2.3. Замедление времени и сокращение длины. Одновременность событий.

2.3.1. Замедление времени для движущегося наблюдателя.

Рассмотрим эксперимент по определению расстояния с помощью источника света, часов, зеркала и фотоприемника, пользуясь тем, что скорость света одинакова во всех системах отсчета. Рассмотрим сначала в неподвижной системе отсчета – неподвижная установка (рис. 3.1). Расстояние от источника до зеркала L определяется:

$$L = \frac{ct}{2} \qquad (2.3.1)$$

где t – время распространения света от источника до приемника.

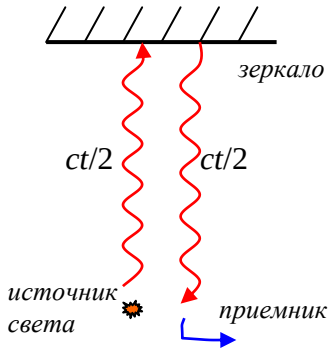

Рис. 3.1.

Теперь рассмотрим то же измерение в установке, движущейся со скоростью V_0 (см рис. 3.2 и 3.3). Пусть система К – лабораторная система отсчета, а система К' связана с движущейся установкой. В системе К' (рис. 3.2) по-прежнему имеем время движения света t' и расстояние $2L$ складывается из $ct'/2$ и $ct'/2$ как в (2.3.1).

В К системе (рис. 3.3) свет идет под углом к зеркалу и, отражаясь, попадает обратно на движущийся приемник также отраженный под

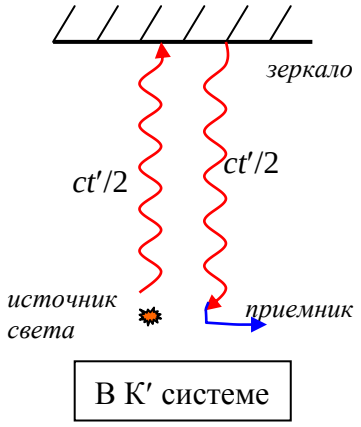

Рис. 3.2.

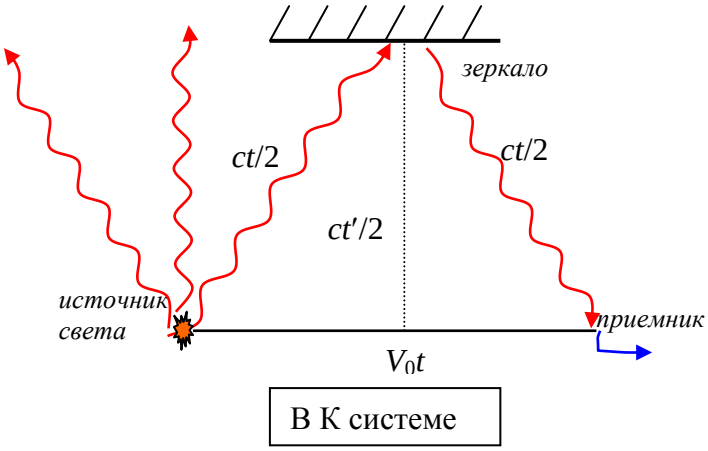

Рис. 3.3.

углом к направлению движения. Из теоремы Пифагора следует:

$$\left(\frac{ct}{2}\right)^2 = \left(\frac{ct'}{2}\right)^2 + \left(\frac{V_0 t}{2}\right)^2. \qquad (2.3.2)$$

Откуда получаем:

$$t' = t\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{c^2}} < t \qquad (2.3.3)$$

Итак, время по часам движущейся системы отсчета прошло меньше, ее часы движутся медленнее, чем часы в неподвижной системе отсчета. Вопрос теперь состоит в следующем: реальный ли это физический эффект или кажущийся? Действительно ли время в движущейся К' системе идет медленнее, то есть часы отстают по сравнению с часами системы К? Экспериментальные данные показывают, что этот эффект реальный.

