

в рассматриваемую систему? Ответ в соответствии с опытом гласит, что в случае *равномерного и прямолинейного движения* (относительно инерциальной системы отсчета) этого *достаточно*, а для всех остальных видов движения *недостаточно*.

4. Явления природы не представляется возможным разделить на чисто «механические» и «немеханические». Если бы даже это и можно было сделать, то принцип относительности не мог бы относиться к одним только «механическим» явлениям. Действительно, всякое «механическое» явление связано с множеством «физических» явлений и обусловлено ими. И если бы принцип относительности не был справедлив для этих «физических» явлений, то он не мог бы оставаться справедливым и для «чисто механических» явлений. Поэтому принцип относительности необходимо распространить на *все явления природы* и дать ему следующую формулировку:

Законы природы, определяющие изменение состояний физических систем, не зависят от того, к какой из двух инерциальных систем отсчета, движущихся одна относительно другой прямолинейно и равномерно, они относятся.

Это положение называется *частным, или специальным, принципом относительности Эйнштейна*. Он устанавливает равноправие *только инерциальных систем отсчета*. На основе этого принципа Эйнштейн создал в 1905 г. *частную, или специальную, теорию относительности*. Через 10 лет он обобщил принцип относительности на случай *произвольных неинерциальных систем отсчета* и создал *общую теорию относительности*, иначе называемую *релятивистской теорией тяготения*. Эта фундаментальная теория приобрела особое значение в связи с астрофизическими открытиями последнего времени. Общая теория относительности стала *основной теорией* в астрофизике, в частности в космологии. Однако в нашем курсе мы можем ограничиться изложением только специальной теории относительности.

§ 102. Опыт Майкельсона

1. Основные уравнения электродинамики Максвелла — Лорентца *не инвариантны относительно преобразования Галилея*. Действительно, скорость света в вакууме, вычисленная из этих уравнений, равна постоянной c . Такой результат оставался бы верным во всех инерциальных системах отсчета, если бы в них уравнения Максвелла имели один и тот же вид. Но это несовместимо с законом сложения скоростей (101.3), который является следствием преобразования Галилея.

Неинвариантность уравнений Максвелла относительно преобразования Галилея, как думали физики конца XIX и начала XX веков, не противоречит, однако, принципу относительности. Дело в том, что во всех электродинамических явлениях, помимо обыкновенного

вещества, по господствовавшим в то время воззрениям, участвует еще *мировой эфир*. Уравнения Максвелла принимают обычный вид только в системе отсчета, в которой эфир покоится. Такая система является преимущественной или выделенной среди всех прочих инерциальных систем отсчета. Во всех остальных системах должно наблюдаться движение эфира — *эфирный ветер*. Его обнаружение считалось в XIX и начале XX веков одной из центральных проблем физики. Опыт привел к результату, что гипотеза эфира, как она понималась в физике XIX века, несостоятельна, а эфирного ветра не существует. Однако опыты по его обнаружению не совсем потеряли свое значение. Не вводя представления об эфире, можно поставить вопрос о существовании *преимущественной инерциальной системы отсчета*. На этот вопрос и отвечают опыты по обнаружению эфирного ветра.

2. Если принять гипотезу о существовании преимущественной системы отсчета, то прежде всего возникает вопрос, как движется Земля относительно этой системы? Обозначим скорость такого движения через V . Тогда, согласно дорелятивистской кинематике, в направлении вектора V скорость света относительно Земли будет $c - V$, а в прямо противоположном направлении $c + V$, где c — скорость света относительно преимущественной системы отсчета.

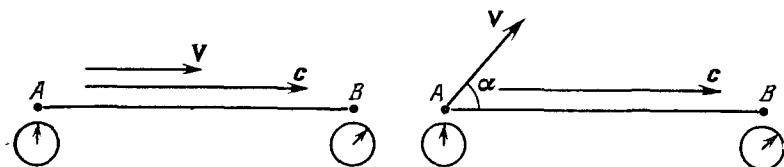


Рис. 323.

