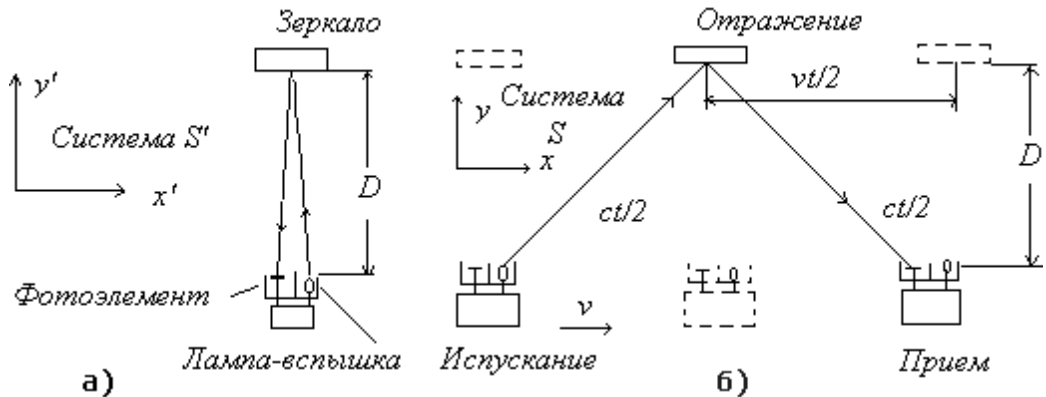
## Введение

Как следует из анализа опыта Майкельсона – Морли (см. статью «Опыт Майкельсона – Морли и гипотеза Френеля»), сокращение длины одного из плеч интерферометра, если такое сокращение имеет место в действительности, должно быть пропорционально величине  $1 - v^2/c^2$ , а не величине  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  как считается в настоящее время. Однако при значении коэффициента сокращения длины, равном  $1 - v^2/c^2$ , преобразования Лоренца-Эйнштейна теряют какой бы то ни было смысл, так как при этом оказывается невозможным вывести обратные преобразования координат пространства и интервалов времени для перехода из движущейся системы координат в неподвижную. С другой стороны, сокращению длины пропорционально множителю  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  (согласимся на время, что этот множитель имеет смысл) должно соответствовать такое же *сокращение*, а не увеличение интервалов времени, произошедших в движущейся системе координат при их наблюдении из неподвижной системы координат, иначе не выполняется принцип постоянства скорости света. Другими словами, сокращению длины тел (расстояний между двумя точками пространства) в движущейся системе координат должно соответствовать ускорение, а не замедление времени в той же системе координат. Тем не менее, общепринятым является мнение, что именно замедление времени соответствует реальной физической действительности. Посмотрим, насколько это мнение является обоснованным.

## Замедление времени: гипотетические эксперименты

Как объясняет лауреат Нобелевской премии по физике Р. Фейнман в [1] «Замедление хода часов в движущейся системе – явление весьма своеобраз-

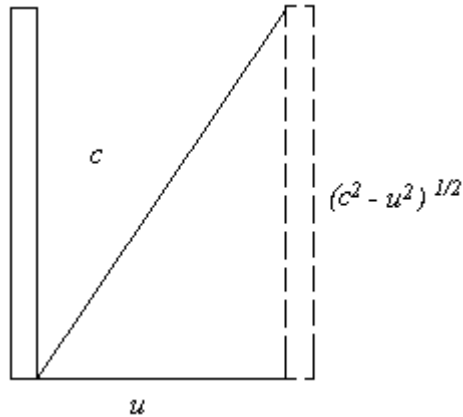
разное, и его стоит пояснить. Чтобы понять его, давайте проследим, что бывает с часовым механизмом, когда часы движутся. Пусть это будет стержень (метровой длины) с зеркалами на обоих концах. Если пустить световой сигнал между зеркалами, то он будет без конца бегать туда-сюда, а часы будут тикать каждый раз, как только свет достигнет нижнего конца. Конструкция довольно глупая, но в принципе такие часы возможны. Дадим одни часы космонавту; пусть он возьмет их с собой на межпланетный корабль и поставит поперек направления движения, тогда длина стержня не изменится. Принцип относительности утверждает, что в равномерно движущейся системе... в часах никаких изменений не произошло (с точки зрения космонавта, движущегося вместе с часами – *В.П.*). С другой стороны, когда внешний наблюдатель взглянет на пролетающие мимо часы, он увидит, что свет, перебегая от зеркала к зеркалу, на самом деле движется зигзагами, потому что стержень все время перемещается боком. Мы уже анализировали такое зигзагообразное движение в связи с опытом Майкельсона-Морли. Когда за заданное время стержень сдвинется на расстояние, пропорциональное  $u$  (рис. 1), то расстояние, пройденное за то же время светом, будет пропорционально  $c$ , и поэтому расстояние по вертикали пропорционально  $\sqrt{c^2 - u^2}$ .