Например, появление элементарных частиц – мюонов – около поверхности Земли как раз связано с замедлением времени для движущегося объекта. В самом деле, мюоны рождаются в верхних слоях атмосферы под действием космических лучей. Время жизни их в неподвижном состоянии $\tau = 2$ *мкс* (микросекунд). За это время они могли бы пройти путь $l \le c\tau \sim 3\cdot10^8\cdot2\cdot10^{-6} = 0.6$ *км*. Однако их обнаруживают у поверхности Земли, на расстояниях в нескольких километрах от места рождения. В самом деле, поскольку они летят со скоростью $v = 0.99c$, то по часам Земли время их жизни равно:

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2}{0.14} = 14\ мкс$$

Путь, который они проходят за это время, примерно равен: $l \le ct \sim 14\cdot10^{-6}\cdot3\cdot10^{8} \sim 4.2\ км$, что и подтверждается появлением мюонов в нижних слоях атмосферы. Таким образом, замедление времени в движущемся объекте – реальный эффект. Имеется также большое множество других примеров и экспериментальных фактов, подтверждающих этот эффект.

3.2. Сокращение длины движущегося тела.

Определим длину движущегося стержня с помощью тех же “приборов”: источника и приемника света и зеркала. В сопутствующей системе отсчета К' (см рис. 3.4), пользуясь соотношением (2.3.3), имеем:

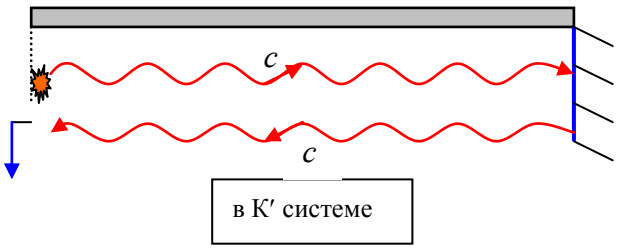

Рис. 3.4.

$$L' = \frac{ct'}{2} = \frac{ct}{2}\sqrt{1-\frac{V_0^2}{c^2}}\ . \qquad (2.3.4)$$

где L' – длина стержня в системе К′ (в сопутствующей СО, относительно которой стержень покоится).

Рассмотрим процесс измерения длины стержня в лабораторной системе отсчета К (рис. 3.5). Так, время распространения света вдоль стержня в направлении, совпадающем с направлением скорости движения стержня, определяется из уравнения:

$$ct_1 = L + V_0 t_1$$

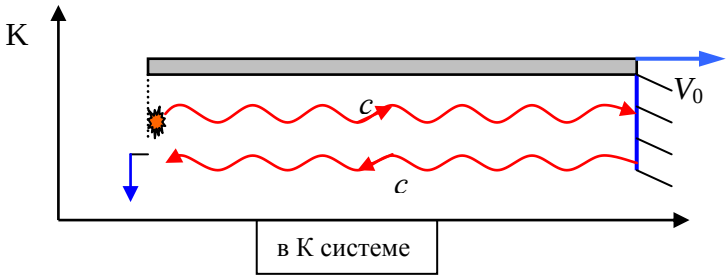

Рис. 3.5.

где L – длина стержня в К системе отсчета, а $V_0 t_1$ – расстояние на которое зеркало “уедет” за время движения света. Откуда время движения света в одну сторону равно:

$$t_1 = \frac{L}{c - V_0} \qquad (2.3.5)$$

Аналогично определяем время распространения света в обратную сторону – против движения стержня:

$$ct_2 = L - V_0 t_2$$

$$t_2 = \frac{L}{c + V_0} \qquad (2.3.6)$$

Откуда полное время движения света туда и обратно вдоль стержня для наблюдателя в К системе равно:

$$t = t_1 + t_2 = \frac{2Lc}{c^2 - V_0^2} \qquad (2.3.7)$$

Выражая время из (2.3.4) и подставляя в последнее уравнение (2.3.7), находим длину движущегося стержня:

$$L' = \frac{c}{2}\frac{2Lc}{c^2 - V_0^2}\sqrt{1-\frac{V_0^2}{c^2}}$$

Итак, получаем:

$$L' = \frac{L}{\sqrt{1-\frac{V_0^2}{c^2}}} > L \qquad (2.3.8)$$

С точки зрения системы, относительно которой тело (стержень) движется, его длина уменьшается по сравнению с длиной в СО, где он покоится.

3.3. Синхронизация часов и одновременность событий.

