

связано с важным уточнением и углублением самого понятия скорости света (§ 43).

Скорость света в воздухе также меньше, чем в пустоте. Несмотря на то, что отношение этих скоростей весьма близко к единице (оно равно 0,99971), в ряде случаев приходится считаться не только с его отклонением от единицы, но и с изменениями этого отклонения при изменениях плотности воздуха.

Например, Майкельсону при точном определении скорости света приходилось производить эксперименты в откачанных до низкого давления трубах колоссальной длины, чтобы устранить влияние колебаний плотности воздуха. В настоящее время конечность скорости света даже нашла себе практическое применение. Наряду с радиолокацией (т. II, § 98, 1959 г.; в пред. изд. § 103) существует *оптическая локация*, при которой расстояние до локируемого предмета определяется по времени прохождения короткого светового импульса, отраженного предметом и регистрируемого фотоэлементом. При помощи оптической локации определяют, например, высоту облаков.

§ 4. Опыт Майкельсона

Описывая опыты по определению скорости света, мы как бы забываем о том, что все эти опыты производятся на Земле, несущейся в мировом пространстве с огромной скоростью, превышающей в десятки раз скорость артиллерийского снаряда. Правда, в этих опытах наблюдатель и источник света неподвижны относительно друг друга, но если считать, что Земля движется по отношению к неподвижному эфиру, в котором распространяются световые волны, то следует ожидать влияния этого движения на результаты наблюдений.

Разберем описанные выше методы определения скорости света, считая мировой эфир неподвижным, а Землю движущейся. В обоих методах — и Физо и Фуко — определялось время, необходимое световому лучу для того, чтобы пройти от какой-то точки *A* до точки *B* и вернуться обратно в точку *A*. Мы считали, что это время равно просто $\frac{2a}{c}$, где *a* — длина отрезка *AB*, *c* — скорость света.

Теперь мы должны уточнить наше рассуждение. Прежде всего мы определим *c* как скорость света по отношению к неподвижному эфиру. Затем надо учесть, что в результате движения Земли, согласно законам механики Ньютона, скорость света по отношению к Земле уже не будет равна *c*. Если направление распространения светового луча совпадает с направлением движения Земли, то эта скорость должна быть равна *c*—*v*; если свет и Земля движутся в противоположных направлениях, то *c*+*v*, где *v* — скорость Земли по отношению к эфиру. В первом случае свет должен «догонять» Землю, во втором, наоборот, свет и Земля движутся навстречу друг другу.

Рис. 6 изображает случай, когда отрезок AB параллелен направлению движения Земли; тогда от A к B луч идет с относительной скоростью $c-v$, а в обратном — со скоростью $c+v$.

Значит, от A до B он дойдет за время $\frac{a}{c-v}$, а от B до A — за время

$\frac{a}{c+v}$, полное же время t_1 определится следующим образом:

$$t_1 = \frac{a}{c-v} + \frac{a}{c+v} = \frac{2a}{c} \left(\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \right), \quad (7)$$

или с точностью до величин четвертого порядка (относительно v/c):

$$t_1 = \frac{2a}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (7')$$

Рис. 6. Распространение света в движущейся системе.

Мы видим, что учет движения Земли привел к некоторой поправке, правда небольшой по величине: $\frac{v}{c} = 10^{-4}$, следовательно, $\frac{v^2}{c^2} = 10^{-8}$.

Рассмотрим теперь другой случай расположения отрезка AB (рис. 6, справа). Пусть отрезок AB перпендикулярен к направлению движения Земли и в B помещено плоское зеркало. Скорость света по отношению к Земле в этом случае будет равна $\sqrt{c^2 - v^2}$ и в прямом (от A к B) и в обратном направлениях (от B к A).

В этом случае косое направление скорости c по отношению к v определяется тем, что за время прохождения светового сигнала из A в B сама точка B смещается вправо (аналогично будет при обратном пути от B к A).

Полное время распространения света определится как

$$t_2 = \frac{2a}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2a}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right). \quad (8)$$

Извлекая приближенно корень квадратный, получаем:

$$t_2 = \frac{2a}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{2c^2}} \right),$$

откуда с точностью до величин четвертого порядка

$$t_2 = \frac{2a}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (9)$$

Сопоставляя t_1 и t_2 , мы видим, что

$$t_1 - t_2 = \frac{a}{c} \frac{v^2}{c^2}. \quad (10)$$

Таким образом, следует ожидать, что измерение разности времен t_1 и t_2 при двух взаимно-перпендикулярных расположениях AB позволит определить скорость движения Земли по отношению к эфиру.

Неприятным в формуле (10) является то, что в нее входит квадрат отношения искомой скорости к скорости света. Тем самым речь идет об установлении «эффектов второго порядка малости».

