В этом случае для компонент метрического тензора имеем

$$g_{00}=1; \quad g_{01}=\frac{w}{c}; \quad g_{11}=-\left(1-\frac{w^2}{c^2}\right); \quad g_{22}=g_{33}=-1. \tag{16.4}$$

Условие допустимости преобразования (16.3) приводит к неравенству

$$w^2<c^2.$$

Для скорости света вдоль оси x из соотношений (12.6) получим следующие выражения:

$$c_1=\frac{c^2}{c-w}; \quad c_2=-\frac{c^2}{c+w}.$$

Если считать, что $w \geqslant 0$, то отсюда имеем

$$c \leqslant c_1 < \infty; \quad -\frac{c}{2} > c_2 \geqslant -c.$$

Преобразования координат, оставляющие метрический тензор (16.4) форминвариантным и соответствующие переходу между обобщенными инерциальными системами отсчета, в этом случае будут иметь вид

$$x_{\text{н}}=\frac{\left(1+\frac{Vw}{c^2}\right)x_{\text{c}}+Vt_{\text{c}}}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}},$$

$$t_{\text{н}}=\frac{\left(1-\frac{Vw}{c^2}\right)t_{\text{c}}+x_{\text{c}}\frac{V}{c^2}\left(1-\frac{w^2}{c^2}\right)}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}.$$

Таким образом, в произвольной инерциальной системе отсчета постулат Эйнштейна о равенстве скорости света при распространении в прямом и обратном направлениях не выполняется, но тем не менее это обстоятельство никоим образом не сказывается на возможности описания физических процессов в этих системах отсчета.

§ 17. Синхронизация часов в различных точках пространства

Для приведения показаний часов, имеющих одинаковый темп хода и расположенных в различных точках пространства, в соответствие друг с другом обычно проводится процедура их синхронизации. Впервые процесс синхронизации часов с помощью световых сигналов был предложен в работе Пуанкаре [15] и впоследствии использовался в работе Эйнштейна [4].

Этот процесс состоит в следующем. Наблюдатель, находящийся в некоторой точке A в момент времени $t=t_1$ (по своим часам), посылает в другую точку B световой сигнал. Часы, находящиеся в точках A и B, будут синхронизованы, если часы в точке B запустить в ход в момент прихода светового сигнала, причем начальное показание этих часов t' должно учитывать время распространения t_{AB} светового сигнала из точки A в точку B: $t'=t_1+t_{AB}$. Однако часами, находящимися в точке A, измерить время распространения светового сигнала t_{AB} между точками A и B нельзя, поскольку начало процесса (посылка сигнала) и его окончание (прием сигнала) происходят в различных точках пространства.

С помощью часов мы можем измерить лишь время процесса, начало и окончание которого происходит в в одной и той же точке пространства, например суммарное время, необходимое для распространения светового сигнала от точки A до точки B и обратно

$$t_{ABA}=t_{AB}+t_{BA}=t_2-t_1,$$

где моменты $t=t_1$ посылки сигнала из точки A в точку B и его возвращения $t=t_2$ из точки B в точку A определяются по часам наблюдателя, находящегося в точке A.

Если предполагать, что скорость света в прямом и противоположном направлениях одинакова ($t_{AB}=t_{BA}$), то синхронизация часов в точках A и B будет обеспечена, если в момент прихода светового сигнала часы, находящиеся в точке B, показывают время

$$t'=t_1+\frac{1}{2}(t_2-t_1).$$

Если же не делать такого предположения, то показание t' часов в точке B в момент прихода светового сигнала должно определяться выражением

$$t'=t_1+\varepsilon_{AB}(t_2-t_1), \tag{17.1}$$

где ε_{AB} — параметр, характеризующий неравенство скоростей света в прямом и противоположном направлениях: $0<\varepsilon_{AB}<1$.

Эйнштейн [8, с. 542] в 1917 г. допускал, что выбор значения $\varepsilon = 1/2$ при синхронизации часов не является обязательным, однако другого выбора значения ε в своих работах он не делал.

Впоследствии Рейхенбах (см., например, [10]) в 1928 г. вернулся к этому вопросу и изучил возможность синхронизации часов при $\varepsilon \neq 1/2$. Поскольку величина скорости света в прямом и противоположном направлениях при подходе Эйнштейна—Рейхенбаха ничем не предопределялась, то Рейхенбах пришел к выводу, что выбор величины $0 < \varepsilon < 1$ также ничем не предопределяется, а является предметом соглашения (конвенции). Отсюда следовало, что и такие понятия механики, как одновременность, да и сама механика, носят условный конвенциональный характер.

Однако эти выводы неправильны. Как мы видели, величина координатной скорости светового сигнала в различных направлениях не является предметом соглашения, а целиком предопределяется выбором системы координат, т. е. метрикой пространства-времени. Поэтому и выбор значения ε в выражении (17.1) будет целиком предопределяться метрикой. Учет же метрики позволяет построить физические величины, отражающие свойства пространства-времени.

