

жаться ни в каком другом сосуде, как только в самой сокровенной субстанции материальных вещей». Таким образом, все эти теории приводят к концепции среды, в которой имеет место распространение. И, если мы примем эту среду в качестве гипотезы, я считаю, что она должна занимать выдающееся место в наших исследованиях и что нам следовало бы попытаться сконструировать рациональное представление о всех деталях ее действия, что и было моей постоянной целью в этом трактате».

Возможный прямой опыт с целью проверки, зависит ли скорость света от движения Земли, должен состоять в точном определении времени однократного прохождения светового импульса по измеренному пути. Это следовало бы сделать отдельно в двух направлениях — с севера на юг и затем с востока на запад, а потом повторить все через шесть месяцев, когда скорость движения Земли вокруг Солнца примет противоположное направление. В результате разработки лазеров в распоряжении физиков имеются часы, точность которых достаточна для такого прямого эксперимента; точность измерения в настоящее время лимитируется, по-видимому, продолжительностью нарастания импульса лазера. При величине этого интервала времени 10^{-9} сек в определение длины пути света вносится эффективная ошибка, численно равная $10^{-9} c = 30$ см. В таком опыте двое часов должны быть синхронизированы в одном месте, а затем медленно разведены на свои конечные места.

Был произведен ряд опытов с целью проверки, выполняется ли равенство (25), т. е. с целью обнаружить, существует ли движение относительно эфира. Все они показали, что не существует движения Земли относительно эфира; наиболее убедительными были опыты Майкельсона и Морли.

10.5. Опыты Майкельсона и Морли

Две последовательности световых волн, вышедших из общего монохроматического источника, могут, интерферируя, усиливать или ослаблять друг друга в данной точке в зависимости от разности фаз волн, пришедших в эту точку. Эту разность фаз можно изменить, сделав так, чтобы одна последовательность волн прошла более длинный путь, чем другая. Майкельсон и Морли построили сложный интерферометр, основные части которого изображены схематически на рис. 10.29 и 10.30. Пучок света от одного источника s разделялся в точке a полупрозрачным зеркалом. Мы продолжим описание опыта теми же словами и с теми же обозначениями, которые применяли сами исследователи *).

*) A. A. Michelson, E. W. Morley, Am. J. Sci. 34, 333 (1887). Это был один из самых замечательных экспериментов девятнадцатого столетия. Простой по существу, этот опыт привел к революции в науке с далеко идущими последствиями. Заметьте, что отношение скорости движения Земли по орбите к скорости света — около 10^{-4} . Цитируя оригинал, мы писали c вместо обозначения авторов V_2 и V вместо обозначения авторов v ; наши замечания к тексту оригинала заключены в квадратные скобки.

«Пусть sa [рис. 10.29] — это луч света, который частично отражается по направлению ab , а частично пропускается по направлению ac ; оба образовавшихся луча затем отражаются зеркалами b и c по направлениям ba и ca , ba частично пропускается по направлению ad , а ca частично отражается по этому же направлению ad . Тогда, если пути ab и ac равны, то эти два луча интерферируют на пути ad . Предположим теперь, что при неподвижном эфире весь прибор движется в направлении sc со скоростью Земли по ее

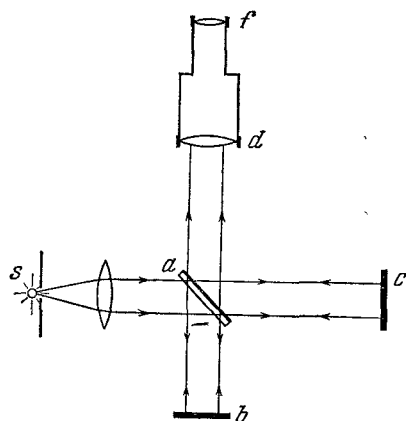


Рис. 10.29. В опыте Майкельсона и Морли интерферометр состоял из источника света s , полупрозрачного зеркала a , зеркал b и c и приемника света — зрительной трубы d ; f — фокальная плоскость зрительной трубы. Если интерферометр был неподвижен относительно эфира, то с помощью трубы d можно было наблюдать интерференцию пучков aba и aca .