**Рис. 1.** Опыт со «световыми часами»

а) – «световые часы» покоятся в системе  $S'$ ;

б) – те же часы, движущиеся через систему  $S$ ;  $\sqrt{c^2 - v^2}$ ;



в) – диагональ, по которой движется пучок света в движущихся «световых часах»

Значит, свету понадобится *больше времени*, чтобы пройти движущийся стержень из конца в конец, – больше, чем когда стержень неподвижен. Поэтому кажущийся промежуток времени между тиканьями движущихся часов удлинится в той же пропорции, во сколько гипотенуза треугольника длиннее катета (из-за этого в формуле и появляется корень). Из рисунка также видно, что чем  $u$  больше, тем сильнее видимое замедление хода часов. И не только такие часы начнут отставать, но (если только теория относительности правильная!) любые часы, основанные на любом принципе, также должны отстать, причем в том же отношении».

Таким образом, как и в опыте Майкельсона – Морли, мы должны выяснить, как же в действительности движется луч света в движущейся и неподвижной системах координат.

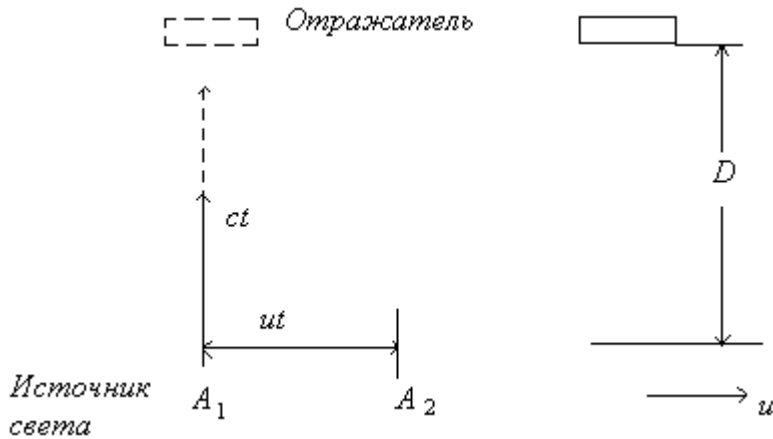
В движущейся системе координат движение системы никак не сказывается на траектории движения «пучка света» от источника к отражателю и обратно, так как мы заранее предполагаем истинность принципа относительности в том виде, как его сформулировал Эйнштейн. Применительно к опыту Майкельсона – Морли это означает, что  $T_{\perp} = 2L/c$ . Так как  $T_{\perp}$  в этом опыте равно  $T_{\parallel}$ , то  $T_{\parallel}$  также оказывается равным  $2L/c$ . Таким образом, для объяснения нулевого результата опытов Майкельсона – Морли, наблюдаемого в *движущейся* системе координат, в которой мы все находимся, вполне достаточно сформулированного Эйнштейном принципа

