§ 11. Определение расстояний и синхронизация часов в одной инерциальной системе отсчета

Прежде чем переходить к обсуждению следствий из преобразования Лоренца, вернемся к рассмотренному в §§ 1 и 2 вопросу об измерении расстояний и промежутков времени в одной инерциальной системе отсчета. Мы остановимся несколько подробнее на понятии одновременности в разных точках пространства и на вопросе о синхронизации удаленных друг от друга часов.

Расстояния между телами, неподвижными в одной инерциальной системе отсчета, могут измеряться различными способами: путем непосредственного наложения масштабов (измерительных жезлов), путем триангуляции и путем радиолокации. В первом способе используются только свойства твердых тел; во втором способе используется, кроме того, прямолинейность распространения света; в третьем способе существенную роль играет скорость света, которая предполагается известной. Само собою разумеется, что во всех трех способах предполагается справедливость евклидовой геометрии; если бы евклидова геометрия была не верна, то, например, триангуляция, произведенная по различным путям, привела бы к противоречивым результатам. Мы уже подчеркивали в § 2, что справедливость законов евклидовой геометрии следует рассматривать как опытный факт, а не как априорное допущение.

Все три способа измерения расстояний основаны на свойствах твердых тел и на свойствах света. Так как свет представляет более простое явление, то его следует рассматривать, как первичное, и проверять, например, неизменность эталона длины оптическим путем (определяя число длин волн, укладывающихся на протяжении эталона).

Для измерения скорости света нужно уметь измерять промежутки времени и расстояния способами, не зависящими от знания скорости света. При этом, если сделать допущение, что скорость света в прямом и в обратном направлении одинакова, то достаточно уметь измерять время в одной точке. Для этого может, в принципе, служить любой периодический процесс, например колебания молекулы аммиака или кристалла кварца. Прибор для измерения времени мы будем называть часами или хронометром, независимо от того, представляет ли он механический прибор (как обыкновенные часы) или действует на каком-нибудь ином принципе.

Определение скорости света сводится в принципе к определению промежутка времени τ, в течение которого свет проходит туда и обратно заранее отмеренное (путем триангуляции или наложением масштабов) расстояние r; скорость света будет равна $c = 2r/\tau$. Таким образом, дело сводится, по существу, к нахождению переводного множителя от расстояний, выраженных в единицах длины и измеренных путем триангуляции или непосредственно наложением масштабов, к расстояниям, выраженным в единицах времени и измеренным путем радиолокации. Этот переводный множитель может быть определен раз и навсегда.

Переходим к вопросу о сравнении показаний часов, неподвижных в некоторой инерциальной системе отсчета и находящихся на заданном расстоянии друг от друга. Предполагается, что часы — одинакового устройства и обладают одинаковым ходом, так что задача состоит только в том, чтобы их „одинаково" поставить. Пусть в точке A расположены одни часы (часы A) и в точке B, на расстоянии r от A — другие (часы B). Из A посылается в момент t_1 световой сигнал, который отражается от зеркала, поставленного в B, и возвращается в A в момент t_2. Спрашивается, какое время должны показывать „одинаково поставленные" часы B, когда до них дошел сигнал? Мы будем считать, что часы B одинаково поставлены, или *синхронны*, с часами A, если в момент дохождения до них сигнала они показывают время $t' = \frac{t_1 + t_2}{2}$. В этом заключается эйнштейновское определение синхронности часов, расположенных в разных точках. Это определение вполне естественно и согласуется с основным положением теории относительности о постоянстве скорости света. В самом деле, если сигнал был послан из A в момент t_1, то он дошел до B в момент

$$t = t_1 + \frac{r}{c},$$

так как он прошел расстояние r со скоростью c. С другой стороны, так как он вернулся в A в момент t_2, а до того прошел путь r от B до A, то он должен был отразиться от B в более ранний момент

$$t = t_2 - \frac{r}{c}.$$

Из последних двух формул следует, что моменту отражения сигнала от B мы должны приписать на часах A значение $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$, и если часы B синхронны с часами A, то и они должны при отражении от них сигнала показать время $t' = t$.

Из того, что скорость света в прямом и обратном направлении одинакова, следует, что синхронность двух часов в определенном выше смысле есть свойство взаимное: если часы B синхронны с часами A, то и обратно, часы A синхронны с часами B. Далее, из справедливости евклидовой геометрии и из одинаковости скорости света в любом направлении (то и другое содержится в уравнении распространения фронта световой волны) следует, что если часы A синхронны с несколькими часами B, C, D, ..., то все эти часы синхронны между собою.