Делалось много попыток обнаружить эффекты первого порядка, однако все они были неудачны. Часть из них, основанная на исследовании явлений преломления, интерференции, дифракции и др., покоилась на неверных принципиальных основаниях. Лоренц показал, что во всех этих случаях отсутствие эффектов первого порядка вытекает из теории неподвижного эфира с таким же успехом, как и из теории полностью увлекаемого эфира.

Другие попытки, носившие, правда, характер неосуществленных проектов, были основаны на схемах с часами, расположенными на расстоянии друг от друга. В таких схемах определяется время прохождения светом пути от одних часов до других. Зная расстояние между часами, мы можем вычислить скорость света. Так как в этом случае путь светового луча по отношению к Земле не замкнут (луч идет от A к B , но не возвращается опять в A), можно было надеяться на обнаружение эффектов первого порядка, связанных с движением Земли.

Однако очевидно, что для таких опытов нужно иметь совершенно одинаково (синхронно) идущие часы в точках A и B . Майкельсон показал, что самые точные методы синхронизации часов, находящихся в разных точках, практически сводятся к посылке электромагнитных сигналов из одной точки в другую, т. е. ко всем теперь хорошо известной «поверке времени» по радио.

Но эти сигналы распространяются опять-таки со скоростью света. Таким образом, путь световой (электромагнитной) волны оказывается замкнутым, и мы опять приходим к эффектам второго порядка, соответствующим формулам (7), (9) и (10). Поэтому Майкельсон взялся за осуществление опыта, позволяющего непосредственно обнаружить эффекты второго порядка. Здесь сразу возникает законный вопрос: нельзя ли было воспользоваться для этих целей схемами опытов по определению скорости света, уже описанными выше? Ведь мы как раз показали, что во всех этих опытах должны были наблюдаться эффекты второго порядка. В принципе действительно это так: если бы Майкельсон при определении скорости света по методу Физо — Фуко проделал измерения для двух положений трубы (в которой распространялся свет), соответствующих рис. 6, он должен

был бы получить разность времен запаздывания, определяемую формулой (10).

Однако обнаружить существование этой разности он практически не смог бы, несмотря на использование больших расстояний. Ведь мы указывали, что Майкельсон определил скорость света с точностью до 1 км, т. е. примерно с точностью до 0,000003 измеряемой величины. Как ни велика эта точность, она недостаточна для обнаружения эффектов второго порядка, соответствующих одной стомиллионной доле измеряемой величины (см. выше).

Майкельсон блестяще обошел это затруднение, использовав волновые свойства света. На рис. 7 изображена схема знаменитого опыта Майкельсона.

Луч света, выходящий из Q , падает на полупрозрачную пластинку P , расположенную под углом 45° ; половина света отражается по направлению к S_1 , половина проходит сквозь пластинку к S_2 ; в S_1 и S_2 помещены зеркала, отражающие световые лучи обратно; лучи, идущие обратно, опять попадают на пластинку P , причем половина света, отраженного от S_1 , пройдет сквозь пластинку и попадет в трубу F ; точно так же половина света, отраженного от S_2 , отразится от пластинки P и попадет в трубу (для наглядности мы несколько сместили на рисунке прямые и обратные лучи).

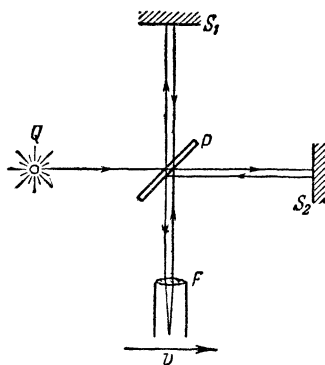


Рис. 7. Схема опыта Майкельсона.

В результате в трубе сойдутся два световых луча, которые от Q до P шли в равных условиях, а затем один из них прошел путь PS_1P , а другой PS_2P ; путь от P до F опять будет общим.

Если прибор движется вместе с Землей в направлении, указанном стрелкой, то, очевидно, условия распространения лучей соответствуют двум разобранным выше случаям ориентации отрезка AB (рис. 6). Если расстояния PS_1 и PS_2 равны друг другу, то второй луч запаздает по отношению к первому лучу на время, определяемое формулой (10), где a — расстояние от P до S_1 или S_2 .

При повороте на 90° соотношение между лучами изменяется на обратное, и таким образом, если раньше запаздывание было равно $\frac{a}{c} \frac{v^2}{c^2}$, то теперь это будет $-\frac{a}{c} \frac{v^2}{c^2}$; полное изменение запаздывания при повороте будет равно $2 \frac{a}{c} \frac{v^2}{c^2}$.

В приборе Майкельсона благодаря использованию многократных отражений a было порядка 5,5 м (хотя весь прибор помещался на плите $1,5 \times 1,5$ м), следовательно, изменение запаздывания

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,