Этот результат можно подвергнуть экспериментальной проверке. Для этого, казалось бы, можно воспользоваться двумя одинаково идущими часами, установленными на Земле в различных точках A и B на расстоянии $l = AB$ друг от друга (рис. 323). Если прямая AB ориентирована вдоль скорости V , то время, затрачиваемое светом на прохождение расстояния AB , будет $t_{AB} = l/(c - V)$, а на возвращение обратно $t_{BA} = l/(c + V)$. Разность этих времен, если ограничиться точностью до первого порядка относительно V/c , равна $t_{AB} - t_{BA} \approx 2 \frac{l}{c} \frac{V}{c}$. Если прямая AB составляет с направлением скорости V угол α , то

$$t_{AB} - t_{BA} \approx 2 \frac{l}{c} \frac{V}{c} \cos \alpha.$$

Время t_{AB} находится по разности показаний часов в моменты прихода светового сигнала в B и его отправления из A . Таким же путем находится время t_{BA} .

Не было недостатка в предложениях, часто остроумных, как фактически осуществить опыт. Но в принципиальном отношении все они не отличались от схемы опыта, описанной выше. Предложения такого рода были оставлены после следующего замечания Майкельсона. Времена t_{AB} и t_{BA} измеряются с помощью *двух часов*, находящихся в различных точках пространства. Для измерения необходимо эти часы *синхронизовать*, что практически невозможно сделать с требуемой точностью. (Эйнштейн позднее заметил, что эта трудность *принципиальная*, а не только практическая, см. § 104.) Для осуществления опыта надо обойтись без синхронизации, т. е. все измерения производить с помощью *только одних часов*. Для этого из точки A , где помещены часы, надо послать световой сигнал и отразить его обратно в A с помощью зеркала, помещенного в B . Полное время распространения света t вдоль прямой AB туда и обратно можно измерить с помощью лишь одних часов. Делением удвоенного расстояния между точками A и B на это время можно найти скорость света c . Но это будет не скорость света в каком-либо одном определенном направлении, а *средняя скорость в двух прямо противоположных направлениях*. Майкельсон исследовал зависимость полного времени t от ориентации прямой AB .

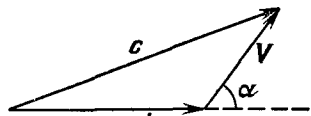


Рис. 324.

Как видно из рис. 324, $c^2 = c'^2 + V^2 + 2Vc' \cos \alpha$, где c и V — скорости света и Земли относительно преимущественной системы отсчета, c' — скорость света относительно Земли, а α — угол между скоростями V и c' . Решая полученное квадратное уравнение относительно c' , найдем

$$c' = -V \cos \alpha + c \sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \alpha},$$

где введено обозначение $\beta = V/c$. Ограничиваясь квадратами β , получим

$$c' = c \left(1 - \beta \cos \alpha - \frac{1}{2} \beta^2 \sin^2 \alpha \right).$$

3. Майкельсон воспользовался сконструированным им интерферометром, описанным в § 35 (рис. 140). Пластика P_2 была введена для уравнивания оптических длин плеч интерферометра. Без этого интерференция в белом свете была бы невозможна. В принципиальных рассуждениях от наличия пластинки P_2 можно отвлечься и считать разделительную пластинку P_1 бесконечно тонкой. Пусть плечо интерферометра 2 составляет с направлением скорости V угол α . Тогда нахождение расстояния от A до зеркала M_2 и

обратно свет затратит время

$$t_2 = \frac{l}{c} \frac{1}{1 - \beta \cos \alpha - 1/2 \beta^2 \sin^2 \alpha} + \frac{l}{c} \frac{1}{1 + \beta \cos \alpha - 1/2 \beta^2 \sin^2 \alpha} = \\ = \frac{2l}{c} \frac{1 - 1/2 \beta^2 \sin^2 \alpha}{(1 - 1/2 \beta^2 \sin^2 \alpha)^2 - \beta^2 \cos^2 \alpha} \approx \frac{2l}{c} \frac{1 - 1/2 \beta^2 \sin^2 \alpha}{1 - \beta^2}.$$

