

но сказать, что он справедлив *во всех инерциальных системах отсчета*.

Остается выяснить, одинаковы ли численные значения скорости света в различных системах отсчета? Утвердительный ответ можно дать на основании опыта Кеннеди и Торндайка, которые в 1932 г. изменили опыт Майкельсона. В их опыте использовался интерферометр Майкельсона, в котором длины плеч были *разными* и отличались на 16 см. Они наблюдали интерференционные полосы (при неподвижном относительно Земли интерферометре) в течение шести месяцев. За это время Земля из своего исходного положения непрерывно перемещалась в диаметрально противоположную точку своей орбиты, участвуя вместе с тем в движении Солнца. Тем самым реализовалось множество систем отсчета, отличающихся друг от друга положением и ориентацией в пространстве. Если бы в них скорость света была разной, то должно было бы наблюдаться регулярное смещение интерференционных полос. На самом деле смещение носило случайный характер и не превосходило $3/1000$ ширины полосы. На этом основании можно прийти к заключению, что с точностью примерно 2 м/с скорость света в вакууме относительно Земли одинакова во всех ее положениях в пространстве.

Все это подтверждает равноправие различных инерциальных систем отсчета по отношению ко всем физическим явлениям — *преимущественной инерциальной системы отсчета не существует*.

§ 103. Независимость скорости света от движения источника

1. Помимо принципа или постулата относительности, Эйнштейн положил в основу теории относительности *постулат о независимости скорости света в вакууме от движения источника*. Его обычно называют *принципом «постоянства скорости света»*, хотя, как заметил еще Паули (1900—1958), такое название может повести к недоразумениям. Об универсальности постоянства скорости света в вакууме не может быть речи уже потому, что эта скорость постоянна *только в инерциальных системах отсчета*, а независимость скорости света от движения источника сохраняется и *в общей теории относительности*, где на выбор систем отсчета не накладывается никаких ограничений.

Независимость скорости света от движения источника можно было бы не выдвигать в качестве самостоятельного постулата, если с самого начала принять волновую теорию света. Однако столь фундаментальную теорию, какой является теория относительности, лучше строить, не связывая ее ни с какими гипотетическими представлениями о природе и механизме физических явлений.

2. Предположение о зависимости скорости света от движения источника ввел Ритц (1878—1909). Согласно этому предположению скорость света в вакууме постоянна и равна *c* только относительно

источника. Если же источник света движется со скоростью \mathbf{v} относительно какой-либо системы отсчета, то скорость света c' в этой системе векторно складывается из c и \mathbf{v} , т. е. $c' = c + \mathbf{v}$, как это происходит со скоростью снаряда при стрельбе из движущегося орудия. Такая гипотеза получила название *баллистической*. Ритц систематически перестроил электродинамику Максвелла, приведя ее в соответствие с этой гипотезой. Ясно, что баллистическая гипотеза объясняет отрицательный результат опыта Майкельсона, если только источник света неподвижен относительно интерферометра.

Но баллистическая гипотеза, как и любое предположение о зависимости скорости света от движения источника, не согласуется с молекулярным объяснением отражения и преломления света (см. §§ 68 и 69). В основе такого объяснения лежит представление, что отраженная и преломленная волны возникают в результате интерференции падающей волны с вторичными волнами, излучаемыми молекулами и атомами среды. Действительно, если среду считать неподвижной, а источник света взять движущимся, то волны, излучаемые источником, будут распространяться с иными скоростями, чем волны, излучаемые молекулами и атомами среды. Интерференция между ними невозможна. Однако это замечание есть аргументация, основанная на волновой теории света, а не экспериментальное доказательство, свободное от гипотетических представлений о природе света.