Действительно, рассмотрим, например, синхронизацию часов, расположенных вдоль оси x в случае произвольной инерциальной системы отсчета, метрика которой задана выражением (12.3). Не ограничивая общности, будем считать, что $x_A < x_B$; тогда распространение света из точки A в точку B будет происходить со скоростью

$$c_1 = c\,\frac{g_{01} + \sqrt{g_{01}^2 - g_{00}g_{11}}}{-g_{11}} > 0, \tag{17.2}$$

а в обратном направлении—со скоростью

$$c_2 = c\,\frac{g_{01} - \sqrt{g_{01}^2 - g_{00}g_{11}}}{-g_{11}} < 0. \tag{17.3}$$

Пусть наблюдатель в момент времени t_1 послал из точки A в точку B световой сигнал, который отразился в ней и вернулся в точку A в момент времени t_2. Схематически мировые линии этих точек и светового сигнала изображены на рис. 3.

При движении сигнала из точки A в точку B он имел скорость $dx/dt = c_1$. Поскольку $c_1 = \text{const}$, мы можем

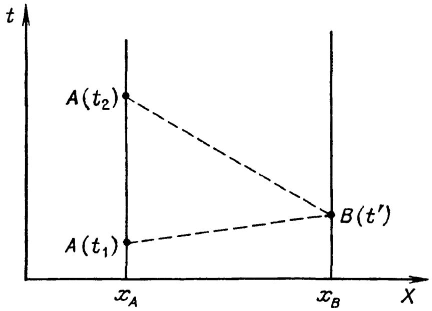

Рис. 3. Мировые линии наблюдателей и светового сигнала при синхронизации часов

перейти в этом выражении от дифференциалов к конечным приращениям

$$l_{AB} = c_1 t_{AB},$$

где l_{AB} — путь, пройденный сигналом при его движении из точки A в точку B.

Поскольку $l_{AB} = l_{BA} = x_B - x_A$, то из этих выражений получим

$$t_{AB} = -\frac{c_2}{c_1} t_{BA}. \tag{17.4}$$

Полное время, затрачиваемое световым сигналом на путь ABA, равно

$$t_{ABA} = t_2 - t_1 = t_{AB} + t_{BA} = \frac{c_2 - c_1}{c_2} t_{AB} = \frac{c_1 - c_2}{c_1} t_{BA}.$$

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} t_{AB} &= \frac{c_2}{c_2 - c_1}(t_2 - t_1); \\ t_{BA} &= \frac{c_1}{c_1 - c_2}(t_2 - t_1). \end{aligned} \tag{17.5}$$

По определению, находящиеся в точках A и B часы будут синхронизованы, если в момент прихода светового сигнала в точку B находящиеся там часы показывают время

$$t'=t_1+t_{AB}=t_1+\varepsilon_{AB}(t_2-t_1).$$

Подставляя в это соотношение первое из выражений (17.5), определим величину ε_{AB}:

$$\varepsilon_{AB}=\frac{c_2}{c_2-c_1}. \tag{17.6}$$

Совершенно аналогично можно получить

$$\varepsilon_{BA}=\frac{c_1}{c_1-c_2}.$$

Легко также убедиться в том, что в случае равенства скоростей света в противоположных направлениях, т. е. при $c_1=-c_2$, мы имеем

$$\varepsilon_{AB}=\varepsilon_{BA}=\frac{1}{2}.$$

Определим теперь величину ε для рассмотренных в § 16 частных случаев выбора инерциальных систем отсчета.

В случае метрики (16.2) выражения (17.2) и (17.3) дают

$$c_1=c+u;\quad c_2=-c+u.$$

Поэтому из соотношения (17.6) получим

$$\varepsilon_{AB}=\frac{1}{2}\left(1-\frac{u}{c}\right). \tag{17.7}$$

В случае метрики (16.4) из выражений (17.2) и (17.3) имеем

$$c_1=\frac{c^2}{c-w};\quad c_2=-\frac{c^2}{c+w}.$$

Тогда соотношение (17.6) дает

$$\varepsilon_{AB}=\frac{1}{2}\left(1-\frac{w}{c}\right). \tag{17.8}$$

Из выражений (17.7) и (17.8) следует, что параметр ε_{AB} при синхронизации часов в рассмотренных выше двух совершенно различных инерциальных системах отсчета совпадает с точностью до обозначений.

Рассмотрим теперь синхронизацию часов, расположенных вдоль некоторого направления, не совпадающего с направлением оси x, в случае произвольной инерциальной системы отсчета (см. рис. 4). Для определенности будем считать, что точки A и B лежат в плоскости xy.