Найдем теперь время t_1 , которое требуется свету, чтобы пройти туда и обратно перпендикулярное плечо интерферометра. Оно найдется из предыдущего выражения заменой угла α на угол $\alpha \pm \frac{\pi}{2}$. Это дает

$$t_1 = \frac{2l}{c} \frac{1 - 1/2 \beta^2 \cos^2 \alpha}{1 - \beta^2}.$$

Таким образом,

$$t_2 - t_1 = \frac{l}{c} \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \cos 2\alpha \approx \frac{l}{c} \beta^2 \cos 2\alpha.$$

Этой разности времен соответствует разность фаз интерферирующих лучей

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi c}{\lambda} (t_2 - t_1) = \frac{2\pi l}{\lambda} \beta^2 \cos 2\alpha.$$

При вращении интерферометра угол α будет меняться, а интерференционные полосы должны смещаться. Этот эффект и пытался обнаружить Майкельсон.

Если за единицу принять ширину интерференционной полосы, то смещение полос при повороте интерферометра будет

$$\Delta N = \frac{\Delta(\varphi_2 - \varphi_1)}{2\pi} = \frac{l}{\lambda} \beta^2 \Delta(\cos 2\alpha). \quad (102.1)$$

Максимального значения

$$\Delta N_{\text{макс}} = \frac{2l}{\lambda} \beta^2 \quad (102.2)$$

оно достигает, когда при повороте интерферометра $\cos 2\alpha$ меняется от ± 1 до ∓ 1 . Отсюда видно, что ожидаемое смещение очень мало, так как оно *второго порядка* по $\beta \equiv V/c$. Точно оценить его невозможно, поскольку скорость Земли относительно преимущественной инерциальной системы отсчета неизвестна. Можно, однако, оценить нижний предел $\Delta N_{\text{макс}}$. Действительно, допустим сначала, что Солнце покоится относительно преимущественной системы отсчета. Тогда под V надо понимать скорость движения Земли по своей орбите, которая равна около 30 км/с, так что $\beta = 10^{-4}$, $\beta^2 = 10^{-8}$. В первом опыте Майкельсона (1881 г.) длина плеча интерферометра была $l = 1,2$ м. Если взять $\lambda = 600$ нм, то получится $\Delta N_{\text{макс}} = 0,04$ полосы.

При учете движения Солнца можно ожидать и большего смещения. Действительно, разложим скорость движения Солнца на со-

ставляющую V_{\parallel} в плоскости земной орбиты и составляющую V_{\perp} , перпендикулярную к этой плоскости. Полная скорость Земли будет $V = V_{\text{орб}} + V_{\parallel} + V_{\perp}$, где $V_{\text{орб}}$ — скорость орбитального движения Земли. Если опыт производится в момент, когда направления скоростей $V_{\text{орб}}$ и V_{\parallel} совпадают между собой, то для полной скорости Земли можно написать

$$V^2 = (V_{\text{орб}} + V_{\parallel})^2 + V_{\perp}^2,$$

так что V получится больше $V_{\text{орб}}$. Следовательно, и ожидаемое смещение полос будет больше вычисленного выше.

Конечно, минимальное ожидаемое смещение в 0,04 полосы, вычисленное выше, могло бы наблюдаться только два раза в год, когда направление эфирного ветра совпадает или прямо противоположно направлению движения Земли. Поэтому необходимо производить наблюдения в течение по крайней мере *полугода*, что фактически и делалось Майкельсоном и всеми физиками, повторявшими его опыт.

Опыт был поставлен настолько тщательно, что позволял обнаружить смещение на 0,01 интерференционной полосы. Ожидаемое смещение на 0,04 полосы могло быть уверенно обнаружено на фоне неизбежных случайных ошибок измерений. Оказалось, что смещения нет. Точнее, результат опыта позволял утверждать, что скорость эфирного ветра, если бы он существовал, не может превышать 18 км/с.