относительности, так как нам нет никакого дела до того, как выглядит этот эксперимент в неподвижной системе координат. Однако, если сокращение длины одного из плеч прибора действительно имеет место, хотя и не может быть измерено в движущейся системе координат вследствие сокращения длины любых линеек в той же пропорции, в которой сокращается длина измеряемого линейкой тела или расстояния между двумя точками пространства, время  $T_{\perp}$  уже не будет равно времени  $T_{\parallel}$ , так как вследствие сокращения длины время  $T_{\parallel}$  оказывается равным  $\frac{2L\sqrt{1-v^2/c^2}}{c}$ , что противоречит принципу относительности. Таким образом, для объяснения нулевого результата эксперимента Майкельсона – Морли гипотеза Лоренца о сокращении длины оказывается совершенно излишней. Речь может только идти о том, как выглядит ход лучей в опыте Майкельсона – Морли, или в предложенном Р. Фейнманом опыте со «световыми часами».

Очевидно, утверждение, что «пучок света» движется по диагонали, означает, что по диагонали движется каждый отдельно излученный импульс света, из которых и состоит пучок. Никто и никогда не объяснял, почему именно каждый отдельно взятый импульс света, изначально излученный перпендикулярно движению «часов», отклоняется в направлении движения этих «часов» (или прибора в опыте Майкельсона – Морли).

Предположим, что в момент, когда источник света находится в точке  $A_1$  неподвижной системы координат, перпендикулярно направлению движения источника излучается одиночный импульс света. Так как скорость света *не зависит* от состояния движения источника (вероятно потому, что световые импульсы не излучаются, не «выстреливаются» источником, а возникают в среде, окружающей источник и не увлекающейся его движением), импульс света будет двигаться в том же направлении, в каком он был излучен. За время  $t$  между излучением первого и следующего за ним импульса, свет пройдет расстояние  $c \cdot t$ , а источник света сместится на расстояние  $u \cdot t$ , как это изображено на рис. 2. Таким образом, каждый предыдущий импульс света оказывается *левее* следующего. Поскольку каждый импульс движется независимо от предыдущего, никакого отклонения «пучка» вслед за движением источника не может иметь места. Однако, если соединить линией точку, в которой находился источник в мо-

мент излучения им первого импульса, с точкой, в которой находится приемник (или отражатель) в момент излучения второго импульса, то эта линия будет наклонена под некоторым углом к направлению движения «часов», но эта линия не имеет никакого отношения к траектории движения каждого отдельно взятого импульса света.



**Рис. 2.** Движение лучей света в неподвижной системе координат

Очевидно, что если скорость движения «часов» слишком велика, импульс света вообще не попадет в отражатель.

Предположим, что свет движется от источника внутри стеклянной трубки, соединяющий источник света и отражатель. В этом случае импульс света движется «бокком», как и трубка. Вследствие полного внутреннего отражения импульс света перемещается вместе с трубкой и за время  $\tau$  проходит путь, равный  $\sqrt{D^2 + (u\tau)^2}$ , так как, увлекаемый трубкой, движется по диагонали. В соответствии с дорелятивистскими представлениями, скорость движения импульса света относительно неподвижного наблюдателя будет равна  $\sqrt{c^2 + v^2}$ , так как импульс света движется в двух взаимно перпендикулярных направлениях: в направлении, перпендикулярном движению «часов», и в направлении движения трубки, внутри которой движется импульс. За время  $\tau$  этот импульс проходит путь, равный  $\tau \cdot \sqrt{c^2 + v^2}$ , откуда следует:

$$\sqrt{D^2 + (u\tau)^2} = \tau \cdot \sqrt{c^2 + v^2}$$

$$D^2 + u^2\tau^2 = c^2\tau^2 + v^2\tau^2$$

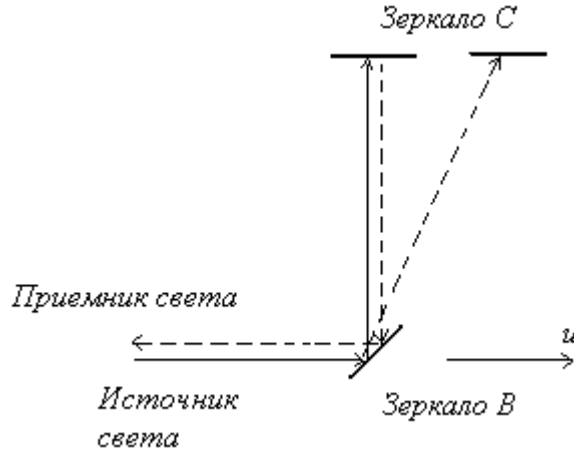
$$D^2 = c^2\tau^2$$

$$D = c\tau$$

$$\tau = D/c$$

Применительно к опыту Майкельсона – Морли это означает, что не только в движущейся, но и в неподвижной системе координат  $T_{\perp} = 2L/c$ .

Предположим теперь, что мы несколько изменили конструкцию световых часов, как это изображено на рис. 3.



**Рис. 3.** «Релятивистский» случай: угол падения не равен углу отражения

Одиночный импульс света от источника падает на зеркало  $B$ , установленное под углом  $45^\circ$  к направлению движения «часов», отражается от него и попадает на зеркало  $C$ . Отразившись затем от зеркала  $C$ , импульс света снова отражается от зеркала  $B$  и попадает в приемник, после чего испускается другой импульс и так далее.

В движущейся системе координат импульс света отражается от зеркала  $B$  под углом  $45^\circ$ , так как, согласно законам отражения, угол падения равен углу отражения, вследствие чего импульс света движется к зеркалу  $C$  перпендикулярно движению «часов».

В неподвижной системе, как объясняет Р. Фейнман, импульс света, отразившись от зеркала  $B$ , движется «по диагонали». Таким образом, падая на зеркало  $B$  под углом  $45^\circ$ , луч света отражается от зеркала под другим углом, не равным  $45^\circ$ . Таким образом, утверждение, что импульс света движется «по диагонали», не соответствует законам отражения. Следовательно, утверждение, что в неподвижной системе координат импульс света движется «по диагонали», оказывается совершенно необоснованным. Это означает, что «световые часы», установленные «поперек направления движения», в неподвижной системе координат будут идти так же, как и в движущейся, т.е. замедление хода этих часов *не будет* наблюдаться ни в неподвижной, ни в движущейся системах координат.

Предположим, что свет в опыте Майкельсона – Морли движется внутри стеклянных стержней, соединяющих полупрозрачное зеркало с зеркалами-отражателями. В этом случае в неподвижной системе координат лучи света, движущиеся внутри стеклянного стержня к зеркалу-отражателю, будут также двигаться вместе со стержнем в направлении движения прибора. В соответствии с дорелятивистскими представлениями, скорость света в этом случае будет равна  $\sqrt{c^2 + v^2}$ . За время  $t$  луч света пройдет путь:

$$t \cdot \sqrt{c^2 + v^2} = \sqrt{L^2 + v^2 t^2},$$

откуда следует  $t = L/c$  и  $T_{\perp} = 2t = 2L/c$ . Таким образом, отклонение луча света в направлении движения прибора возможно только в том случае, когда среда, в которой движется свет, движется с той же скоростью, что и сам прибор, т.е. в случае полного увлечения этой среды движущимся прибором. В этом случае, однако,  $T_{\perp}$  все равно оказывается равным  $2L/c$ .

Как описывает У.И. Франкфурт в [2], «Новые возможности повышения точности опытов типа Майкельсона появились с созданием квантовых генераторов. Шамир и Р. Фокс повторили опыт Майкельсона с одним лазером. В оба плеча интерферометра были введены стеклянные стержни одинаковой длины. Опыт показал отсутствие эфирного ветра со скоростью, превышающей  $6,6$  км/с». Что и следовало ожидать, так как в этом случае среда, в которой движется свет, т.е. оба стержня, движется с той же скоростью, что и прибор.