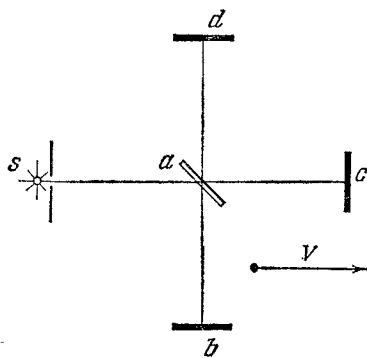


Рис. 10.30. Если бы прибор (и Земля) обладали скоростью по отношению к гипотетическому эфиру, то мы бы наблюдали, как в трубе d изменяется интерференционная картина, потому что времена, за которые проходятся пути aba и aca , соответственно изменялись бы на неодинаковые величины.

орбите; направления и расстояния, пройденные лучами, изменятся следующим образом: луч sa отражается по направлению ab' и возвращается по направлению $b'a'$ [рис. 10.30], причем угол $ab'a'$ равен 2α — удвоенному углу аберрации; затем этот луч попадает в фокус зрительной трубы, направление которой неизменно. Проходящий луч идет по направлению ac' , возвращается по направлению $c'a'$ и отражается от a' , причем угол $c'a'd'$ равен $90^\circ - \alpha$, и поэтому направление луча совпадает с направлением первого луча.

Следует заметить, что лучи $b'a'$ и $c'a'$ не встречаются точно в одной и той же точке a' , но это различие является величиной второго порядка и не влияет на правильность рассуждения. Теперь нужно найти разность длин двух путей: $ab'a'$ и $ac'a'$.

Пусть c — скорость света, V — скорость движения Земли по орбите, D — расстояние ab или ac [рис. 10.29], T — время, за которое свет проходит от a до c' , T' — время, за которое свет возвращается от c' к a' [рис. 10.30].

Тогда

$$T = \frac{D}{c-V}, \quad T' = \frac{D}{c+V}. \quad (27a)$$

Все время, за которое свет проходит до точки c' и возвращается обратно, равно

$$T + T' = 2D \frac{c}{c^2 - V^2}, \quad (27б)$$

а расстояние, пройденное за это время, равно

$$2D \frac{c^2}{c^2 - V^2} \approx 2D \left(1 + \frac{V^2}{c^2} \right), \quad (27в)$$

если пренебречь слагаемыми четвертого порядка. Длина другого пути, очевидно, равна

$$2D \sqrt{1 + \frac{V^2}{c^2}}, \quad (27г)$$

или, с той же степенью точности,

$$2D \left(1 + \frac{V^2}{2c^2} \right). \quad (27д)$$

Следовательно, разность этих длин равна

$$D \frac{V^2}{c^2}. \quad (27е)$$

Если теперь повернуть весь прибор на 90° , то эта разность будет иметь противоположный знак; следовательно, смещение интерференционных полос должно быть равно $2D (V^2/c^2)$. Принимая во внимание, что V — это скорость движения Земли по ее орбите, следует считать величину этого смещения равной $2D \cdot 10^{-8}$. Если, как это было в первом опыте, $D = 2 \cdot 10^6$ длин волны желтого света, то ожидаемое смещение должно было бы равняться 0,04 расстояния между интерференционными полосами.

Одна из основных трудностей, встретившихся в первом опыте, заключалась в повороте прибора таким образом, чтобы не возникало искажение; другая трудность заключалась в крайней чувствительности к вибрации. Она [вибрация] оказалась так велика, что когда работа велась в городе, то даже в два часа ночи было невозможно видеть интерференционные полосы, за исключением коротких интервалов. Наконец, как отмечалось выше, величина, подлежащая наблюдению, а именно смещение на расстояние несколько меньшее, чем $1/20$ интервала между интерференционными полосами, была, по-видимому, слишком мала, чтобы ее можно было обнаружить при наличии экспериментальных ошибок, искажающих ожидаемый результат.

Первая из указанных трудностей была полностью преодолена [во втором опыте] посредством установки прибора на массивное каменное основание, плавающее на ртути; а вторая — посредством

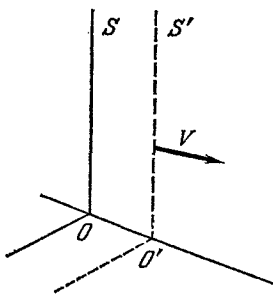


Рис. 10.31. Чтобы убедиться в правильности этого рассуждения (см. подпись к рис. 10.29, 10.30), рассмотрим инерциальную систему отсчета S' , движущуюся вместе с Землей и интерферометром. S — инерциальная система отсчета, неподвижная относительно эфира.

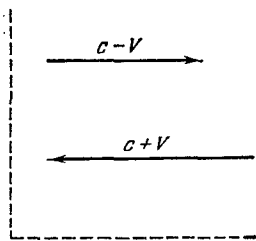


Рис. 10.32. Согласно преобразованию Галилея свет, движущийся вправо, имеет в системе отсчета S' скорость $c-V$; свет, движущийся влево, имеет в системе S' скорость $c+V$.