Последнее обстоятельство позволяет построить такую модель инерциальной системы отсчета: твердый каркас, во всех узловых точках которого находятся синхронно идущие часы. С точки зрения такой модели движение какого-нибудь тела относительно данной инерциальной системы отсчета может быть описано следующим образом. Пусть тело проходит последовательно мимо неподвижных часов с координатами (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2) и т. д., причем часы (x_i, y_i, z_i) показывают при прохождении мимо них тела время t_i. Тогда координаты $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ тела в данной системе отсчета будут такими функциями времени t этой системы, которые при $t = t_i$ принимают значения (x_i, y_i, z_i).

Такая модель, при всей своей громоздкости, может быть иногда полезной и часто излагается в курсах теории относительности. Мы предпочитаем ей, однако, модель радиолокационной станции, которая позволяет, *исходя из одного места*, определять непрерывным образом как положение движущегося тела, так и момент времени (по часам станции), к которому это положение относится. В силу независимости скорости света от скорости движения источника обе модели дают одни и те же значения координат и времени; разница между ними только в том, что в радиолокационной модели определение расстояний и синхронизация часов производятся не заранее, а, так сказать, на ходу.

Радиолокационная модель является более гибкой и сохраняет свою наглядность также и в тех случаях, когда модель твердого каркаса становится явно непригодной, например, когда речь идет об астрономических расстояниях. Кроме того, радиолокационная модель системы отсчета легче поддается обобщению.

Изложенный выше эйнштейновский способ синхронизации часов при помощи световых сигналов с учетом запаздывания представляется настолько естественным, что на первый взгляд может показаться, что он не содержит в себе ничего характерного для теории относительности. Между тем это не так. Указанный способ заключает в себе *определение* одновременности в разных точках пространства с точки зрения данной инерциальной системы. Это определение основано на законах теории относительности и оно является не произвольным, а, напротив того, единственно рациональным с точки зрения этой теории.

В до-релятивистской физике принималось, как нечто само собою разумеющееся, существование единого мирового времени и соответственно этому как бы допускалось, что понятие одновременности в разных точках пространства не нуждается в определении. В связи с этим предполагалось, что любой способ синхронизации часов (например, путем перевозки хронометров или путем световых сигналов) должен дать то же самое. На самом же деле это не так.

Как мы увидим ниже, из теории относительности вытекает, что если часы A синхронизованы с часами B при помощи световых сигналов и если хронометр C, сверенный с часами в точке A, перевезен затем в точку B, то его показания в точке B даже при идеальном ходе хронометра не будут совпадать с показаниями часов в B, а будут зависеть от скорости перевозки (они будут совпадать лишь при бесконечно малой скорости).

К этому вопросу мы вернемся в следующем параграфе. Мы хотели здесь подчеркнуть, что даже такое простое физическое понятие, как одновременность в одной инерциальной системе отсчета, требует точного определения, с которым должны быть согласованы все применяемые способы измерения соответствующей физической величины.

§ 12. Последовательность событий во времени в разных системах отсчета

Преобразование Лоренца заключает в себе формальные основы всего учения о пространстве и времени, содержащегося в теории относительности.

Рассмотрим, на основе преобразования Лоренца, вопрос о последовательности событий во времени в разных системах отсчета. Под „событиями" мы будем разуметь здесь мгновенные события, характеризуемые положением точки в пространстве и соответствующим моментом времени.

Чтобы иметь конкретную картину, предположим, что „события" заключаются в мгновенной вспышке световых сигналов. Пусть первая вспышка произошла в момент времени t_1 в точке с координатами x_1, y_1, z_1, а вторая вспышка — в момент t_2 в точке x_2, y_2, z_2. Вводя обычные трехмерные векторные обозначения, мы можем положение и время первой вспышки характеризовать символами $(\mathbf{r}_1, t_1)$, а второй вспышки — символами $(\mathbf{r}_2, t_2)$.

Поставим прежде всего вопрос: которая из двух вспышек произошла раньше другой?

Ответ будет бесспорен, если свет от одной вспышки успел достигнуть места другой вспышки до того, как та произошла. А именно, если

$$t_2 - t_1 > \frac{1}{c} |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|, \tag{12.01}$$

то первая вспышка бесспорно произошла раньше второй, а если

$$t_2 - t_1 < -\frac{1}{c} |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|, \tag{12.02}$$

то, наоборот, первая вспышка бесспорно произошла позже второй.

События, для которых выполняется одно из неравенств (12.01) и (12.02), мы будем называть *последовательными*. В случае (12.01) мы будем говорить, что второе событие наступило *абсолютно позже* первого, а в случае (12.02) — что оно наступило *абсолютно раньше* первого. В обоих случаях будет

$$c^2 (t_2 - t_1)^2 - (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2 > 0. \tag{12.03}$$