Предположим теперь, что «световые часы» установлены параллельно направлению движения. В этом случае, как следует из теории опыта Майкельсона – Морли, время  $T_{\parallel}$  движения одиночного импульса света от источника света к отражателю и обратно будет равно  $\frac{2L/c}{1-v^2/c^2}$ . С учетом же сокращения длины это время окажется равным:

$$\frac{2L/c}{1-v^2/c^2} \cdot \sqrt{1-v^2/c^2} = \frac{2L/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

Так как  $2L/c = T$ , окончательно получим:

$$T_{\parallel} = \frac{T}{1-v^2/c^2} \text{ – без сокращения длины и}$$

$$T_{\parallel} = \frac{T}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \text{ – с учетом сокращения длины}$$

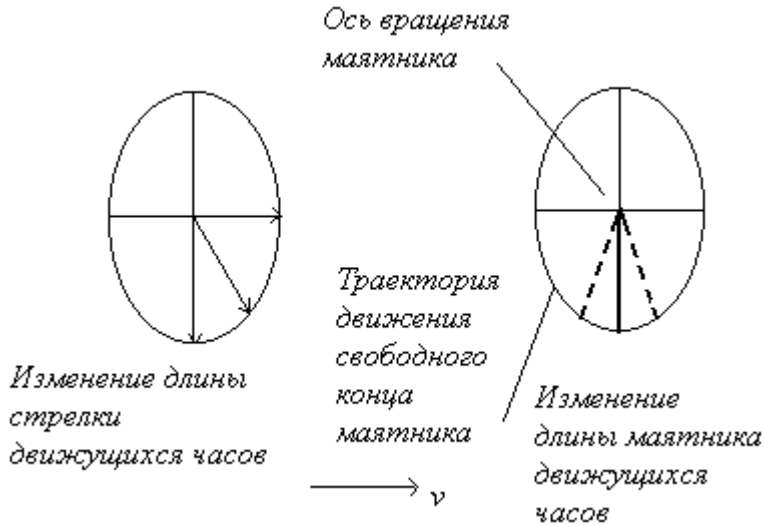
(разумеется, если такое сокращение вообще имеет место в действительности).

Как показывают опыты Саньяка и Погани, движущиеся «световые часы» действительно идут медленнее неподвижных, и это изменение скорости их хода оказывается вполне наблюдаемым при скорости движения часов, составляющей несколько метров в секунду, однако нет никаких оснований утверждать, что и все другие часы изменяют скорость своего хода так же, как «световые». Зависимость скорости хода «световых часов» от скорости их движения относительно окружающей их среды является исключительным свойством таких и только таких часов.

Предположим теперь, что в движущейся системе координат установлены механические маятниковые часы, маятник которых колеблется в плоскости, параллельной направлению движения системы координат. В движущейся системе вследствие сокращения длины круглый циферблат часов выглядит как овал, соответственно, и длина стрелки изменяется в зависимости от величины ее отклонения от направления движения системы, как это изображено на рис. 4. Точно так же изменяется и длина маятника часов в зависимости от величины угла его отклонения от вертикали: в неподвижных часах траектория движения свободного конца маятника



представляет собой часть окружности; в движущихся часах эта траектория представляет собой часть овала.



**Рис. 4.** «Релятивистское» изменение длины стрелок и маятника движущихся часов

Известно, что период колебаний маятника уменьшается с уменьшением его длины, соответственно увеличивается частота колебаний. Увеличение же частоты колебаний означает *ускорение*, а не замедление скорости их хода. Таким образом, в отличие от «световых часов», скорость хода механических часов увеличивается в зависимости от скорости их движения – движущиеся механические часы идут быстрее неподвижных, тогда как движущиеся «световые часы» идут медленнее неподвижных. Изменение скорости хода механических часов может иметь место только в том случае, если имеет место сокращение длины движущихся тел, тогда как изменение скорости хода световых часов может иметь место и в отсутствии сокращения длины тел. Таким образом, утверждение, что все другие движущиеся часы изменяют скорость своего хода так же, как и «световые», не соответствует действительности – замедление времени движущихся «световых часов» есть исключительное свойство таких и только таких часов и не является свойством самого времени.