Убедительное доказательство несостоятельности баллистической гипотезы, как показал в 1913 г. голландский астроном де Ситтер (1872—1934), дают астрономические наблюдения над движением двойных звезд. Действительно, допустим, что баллистическая гипотеза верна. Предположим для простоты, что компоненты двойной звезды вращаются вокруг их центра масс по круговым орбитам в той же плоскости, в которой расположена Земля. Рассмотрим движение одной из этих двух звезд. Пусть v — скорость движения ее по круговой орбите. В положении звезды, когда она удаляется от Земли вдоль соединяющей их прямой, скорость света равна $(c - v)$, а в положении, когда звезда приближается, равна $(c + v)$. Если отсчитывать время от момента, когда звезда находилась в первом положении, то свет из этого положения дойдет до Земли в момент $t_1 = L/(c - v)$, а из второго положения — в момент $t_2 = T/2 + L/(c + v)$, где T — период обращения звезды, а L — расстояние до нее. При громадных расстояниях до звезд наблюдаемые движения звезды могли бы заметно отступать от законов Кеплера. В частности, при очень больших L могло бы случиться, что $t_2 \leq t_1$, т. е. звезда одновременно была бы видна в двух (и даже нескольких) положениях или обращалась бы в противоположном направлении. Ничего подобного, как показали астрономические наблюдения, не происходит.

Если бы баллистическая гипотеза была верна, то опыт Майкельсона должен был бы дать положительный результат, если его произвести не с земным источником света, а со светом от звезд. Томашек в 1926 г. так и поступил, но получил отрицательный результат.

А. М. Бонч-Бруевич и В. А. Молчанов в 1956 г., применив современные методы измерения скорости света, сравнили скорости света от правого и левого краев Солнца. Из-за осевого вращения Солнца один из этих краев приближался к нам со скоростью 2,3 км/с, а другой удалялся с той же скоростью. Обе скорости света с достаточной точностью совпали между собой.

Наконец, ставились специальные опыты, в которых сравнивались скорости γ -квантов, испускаемых движущимися возбужденными ядрами углерода ($^{12}\text{C}^*$) и неподвижными возбужденными ядрами кислорода ($^{16}\text{O}^*$). Ставились также опыты по аннигиляции электрона с позитроном, специально приспособленные для проверки независимости скорости света от движения источника. По сравнению с астрономическими опытами, в которых используются космические источники света со сравнительно малыми скоростями, в опытах с атомными ядрами и элементарными частицами скорость источников гораздо выше (сравнима со скоростью самого света). Опыты подтвердили, что с точностью около 10% скорость γ -квантов не зависит от движения источников.

Все приведенные опыты подтверждают постулат о независимости скорости света в вакууме от движения источника.

3. Заметим в заключение, что теория относительности вообще была бы невозможна, если бы не был установлен фундаментальный факт *конечности скорости распространения света*. Изучение методов и результатов измерения скорости света представляет громадный, не только исторический интерес. В частности, уточнение численного значения этой постоянной необходимо для точных измерений астрономических расстояний методами радиолокации. Это в свою очередь необходимо для целей космонавтики. Однако мы не будем касаться этих вопросов. Ограничимся замечанием, что в 1972 г. скорость света была определена на основе независимых измерений длины волны λ и частоты света ν . Источником света служил гелий-неоновый лазер, генерировавший излучение с длиной волны 3,39 мкм. Длина волны измерялась интерферометрически сравнением ее с эталоном длины, т. е. с длиной волны в вакууме оранжевой линии изотопа криптона-86. Ошибка таких измерений $\sim 10^{-5}$ нм. Частота лазерного излучения измерялась путем сравнения ее с атомным стандартом частоты, т. е. с частотой перехода между двумя сверхтонкими квантовыми уровнями атома цезия-133 в нулевом магнитном поле. При этом использовались методы нелинейной оптики — генерация излучений с суммарной и разностной частотами. В итоге

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 Σ 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 Σ' с тем же радиусом ct , но с центром в точке O' . Сферы Σ и Σ' 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 Σ , и на сфере Σ' , 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