

должно было быть примерно равным $0,4 \cdot 10^{-15}$ сек. Чтобы обнаружить такую ничтожную величину, Майкельсону пришлось воспользоваться волновыми свойствами света. Так как период светового колебания равен для видимых лучей 10^{-15} сек, то указанное выше изменение запаздывания соответствует 0,4 периода, т. е. составляет заметную долю периода. Майкельсон, наблюдая интерференцию колебаний первого и второго лучей, мог определить разность фаз этих колебаний с точностью до 0,01 периода (§ 20).

Таким образом, наблюдения интерференции позволяли ему определять $\frac{1}{40}$ долю искомого эффекта, несмотря на сравнительно малое расстояние (11 м вместо 70 км). Однако результат опыта оказался отрицательным. Никакого изменения запаздывания одного луча по отношению к другому при вращении прибора не было обнаружено. Так как ожидаемые эффекты пропорциональны квадрату скорости Земли, отсюда следовало, что скорость Земли по отношению к эфиру во всяком случае меньше $\sqrt{\frac{1}{40}}$, т. е. $\frac{1}{6}$ от орбитальной скорости Земли.

Последующие опыты только уточнили этот результат, понизив верхний предел для скорости Земли по отношению к эфиру или, что то же, скорости «эфирного ветра» по отношению к Земле до величины, меньшей $\frac{1}{40}$ орбитальной скорости Земли (Иллингворт, 1927).

§ 5. Отрицательный результат опыта Майкельсона и теория относительности

Отрицательный результат опыта Майкельсона поставил физиков в очень трудное положение.

Этот результат находился в резком противоречии с теорией неподвижного эфира. Можно было попытаться воспользоваться теорией эфира, полностью увлекаемого движущейся Землей у ее поверхности и постепенно отстающего от Земли по мере удаления от этой поверхности. Такая теория была создана Стоксом задолго до опыта Майкельсона. Однако, как показал Лорентц, эта теория дает правильное объяснение другим явлениям, в частности aberrации света, только благодаря наличию некоторых противоречивых предположений, лежащих в ее основе. Устранение этих противоречий привело Планка к созданию теории сжимаемого эфира, плотность которого у поверхности Земли возрастает в 10^5 раз без всякого изменения скорости распространения света в нем. Такая модель эфира также, конечно, не могла считаться удовлетворительной.

Наконец, интересная попытка объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона принадлежит Ритцу. Ритц выдвинул так называемую *баллистическую гипотезу*, согласно которой к скорости светового луча, испускаемого движущимся источником, добавляется скорость самого источника, так же как к скорости снаряда,

выпущенного крейсером, добавляется скорость крейсера. Эта гипотеза действительно объясняла полученный результат. Гипотеза Ритца была отвергнута как противоречащая волновой теории света, ибо скорость распространения любой волны не зависит от скорости ее источника. Ведь в волне, как в непрерывном процессе, все определяется бесконечно близкими точками, а не источником. Считают, что позднее астроному де Ситтеру (1913) удалось прямыми наблюдениями доказать неправильность гипотезы Ритца.

Первый шаг по пути правильного разрешения возникшего противоречия был сделан Лорентцем, разработавшим теорию оптических явлений в движущихся телах. Лорентц предположил, что *движущиеся тела сжимаются в направлении движения*, причем как раз так, что опыт Майкельсона должен давать отрицательный результат. Из сравнения формул (7) и (8) следует, что плечо PS_1 должно сократиться в $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ раз, тогда t_1 будет равно t_2 .

Независимо от Лорентца такая же гипотеза была высказана Фицджеральдом, так что этот эффект носит название *лорентц-фицджеральдовского* сокращения. Так как лорентц-фицджеральдовскому сокращению должны быть подвержены в равной мере все тела в движущейся системе, это сокращение невозможно обнаружить путем обычных измерений длины. Обычное измерение длины состоит в сравнении твердого стержня единичной длины с измеряемым расстоянием. Поскольку и единица длины, и измеряемое расстояние сократятся в одинаковое число раз, соотношение между ними сохранится.

Особое (и общепринятое теперь) решение вопроса было дано Эйнштейном в созданной им *специальной теории относительности* (1905). Эйнштейн, исходя из отрицательного результата опыта Майкельсона, пришел к заключению, что принципиально нельзя отличить, какая из двух любых физических систем, движущихся относительно друг друга с постоянной скоростью, находится в покое и какая движется. Для механических процессов такой принцип относительности был известен давно (т. I, § 11, 1959 г.; в пред. изд. § 14), но Эйнштейн обобщил этот принцип и на электромагнитные явления.

Следует отметить, что в природе, благодаря взаимодействию всех тел между собой, реальное движение одной физической системы по отношению к другой всегда носит ускоренный характер. Поэтому случай инерциального движения является абстракцией, достаточно точной для решения многих физических проблем, но не отражающей в полной мере истинные соотношения, имеющие место в природе. Об этом необходимо помнить, анализируя физическое содержание специальной теории относительности.

Поскольку в основу этой теории был положен факт одинаковости скорости света по отношению к любому телу отсчета, прежде всего

пришлось более глубоко проанализировать физические величины, необходимые для определения любой скорости.