## Относительность одновременности

Посмотрим теперь, как другой лауреат Нобелевской премии Л. Купер объясняет, что такое относительность одновременности.

«Рассмотрим случай, изображенный на рис. 5.

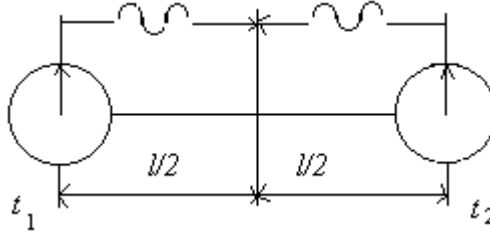
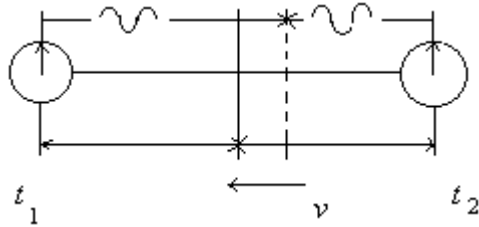


Рис. 5. Одновременность событий

Точно посередине... между двумя часами, расстояние между которыми равно  $l$ , стоит человек. В момент  $t_1$ , зафиксированный левыми часами, в них происходит событие, в результате которого эти часы испускают световой сигнал. Такое же событие происходит с правыми часами в момент времени  $t_2$  по их показаниям. Если оба сигнала достигают человека, стоящего в центре, одновременно, он заключает, что время  $t_1$  равнялось  $t_2$ . Он делает такой вывод, так как он ранее определял, что промежуток времени равен расстоянию, пройденному световым сигналом (в данном случае  $l/2$ ), деленному на скорость света, которая одинакова во всех системах отсчета. На основании этого определения он заключает, что, поскольку сигналы доходят до него одновременно, то их времена распространения были одинаковы, а следовательно, время  $t_1$  равнялось  $t_2$  (т.е. если предположить, что оба сигнала достигают человека одновременно, то время  $t_1$  равняется  $t_2$ , а поскольку время  $t_1$  равняется  $t_2$ , оба сигнала достигают человека одновременно – В.И.).

Другой наблюдатель, движущийся вместе с часами относительно первого наблюдателя, видит совсем иную картину (рис. 6.).



**Рис. 6.** Неодновременность событий

Если, например, первый наблюдатель кажется второму движущимся вправо, то он будет видеть, что первый наблюдатель движется навстречу световому сигналу, испущенному правыми часами, и удаляется от сигнала, испущенного левыми часами. Следовательно, сигналы проходят различные расстояния. Их скорости (скорость света) остаются одинаковыми. А поскольку они достигают «центра» одновременно, промежуток времени с точки зрения движущегося (второго) наблюдателя между моментом испускания сигнала левыми часами и моментом его приема отличается от временного промежутка между моментами испускания сигнала правыми часами и его приема. Поэтому с точки зрения движущегося наблюдателя время  $t'_1$  уже не равно  $t'_2$ » [3].

Как следует из теории опыта Майкельсона – Морли, время:

$$t'_1 = \frac{l/2}{c - v} \text{ и } t'_2 = \frac{l/2}{c + v}.$$

Таким образом, неравенство величин  $t'_1$  и  $t'_2$ , наблюдаемых движущимся наблюдателем, означает, что с точки зрения этого наблюдателя скорость света *не является* величиной постоянной, так как величина  $c + v$  не равна величине  $c - v$ . Таким образом, относительность одновременности противоречит принципу постоянства скорости света, тем самым и принципу относительности, как его сформулировал Эйнштейн.

