

для скорости света  $c = \lambda\nu$  было найдено значение

$$c = 299\,792\,458 \pm 1,2 \text{ м/с,}$$

превосходящее по точности все ранее полученные значения более чем на два порядка.

### § 104. Понятие одновременности

1. До теории относительности считалось, что принцип относительности и принцип независимости скорости света от движения источника противоречат друг другу. Действительно, согласно принципу относительности скорость света в вакууме во всех инерциальных системах отсчета должна быть одной и той же. Обозначим ее, как всегда, через  $c$ . Возьмем две инерциальные системы отсчета  $S$  и  $S'$ , движущиеся относительно друг друга прямолинейно и равномерно. Пусть  $O$  и  $O'$  — какие-либо две точки, неподвижные в системах  $S$  и  $S'$  соответственно и пространственно совпадающие в момент времени  $t = 0$ . Произведем в этих точках в тот же момент времени кратковременную световую вспышку. Рассмотрим распространение этой вспышки сначала в системе  $S$ . Так как свет во всех направлениях распространяется с одной и той же скоростью  $c$ , то к моменту времени  $t$  вспышка достигнет сферы  $\Sigma$  радиуса  $ct$  с центром в точке  $O$ . Рассмотрим теперь распространение той же вспышки в системе  $S'$ . Обе системы совершенно равноправны. Они отличаются друг от друга только тем, что источник света относительно них движется по-разному. Но это в рассматриваемом вопросе не имеет никакого значения, так как скорость света не зависит от движения источника. Поэтому можно утверждать, что к моменту  $t$  та же вспышка достигнет сферы  $\Sigma'$  с тем же радиусом  $ct$ , но с центром в точке  $O'$ . Сферы  $\Sigma$  и  $\Sigma'$  разные, так как к моменту  $t$  их центры  $O$  и  $O'$  разойдутся. Таким образом, одна и та же световая вспышка *одновременно* должна находиться и на сфере  $\Sigma$ , и на сфере  $\Sigma'$ , что, очевидно, невозможно.

2. Однако приведенное рассуждение несостоятельно, так как в его основе лежит *интуитивное представление об одновременности*. Если два события происходят в одном и том же месте пространства, то не возникает трудностей при суждении о том, одновременны эти события или нет. Но если события происходят *в разных местах пространства*, то без дальнейших разъяснений утверждение об их одновременности или неодновременности просто бессодержательно, так как *никакой априорной одновременности пространственно разделенных событий не существует*.

В принципе пространственно-временное описание явлений природы можно дать и без использования понятия одновременности. Действительно, возьмем какую-либо инерциальную систему отсчета. Для определения положения точки в ней будем пользоваться координатными осями, реализованными, например, с помощью трех

взаимно перпендикулярных твердых стержней. Расстояние между двумя точками будем измерять путем откладывания неподвижного масштабного стержня, т. е. твердого стержня определенной длины, разделенного на метры и более мелкие единицы. Для измерения больших расстояний этот способ непригоден. Тогда надо применять косвенные методы измерения длин, о которых говорилось в § 1 первого тома. Для определения времени расставим в нашей координатной системе достаточно часто какие-либо *одинаково устроенные часы*. Стрелки часов в различных точках пространства установим совершенно произвольно и независимо друг от друга. После этого получится пространственно-временная система отсчета. Всякое событие в такой системе можно характеризовать местом, где оно произошло, и показаниями часов *в том же месте*.

Пока что введено только *местное время*, т. е. время в каждой точке пространства, причем времена в различных точках никак не связаны между собой. Это обстоятельство делает нашу систему практически совершенно непригодной для пространственно-временного описания явлений природы. Практической может быть только система с *единым временем*, в которой показания часов в различных точках не независимы, а определенным образом связаны или синхронизированы друг с другом. Способ синхронизации в принципе произволен. Требуется только, чтобы он был *внутренне непротиворечив*. Однако соображения целесообразности, основанные на принципе относительности и независимости скорости света от движения источника, почти однозначно вынуждают принять способ синхронизации, предложенный Эйнштейном, и основанное на нем определение одновременности.

3. Эйнштейн предложил устанавливать синхронизацию пространственно разделенных часов с помощью световых сигналов в вакууме. Пока синхронизация часов не установлена, не имеет смысла говорить о скорости в любом определенном направлении. Имеет смысл говорить лишь о *средней скорости* света в двух прямо противоположных направлениях; так как эту величину можно измерить с помощью *только одних часов*. Для этого из неподвижной точки  $A$  в момент времени  $t_1^A$  пошлем световой сигнал к неподвижному зеркалу, установленному на расстоянии  $l$  от  $A$ . Пусть отраженный сигнал вернется в  $A$  в момент  $t_2^A$ . Время отсчитывается по одним и тем же часам, так что никакой синхронизации не требуется. Разделив пройденное расстояние  $2l$  на затраченное время  $t_2^A - t_1^A$ , найдем искомую среднюю скорость света  $c = 2l / (t_2^A - t_1^A)$ . Опыт Майкельсона и другие опыты показали, что эта величина есть *универсальная постоянная*. Теперь *полагаем по определению*, что скорости света во всяких двух взаимно противоположных направлениях *одинаковы*. Тем самым постулативно будет установлена синхронизация часов и введено понятие одновременности. После

этого уже имеет смысл говорить о скорости любого движения в одном направлении, так как время, затрачиваемое на такое движение, можно измерить по двум пространственно разделенным часам, синхронизованным между собой.