Всякая скорость определяется как отношение пройденного пути между двумя какими-либо точками A и B к промежутку времени, затраченному на прохождение этого пути. Путь мы измеряем твердым масштабом, а время — при помощи часов, помещенных в точка A и B .

Для определения промежутка времени необходимо выбрать способ точного измерения времени и прежде всего способ установления одновременности событий, протекающих в разных местах пространства. Эти способы нельзя выбрать произвольно, напротив, они должны находиться в соответствии со всей совокупностью результатов физических опытов.

Основная трудность состоит в выборе безупречного метода синхронизации часов, находящихся в различных местах пространства.

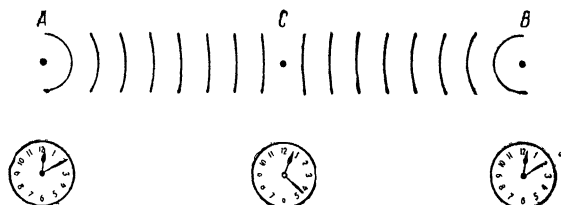


Рис. 8. К определению одновременности.

Все методы, основанные на перевозке часов, в теории относительности отвергаются, так как они основаны на маловероятной гипотезе о независимости хода часов от их движения. Был выбран метод, основанный на использовании световых сигналов или радиосигналов.

События, происшедшие в двух каких-либо различных местах пространства A и B , согласно теории относительности, одновременны, если световые сигналы, пущенные из A и B и извещающие об этих событиях, приходят одновременно в третье место C (где находятся часы), одинаково удаленное от A и B (рис. 8). Такое определение одновременности является вполне естественным в случае, когда точки A и B находятся по отношению к C в покое. Однако теория относительности, исходя из результата опыта Майкельсона, распространяет это определение и на тот случай, когда A и B движутся инерциально по отношению к C . Ясно, что при таком определении одновременности события, одновременные по часам, по отношению к которым A и B покоятся, будут уже не одновременными по часам, по отношению к которым A и B движутся. Например, если точка A приближается к C , а точка B удаляется от C , то световой сигнал, вышедший из A одновременно с сигналом из B (по часам, движущимся

вместе с A и B), придет в точку C раньше (по часам, покоящимся в этой точке), чем сигнал из B .

Одновременность событий, происходящих в разных местах пространства, становится относительным понятием, зависящим от движения материальных объектов друг относительно друга. Одновременность событий, происходящих в одном и том же месте пространства, конечно, сохраняет свой абсолютный характер.

Нетрудно видеть, что приведенное выше определение одновременности эквивалентно следующему способу синхронизации часов в точках A и B . Из точки A в точку B в момент времени t_A (по часам в A) выходит луч света, в момент времени t_B (по часам в B) он достигает точки B , отражается там от зеркала и возвращается в момент t'_A (по часам в A). Часы в A и B будут идти согласно определению синхронно, если

$$t_B - t_A = t'_A - t_B,$$

т. е. мы должны так отрегулировать часы в A и B , чтобы промежутки времени, необходимые для прохождения света от A к B и обратно и измеренные по разностям показаний этих часов, оказались равными.

Но такое определение синхронности часов, или «одновременности», в разных точках пространства, конечно, эквивалентно предположению об одинаковости скорости света при движении в обе стороны, т. е. эквивалентно результату опыта Майкельсона. Таким образом, относительность одновременности следует считать необходимым следствием отрицательного результата опыта Майкельсона. Указанное уточнение понятия одновременности влечет за собой уточнение понятия длины данного тела. При определении длины тела уже становится существенным, движется ли тело по отношению к твердому масштабу или нет. Ведь надо одновременно отметить совпадение начала и конца тела с двумя отметками на твердом масштабе. Но то, что будет одновременным для масштаба неподвижного по отношению к телу, становится уже неодновременным для движущегося масштаба. Это обязывает признать, что происходит изменение длины тела, движущегося по отношению к масштабу. Понятие длины тела становится также относительным.

Важно подчеркнуть, что относительность промежутков времени и длин проявляется при любых взаимодействиях различных материальных объектов между собой, а не только при измерениях, описанных выше.

Математическим выражением классических воззрений на пространство и время считаются так называемые *галилеевы преобразования координат*, выражающие принцип относительности Галилея и служащие для перехода от одной системы координат K к другой K' , движущейся со скоростью u вдоль оси x' , причем оси y и y' и z и z' параллельны друг другу (рис. 9).

Галилеевы преобразования имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - ut; \\ y' &= y; \\ z' &= z; \\ t' &= t. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Первое уравнение соответствует галилееву закону сложения скоростей, последнее уравнение отмечает одинаковость промежутков времени, определяемых по часам, покоящимся в обеих системах координат.

Новое определение одновременности приводит к другому преобразованию координат и времени, отличному от галилеевых, а именно к преобразованию, полученному Лорентцем еще до появления теории относительности. (Теория относительности вскрыла их физический смысл.)