Как следует из опытов Эйхенвальда, внутри движущихся твердых тел «эфирный ветер» отсутствует, поэтому при выполнении описанных выше опытов *внутри* пространства, ограниченного поверхностями из твердых материалов, время  $t'_1$  всегда будет равно  $t'_2$ , однако при выполнении таких же опытов *вне* пространства, ограниченного поверхностями из твер-

дых материалов, время  $t_1'$  уже не будет равно времени  $t_2'$  – два события, одновременные для наблюдателя внутри ограниченного пространства, не будут одновременными для наблюдателя вне этого пространства, несмотря на то, что оба наблюдателя неподвижны относительно друг друга. В этом и заключается подлинный смысл понятия «относительность одновременности», который нужно понимать так, что принцип относительности как независимость явлений от состояния движения системы, в котором эти явления происходят, выполняется только для таких систем, которые можно определить как замкнутые.

Предположим теперь, что точно такой же опыт выполняется с часами, испускающими в определенный момент времени короткие звуковые сигналы (импульсы). Когда часы и наблюдатель неподвижны друг относительно друга и относительно среды, в которой распространяются звуковые волны, время  $t_1 = l/w$  безусловно будет равно  $t_2$ , также равному  $l/w$  (где  $w$  – скорость звука в данной среде). Если же наблюдатель и часы, будучи неподвижными друг относительно друга, движутся с некоторой скоростью  $v$  относительно среды, в которой распространяются звуковые волны, картина будет иной: если, например, наблюдатель вместе с часами движется вправо, то он будет двигаться навстречу световому сигналу, испущенному правыми часами, и удаляется от сигнала, испущенного левыми часами. Следовательно, сигналы проходят различные расстояния.

Поэтому время  $t_1' = \frac{l}{2(w-v)}$  уже не будет равно  $t_2' = \frac{l}{2(w+v)}$

Предположим, что опыт со звуковыми часами выполняется одновременно на открытой железнодорожной платформе и в закрытом железнодорожном вагоне, движущимся с одной и той же скоростью  $v$ . В первом случае – на открытой платформе:

$t_1' = \frac{l}{2(w-v)}$  и  $t_2' = \frac{l}{2(w+v)}$  – события не одновременные.

Во втором случае  $t_1 = t_2 = \frac{l}{2w}$  – события одновременные. Таким образом, в одном и том же опыте, когда два наблюдателя неподвижны отно-

сительно друг друга, события, одновременные для одного наблюдателя, не будут одновременными для другого.

Неодновременность событий для наблюдателя, движущегося относительно среды, в которой распространяются звуковые волны, обусловлена тем, что в этом случае скорость звука в направлении движения наблюдателя не равна скорости звука в противоположном направлении. Точно так же и при выполнении опытов с часами, движущимися относительно среды, в которой распространяется свет: при движении наблюдателя относительно такой среды скорость света в направлении движения наблюдателя не будет равной скорости света в противоположном направлении, вследствие чего время  $t_1'$  не будет равно времени  $t_2'$ .

Как полагают, одним из доказательств истинности замедления времени в движущихся системах является изменение периода полураспада нестабильных частиц, в частности, мюонов, в зависимости от скорости их движения. Мюон представляет собой частицу с зарядом, равным заряду электрона, и массой, в 207 раз превышающего массу электрона. Период полураспада мюона составляет величину порядка  $1,5 \cdot 10^6$  с. В естественных условиях мюоны образуются в верхних слоях атмосферы Земли на высоте порядка  $10^6$  см под воздействием космических лучей. При движении к Земле мюоны распадаются с образованием электронов и нейтрино.

Установлено, что количество мюонов, наблюдаемых у поверхности Земли, не соответствует известной формуле

$$N = N_0 e^{-t \ln 2 / T}, \quad (1)$$

где  $N_0$  – количество частиц в данном объеме в момент времени  $t$ ;  $N$  – количество частиц в том же объеме в момент времени  $T$ ;  $T$  – период полураспада частиц.