В движущейся ИСО время идет медленнее. Это означает, что если часы К′ пролетают мимо часов К со скоростью V_0 и они синхронизируются в тот момент ($t_0 = t_0' = 0$), когда они находились в одной точке, то спустя t' секунд (по часам системы К′) часы системы К будут показывать большее время:

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - V_0^2/c^2}} \qquad (2.3.9)$$

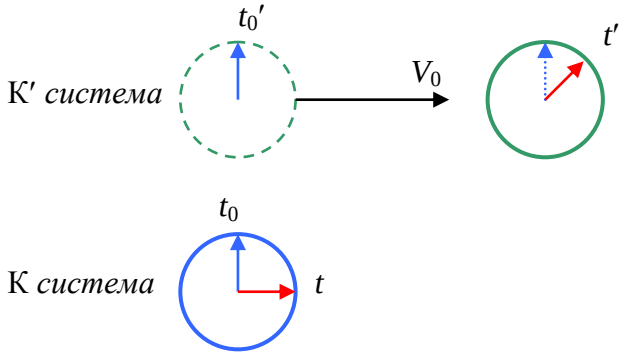

Рис. 3.6.

Если же двое часов находятся в одной ИСО (рис. 3.6), то скорость их хода не должна различаться, и мы можем отсчитывать время по любым часам, если только предварительно синхронизируем их. Так, если часы находятся в системе К′ на расстоянии x' друг от друга, то их можно синхронизировать обычным способом, передавая сигнал (радио, свет) точного времени. Это способ Эйнштейна синхронизации часов. В 0 часов ($t_0' = 0$) посылаем сигнал (световую вспышку) в точку Р. Сигнал идет в течение x'/c секунд, поэтому приняв его, наблюдатель в точке Р ставит на своих часах сразу время $t' = x'/c$, учитывая запаздывание. Таким образом, часы в точке 0′ и точке Р синхронизированы и можно отсчитывать время по любым из них.

Однако иначе этот процесс выглядит с точки зрения наблюдателя в системе К, относительно которого К′ система движется со скоростью V_0. С его точки зрения пока сигнал точного времени шел из точки 0′ в точку Р, точка Р убегала со скоростью V_0, так что к моменту времени, когда сигнал будет принят в точке Р, часы в точке 0′ покажут уже не x'/c, а большее время. Какое? С точки зрения К- наблюдателя точка Р переместится на расстояние $V_0 t'$ за время движения светового сигнала, следовательно, свет потратит на этот путь дополнительное время

$$\Delta t = V_0 t'/c = V_0 x'/c^2$$

Эта разность времен представляет собой постоянное, не меняющееся во времени, смещение показаний часов точки 0′ относительно показаний часов точки Р. Часы 0′ и Р идут с одинаковой скоростью, но часы 0′ всегда спешат и показывают на Δt секунд больше. Однако это только с точки зрения наблюдателя и часов в системе К, но с точки зрения наблюдателей системы К′ их часы показывают одно и то же время. Поэтому, если два события в точках 0′ и Р происходят одновременно по часам К′, то по часам системы К они происходят не одновременно. И наоборот, одновременные события в К воспринимаются как неодновременные события в К′. Это явление и называется *относительной одновременностью*.

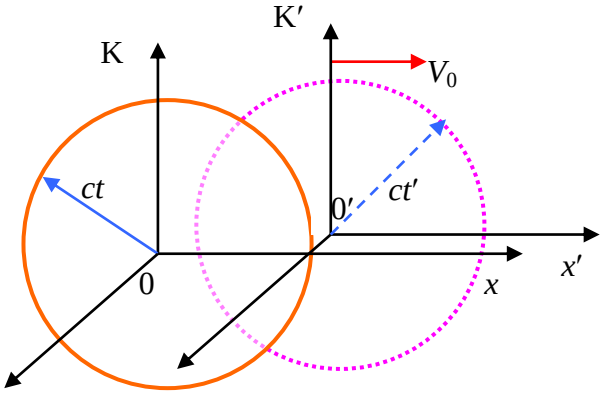

Рис. 3.7.

Итак, события в различных точках пространства считаются одновременными в данной системе отсчета, если синхронизированные часы, находящиеся в этих точках, показывают одно и то же время. *Понятие одновременности – понятие относительное*.

Рассмотрим пример, представленный на рисунке 3.7: распространение света в двух системах отсчета К и К′. Когда начала систем отсчета совпадали, одновременно испускался свет из этих точек – сферическая волна. В системе К свет за время t достигнет сферы радиуса ct. В системе К′ свет за время t' достигнет сферы

радиуса ct'. Одновременно световому фронту невозможно находиться на сфере в системе K и на сфере в системе K', т.к. центры сфер сместились. Это и означает, что в различных точках пространства и в разных ИСО время течет неодинаково.

Другой пример – распространение света из середины движущегося поезда к его левому и правому концам. С точки зрения пассажира поезда свет одновременно достигнет правый и левый конец поезда, с точки зрения стороннего наблюдателя – в различное время.