Сформулируем теперь окончательно *правило Эйнштейна синхронизации часов*. Пусть в неподвижных точках  $A$  и  $B$  (рис. 326) установлены одинаковые часы. Из точки  $A$  в момент  $t_1^A$  по часам  $A$  пошлем световой сигнал к зеркалу, установленному в точке  $B$ . Пусть отраженный сигнал возвращается в  $A$  в момент  $t_2^A$  (по часам  $A$ ). В момент прихода сигнала в  $B$  поставим на часах в  $B$  время  $t^B = 1/2 (t_1^A + t_2^A)$ . Тогда по определению часы в  $A$  и  $B$  будут синхронизованы между собой.

Можно дать другой, эквивалентный, способ синхронизации. В середине отрезка  $AB$  произведем световую вспышку. В момент прихода света от вспышки к часам  $A$  и  $B$  поставим их одинаково. Тогда часы будут синхронизованы.

Но часы  $A$  и  $B$  можно синхронизовать между собой не только непосредственно, но также посредством третьих часов  $C$ . Синхронизуем сначала одним из указанных способов часы  $A$  и  $C$ , затем часы

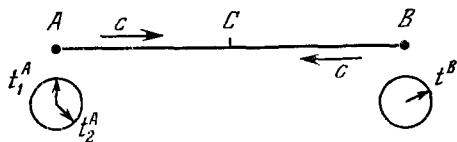


Рис. 326.

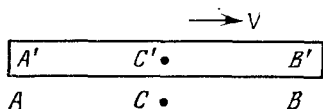


Рис. 327.

$B$  и  $C$ . Мы утверждаем и рассматриваем это утверждение как постулат, что при этом часы  $A$  и  $B$  окажутся синхронизованными. Такое утверждение, как показывают все следствия из него, не приводит к противоречиям и согласуется с опытом. Таким образом, получается *пространственно-временная система отсчета с единым временем*, в которой часы синхронизованы между собой по правилу Эйнштейна. Два пространственно разделенных события в этой системе отсчета называются *одновременными*, если часы, находящиеся в тех точках, где происходят эти события, показывают одно и то же время.

4. Одновременность есть понятие относительное, т. е. два события, одновременные в одной инерциальной системе отсчета, могут оказаться не одновременными в другой системе. Поясним это на следующем мысленном опыте. По поверхности Земли равномерно и прямолинейно со скоростью  $V$  движется поезд  $A'B'$  (рис. 327). Примем его за движущуюся систему отсчета  $S'$ . Неподвижной системой  $S$  будем считать полотно железной дороги. Пусть в концы поезда  $A'$  и  $B'$  ударяют две молнии, оставляющие следы  $A$  и  $B$  на полотне железной дороги. Отметим в поезде среднюю точку  $C'$ ,

а на полотне — среднюю точку  $C$  между  $A$  и  $B$ . Пусть в точку  $C$  вспышки от молний приходят одновременно. Тогда с точки зрения системы  $S$  удары молний в концы поезда будут событиями одновременными. Но в момент встречи обеих вспышек точка  $C'$  окажется правее  $C$ . В этот момент вспышка от  $B'$  уже прошла через  $C'$ , а от  $A'$  еще не дошла. Значит, с точки зрения системы  $S'$  удар молнии в  $B'$  произошел раньше удара в  $A'$ .

Теперь ясно, как разрешается парадокс, о котором говорилось в пункте 1. Свет доходит до сферы  $\Sigma$  одновременно в системе отсчета  $S$ , но не одновременно в системе  $S'$ . Аналогично, до сферы  $\Sigma'$  свет доходит одновременно с точки зрения системы отсчета  $S'$ , но не одновременно с точки зрения системы  $S$ .

Дорелятивистская физика развивалась, и вполне успешно, считая время и одновременность *абсолютными*, т. е. одинаковыми во всех системах отсчета. Но так происходило лишь до тех пор, пока рассматривались *медленные движения*. А распространение света есть быстрый процесс. Вот почему именно в оптике физика встретила раньше всего с принципиальными трудностями, преодоленными теорией относительности.

### § 105. Преобразование координат и времени в теории относительности

1. Рассмотрим две инерциальные системы отсчета  $S$  и  $S'$ , из которых вторая движется относительно первой прямолинейно и равномерно со скоростью  $V$ , а следовательно, первая движется относительно второй со скоростью  $-V$ . В каждой системе отсчета расставлены достаточно часто одинаковые часы, неподвижные в этой системе и синхронизованные по правилу Эйнштейна. Пусть  $x, y, z, t$  — координаты и время какого-либо события (например, столкновения двух шаров) в системе отсчета  $S$ , а  $x', y', z', t'$  — координаты и время того же события в системе отсчета  $S'$ . Возникает вопрос, как по значениям  $x, y, z, t$  найти значения  $x', y', z', t'$  и наоборот. Решение этого вопроса основано на предположении, что пространство *однородно* и *изотропно*, а время *однородно*<sup>1)</sup>. Однородность пространства и времени означает, что все точки пространства и все моменты времени, как в системе  $S$ , так и в системе  $S'$ , абсолютно эквивалентны. Изотропия же пространства означает полную эквивалентность всех пространственных направлений в системе  $S$ , а также в системе  $S'$ . В силу указанной однородности и изотропии пространства и времени связь между  $x, y, z, t$  и  $x', y', z', t'$  должна быть *линейной*.

<sup>1)</sup> Эти свойства нельзя рассматривать как априорные. Они установлены и проверены экспериментально. Их объяснение, по-видимому, должна дать космология при рассмотрении происхождения и эволюции Вселенной в целом.