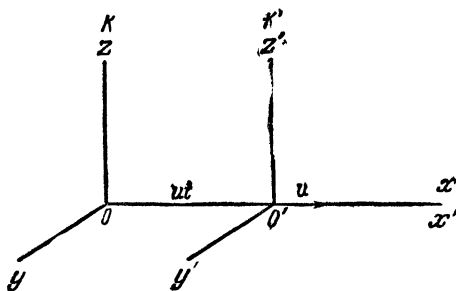


Рис. 9. Две системы координат.

Лорентцевы преобразования имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}; \\ y' &= y; \\ z' &= z; \\ t' &= \frac{t - \frac{u}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Время t отсчитывается по часам, покоящимся в системе K , а время t' — по часам, покоящимся в системе K' (т. е. для системы K' реальное значение имеет только время t' , а не t). Нетрудно видеть, что эти уравнения эквивалентны изложенным выше выводам об относительности длин и промежутков времени.

Длина тела, движущегося со скоростью u , измеренная в системе K (x, y, z), равна:

$$x_2 - x_1 = \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} (x'_2 - x'_1). \quad (13)$$

Одновременность при этом определялась по часам, покоящимся в K ($t = \text{const}$).

Мы получили лорентцево сокращение длины движущегося тела, так как длина тела $x'_2 - x'_1$, измеренная в системе K' , движущейся вместе с телом ($t' = \text{const}$), должна быть умножена на коэффициент $\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$, меньший единицы.

Промежуток времени между двумя событиями, происходящими в двух точках x_1 и x_2 , по часам K' равен:

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1 - \frac{u}{c^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}. \quad (14)$$

При $t_2 - t_1$, равном нулю, $t'_2 - t'_1$ не равно нулю, т. е. события, одновременные в системе K , уже не одновременны в системе K' .

Таким образом, лорентцевы преобразования действительно выражают в математической форме основные физические положения специальной теории относительности. Важно отметить, что при $u \ll c$ лорентцевы преобразования переходят в галилеевы. Выводы теории относительности отличаются от выводов классической механики только при анализе очень быстрых движений, происходящих со скоростью, соизмеримой со скоростью света. Для тел, движущихся с такими огромными скоростями, уже не применимы классические кинематика и динамика.

В случае скоростей малых по сравнению со скоростью света, если тело A движется по отношению к телу B со скоростью w , а тело B — со скоростью u по отношению к телу C , то при параллельных скоростях u и w скорость тела A по отношению к C , обозначаемая v , будет равна $u + w$ (т. I, § 6, 1959 г.; в пред. изд. § 9).

Тот же закон сложения скоростей легко получить из галилеевых преобразований. Свяжем систему K с телом C , а систему K' с телом B .

Тогда

$$w = \frac{dx'}{dt'}, \quad v = \frac{dx}{dt}; \quad (a)$$

но согласно последнему из уравнений (11)

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'}{dt},$$

и, продифференцировав по t первое из уравнений (11), получим:

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - u,$$

или согласно (a)

$$v = u + w.$$

В теории относительности дело обстоит значительно сложнее. Выведем формулу Эйнштейна для сложения скоростей.

Преждевсего благодаря последнему уравнению (12) уже $\frac{dx'}{dt'} \neq \frac{dx}{dt}$.
Взяв дифференциалы первого и последнего уравнений (12), получим:

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - u dt}{dt - \frac{u dx}{c^2}}. \quad (5)$$

Отсюда нетрудно получить, вводя v и w :

$$v = \frac{u + w}{1 + \frac{uw}{c^2}}, \quad (15)$$

где c — скорость света.

Из формулы (15) следует, что при u или w , равном c , скорость v также равна c , т. е. если одно из тел движется по отношению к другому со скоростью света, то оно будет двигаться с такой же скоростью по отношению к любому другому телу, с какой бы скоростью оно ни перемещалось. Таким образом, скорость света является предельной скоростью.

Одновременно следует подчеркнуть, что при u и w , значительно меньших, чем скорость света, в этой формуле можно пренебречь $\frac{uw}{c^2}$ по сравнению с единицей, и тогда формула (15) переходит в галилееву формулу: $v = u + w$. Таким образом, обычный закон сложения скоростей с точки зрения теории относительности можно рассматривать как приближение, справедливое только для скоростей, малых по сравнению со скоростью света. В обычных механических процессах мы имеем дело как раз с такими скоростями, чем и оправдывается применение галилеева закона скоростей.

§ 6. Некоторые замечания о теории относительности

В динамике наиболее важным следствием специальной теории относительности явился вывод о зависимости массы от скорости (т. II, § 77 и т. III, § 79). Этот вывод оказался в согласии с уже имевшимися ранее экспериментальными данными. Зависимость массы от скорости становится существенной только при скоростях движения тел, близких к скорости света.

Выводом теории относительности, весьма важным для развития физики, явилось требование инвариантности (неизменяемости) формы истинных законов природы при переходе от одной инерциальной системы к другой. Как уравнения Ньютона не изменяют своего вида при галилеевых преобразованиях координат, так все уравнения специальной теории относительности сохраняют свой вид при лорентцевых преобразованиях координат. Исходя из этого требования, и были получены уравнения динамики для быстрых движений. В связи с выводами теории относительности был установлен