4. В 1887 г. Майкельсон повторил свой опыт совместно с Морли (1837—1923). Для того чтобы при вращении интерферометра не возникали деформации, вызывавшие небольшое смещение интерференционных полос, интерферометр вместе с остальной аппаратурой монтировался на тяжелой цементной плите, которая плавала в сосуде со ртутью. С той же целью прибор все время находился в медленном вращении, даже в моменты наблюдения. Путем применения многократных отражений от 16 зеркал, установленных на той же плите, эффективная длина плеча интерферометра была доведена до 11 м. Ожидаемое смещение из-за орбитального движения Земли составляло уже 0,4 интерференционной полосы. Максимально наблюдавшееся смещение (из-за неизбежных случайных помех) составляло 0,02, а среднее — много меньше 0,01 интерференционной полосы. Опыт позволил утверждать, что скорость эфирного ветра не может превышать 7 км/с. Сам Майкельсон пришел к заключению, что результат опыта определенно отрицательный — *эфирного ветра не существует*.

Опыт Майкельсона неоднократно повторялся другими физиками с улучшенной аппаратурой и улучшенными методами наблюдения. Не останавливаясь на истории вопроса, укажем только, что к началу 30-х годов было с достоверностью установлено, что скорость эфирного ветра, если он и существует, не может превышать 1—1,5 км/с.

5. Изобретение лазеров, благодаря исключительно высокой степени монохроматичности и пространственной когерентности этих источников света, позволило чрезвычайно упростить схему опыта Майкельсона и повысить его точность. Опыт был поставлен в 1964 г. американскими физиками Джасея, Джаваном, Мурреем и Таунсом. Идея опыта заключалась в следующем.

Если скорость света зависит от направления его распространения относительно Земли, то частота, на которой генерирует лазер, должна изменяться при его повороте. Это изменение пропорционально β^2 , т. е. второго порядка по β . Два одинаковых гелий-неоновых лазера были установлены на поворотной платформе перпендикулярно друг к другу (рис. 325). Световой пучок от одного из лазеров проходил полупосеребренное зеркало S , а пучок от другого лазера отражался от того же зеркала. Далее пучки шли в одном и том же направлении и попадали в фотоэлектронный умножитель, установленный на той же поворотной платформе. Если бы частоты этих пучков немного отличались друг от друга, то должны были бы возникнуть биения фототока с частотой, лежащей в области радиодиапазона, которые можно было бы наблюдать обычными радиотехническими приемами с помощью анализатора A .

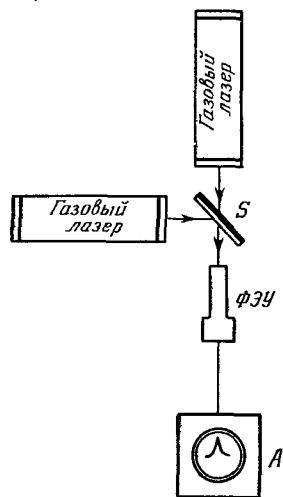


Рис. 325.

Частота биений должна была бы меняться при вращении прибора. Если в исходном положении один лазер был ориентирован вдоль, а другой — перпендикулярно к направлению движения Земли, то при повороте прибора на 90° , согласно теории неподвижного эфира, из-за орбитального движения Земли должно было бы наблюдаться изменение разности частот лазеров примерно на 3 МГц, тогда как возможная ошибка опыта не превосходила нескольких герц. На опыте такое смещение обнаружено не было. На основании своих наблюдений экспериментаторы пришли к заключению, что скорость эфирного ветра, если бы таковой существовал, не может превышать 30 м/с. По сравнению с предыдущими результатами точность была повышена примерно в 50 раз.

6. Отрицательный результат опыта Майкельсона доказывает, что в земной системе отсчета скорость света в вакууме *изотропна*, т. е. не зависит от направления его распространения. Под скоростью света здесь понимается *средняя скорость* в двух противоположных направлениях — она и только она определяет результат опыта с «одними часами». Обобщая этот результат, мож-

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