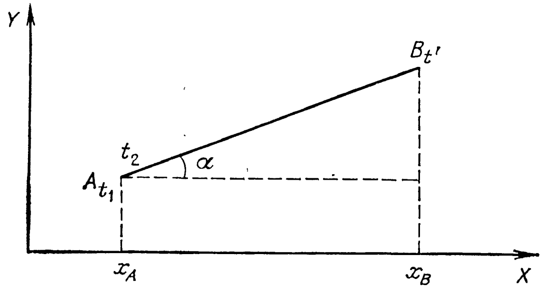

Рис. 4. Синхронизация часов вдоль произвольного направления

Обозначим тангенс угла наклона прямой AB к оси x через k:

$$\frac{dy}{dx}=k; \quad |k|<\infty.$$

Тогда выражение для интервала (12.3) в случае светового сигнала, распространяющегося вдоль направления AB, принимает вид

$$ds^2=c^2g_{00}\,dt^2+2cg_{01}\,dx\,dt+(g_{11}-k^2)\,dx^2=0.$$

Отсюда можно найти проекции скорости света на ось x:

$$\begin{aligned} v_{1x}&=c\,\frac{g_{01}+\sqrt{g_{01}^2+(k^2-g_{11})\,g_{00}}}{k^2-g_{11}}>0;\\ v_{2x}&=c\,\frac{g_{01}-\sqrt{g_{01}^2+(k^2-g_{11})\,g_{00}}}{k^2-g_{11}}<0. \end{aligned} \qquad (17.9)$$

Рассуждая аналогично рассмотренному выше случаю синхронизации часов, расположенных вдоль оси x, получим

$$\Delta x_{AB}=x_B-x_A=v_{1x}t_{AB}=-v_{2x}t_{BA}.$$

Отсюда следует, что

$$t_{AB}=-\frac{v_{2x}}{v_{1x}}\,t_{BA}.$$

Полный промежуток времени, необходимый для распространения светового сигнала из точки A в точку B и обратно, будет равен

$$t_{ABA} = t_2 - t_1 = t_{AB} + t_{BA} = t_{AB}\left(1 - \frac{v_{1x}}{v_{2x}}\right).$$

Из этого соотношения мы можем выразить величину промежутка времени t_{AB} через полный промежуток времени:

$$t_{AB} = \frac{v_{2x}}{v_{2x} - v_{1x}}(t_2 - t_1).$$

Используя определение

$$t' = t_1 + t_{AB} = t_1 + \varepsilon_{AB}(t_2 - t_1),$$

найдем выражение для параметра ε в рассматриваемом случае:

$$\varepsilon_{AB} = \frac{v_{2x}}{v_{2x} - v_{1x}}. \tag{17.10}$$

Таким образом, выбор того или иного значения при синхронизации часов в разных точках пространства не является предметом соглашения или каким-либо принципом теории относительности, а является частным проявлением конкретного выбора координатной системы.

Однако описание физических явлений можно производить и в любых других допустимых координатах. Необходимо только помнить, что в этом случае координатная скорость света, выбор величины ε при синхронизации, а также связь координатных величин с физическими величинами целиком предопределяются выбором системы координат и, как следствие этого, метрическим тензором пространства-времени.

Эйнштейн же при формулировке теории относительности не проанализировал этой связи, а шел неоднозначным путем синхронизации, предложенным ранее Пуанкаре. В результате этого постулат Эйнштейна о постоянстве скорости света в его формулировке, как мы теперь знаем, отражал лишь частный выбор координатных систем, поскольку он основывался (как мы видели) на понятии координатной скорости света. В тот период он не осознал, что определить скорость света как физическую скорость можно лишь тогда, когда дано определение длины и времени. Выше мы видели, что в определение времени и длины обязательно входят компоненты метрического тензора и координатные переменные (см. формулы (4.12) и (4.13)). Эйнштейн, как он отмечает в работе [16], понял это лишь в 1912 г. Галилеевы координатные величины совпадают или простейшим образом связаны с физическими величинами $d\tau$ и dl^2:

$$d\tau = dT; \; dl^2 = dX^2 + dY^2 + dZ^2.$$

§ 18. Обобщенный принцип относительности

Как мы уже знаем, Пуанкаре и Минковский открыли, что пространство-время, в котором протекают все физические процессы, едино и геометрия его псевдоевклидова. Однако в результате этого открытия принцип относительности утратил свою фундаментальную роль и превратился в частное следствие того, что все физические процессы протекают в пространстве-времени, геометрия которого псевдоевклидова. Метрика этого пространства-времени остается форминвариантной при преобразованиях, описывающих переход от одной инерциальной системы отсчета к другой, что и обеспечивало эквивалентность инерциальных систем отсчета для описания всех физических явлений. Таким образом, фундаментальную роль стала играть геометрия пространства-времени.

Теперь же я хочу показать, что утверждение о том, что все физические процессы происходят в пространстве-времени, геометрия которого псевдоевклидова, гораздо богаче содержания принципа относительности, поскольку это утверждение позволяет сформулировать обобщенный принцип относительности, справедливый не только в инерциальных, но и в неинерциальных системах отсчета. В этой связи необходимо отметить, что в литературе довольно часто можно встретить утверждения о том, что специальной теории относительности принадлежит только описание явлений в инерциальных системах отсчета, в то время как описание явлений в неинерциальных системах отсчета является прерогативой общей теории относительности.

Эти утверждения неправильны. Из фундаментального открытия Пуанкаре и Минковского, что геометрия пространства-времени, в которой происходят все физические