Как объясняет лауреат Нобелевской премии по физике Л. Купер «Если после образования они (мюоны – *В.П.*) двигались бы даже со скоростью света, ...то средний путь, на котором половина из них распадается, равнялся бы произведению их времени жизни  $1,5 \cdot 10^6$  с на скорость, равную скорости света. На пути в  $9 \cdot 10^4$  см распалось бы три четверти частиц; на пути в  $1,35 \cdot 10^5$  см – семь восьмых и т.д. Поэтому к поверхности Земли, лежащей на  $10^6$  см ниже уровня образования мюонов, долетело бы очень

мало частиц. Тем не менее у поверхности Земли их наблюдают в значительно большем количестве, чем можно было бы ожидать исходя из времени полураспада частиц... если частица после своего возникновения в верхней атмосфере движется с большой скоростью относительно нас, ...отрезок времени между образованием и распадом с нашей точки зрения значительно удлинится. Его точное значение определяется из выражения:

$$\frac{1,5 * 10^{-6}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} c.$$

В результате мюоны могут достигать поверхности Земли прежде, чем они распадутся» [1].

Как было показано выше, сокращение длины, соответственно, и замедление времени, должно пропорционально величине  $(1 - v^2/c^2)$ , а не  $\sqrt{1 - v^3/c^2}$ , как считают в настоящее время. Более того, сокращению длины тел в движущейся системе координат должно соответствовать сокращение интервалов времени между двумя событиями, произошедшими в той же системе координат, т.е. сокращению длины должно соответствовать *ускорение*, а не замедление времени в движущихся системах координат. Таким образом, предлагаемое СТО объяснение увеличению увеличения мюонов у поверхности Земли нельзя считать соответствующим действительности. Выяснение действительных причин этого явления требует специального исследования.

## Заключение

Анализ всей совокупности опытов и явлений, составляющих, как полагают, экспериментальные основания теории относительности, дают основания заключить следующее.

1. Как показывают опыты Саньяка и Погани, «световые часы», движущиеся относительно окружающей их среды параллельно импульсам света, движущимся от источника света к отражателю и обратно, идут медленнее таких же часов, неподвижных относительно окружающей их среды, независимо от того, является ли среда, окружающая такие часы, воздухом (газом) или чистым эфиром (вакуумом).

2. Замедление хода «световых часов», движущихся относительно окружающей их среды, является исключительным свойством таких и только таких часов, и не является свойством самого времени.

3. По отношению к эфиру могут существовать замкнутые системы, внутри которых эфирный ветер, обусловленный движением этих систем относительно окружающей их среды (жидкости, газа или эфира) не возникает ни при какой скорости движения таких систем. Тогда, если имеется двое совершенно одинаковых «световых часов», одни из которых установлены вне, а другие внутри замкнутой системы, то внешние часы будут идти медленнее таких же часов, находящихся внутри замкнутой системы, несмотря на то, что часы неподвижны относительно друг друга.

4. Увеличение количества мюонов, наблюдаемых у поверхности Земли, не связано с изменением периода их полураспада. Период полураспада мюонов, как и любых других частиц, не зависит от состояния их движения. Мюоны с массой, большей чем 207 масс электрона, испытывают более чем однократный распад, вследствие чего общее время распада некоторой совокупности таких мюонов увеличивается. Именно этим объясняется и увеличение общего количества мюонов, наблюдаемых у поверхности Земли, и различные массы этих мюонов.

#### **Источники информации:**

1. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Том 1, том 2 (на русском языке). – М.: Мир, 1978.
2. У.И. Франкфурт. Оптика движущихся сред и специальная теория относительности. Эйнштейновский сборник 1977. – М.: Наука, 1980.
3. Л. Купер. Введение в сущность и структуру физики. Том 2. Современная физика. / Пер. с английского. – М.: Мир, 1974.

**Дата публикации:**

24 мая 2002 года

**Электронная версия:**

© «Наука и Техника», [www.n-t.org](http://www.n-t.org)