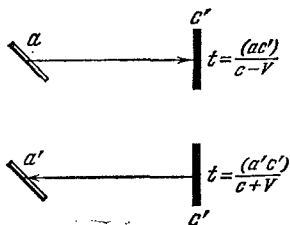


Рис. 10.33. Таким образом, время, за которое свет проходит от a к c' и возвращается в a' , равно $\Delta t(ac'a') = \frac{(ac')}{c-V} + \frac{(a'c')}{c+V}$, где через (ac') обозначается расстояние между a и c' .

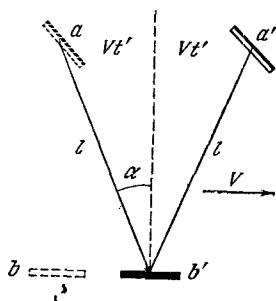


Рис. 10.34. Чему равно время $\Delta t(ab'a')$, за которое свет проходит от a к b' и возвращается в a' ? В инерциальной системе отсчета S , неподвижной относительно эфира, интерферометр имеет скорость V , направленную вправо; свет имеет скорость c .

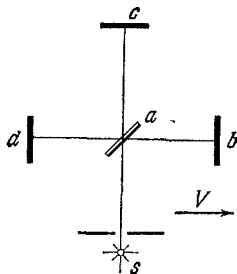
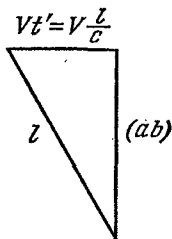


Рис. 10.36. Таким образом, даже если $(ab) = (ac)$, то на основании преобразования Галилея мы должны были бы ожидать смещения интерференционной картины, если изменится скорость интерферометра относительно эфира. Однако никакого смещения не наблюдалось.

Рис. 10.35. $l^2 = \frac{V^2}{c^2} l^2 + (ab)^2$, следовательно

$$\text{но, } l = \frac{(ab)}{(1 - V^2/c^2)^{1/2}}$$

$$\Delta t(ab'a') = 2l' = 2(ab)/(c^2 - V^2)^{1/2}$$

увеличения длины пути света примерно в десять раз по сравнению с первоначальным значением за счет многократного отражения.

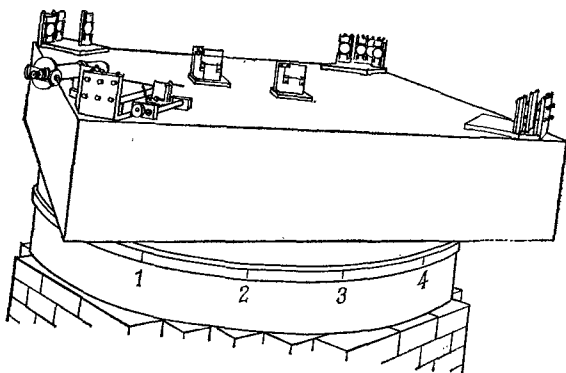


Рис. 10.37. Вид прибора, описанного Майкельсоном и Морли в их статье в 1887 г.

...Если рассматривать движение Земли только по ее орбите, то смещение должно быть равно

$$2D \frac{V^2}{c^2} = 2D \cdot 10^{-8}.$$

Расстояние D составляло около одиннадцати метров, т. е. $2 \cdot 10^7$ длин волн желтого света; следовательно, ожидаемое смещение полос равнялось 0,4 расстояния между полосами [если бы Земля двигалась относительно эфира]. Фактически наблюдавшееся смещение было наверняка меньше двадцатой части этой величины и, вероятно, меньше, чем ее сороковая часть. Однако поскольку смещение пропорционально квадрату скорости, то скорость Земли относительно эфира, вероятно, должна быть меньше одной шестой части от орбитальной скорости Земли и наверняка меньше одной четвертой».

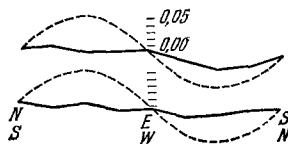


Рис. 10.38. «Результаты наблюдений выражены графически [на рисунке]. На верхнем графике дана кривая для наблюдений, выполненных днем, а на нижнем графике — для ночных наблюдений. Пунктирные кривые соответствуют одной восьмой части теоретического смещения. По-видимому, правильно сделать на основании рисунка вывод, что если есть какое-то смещение, обусловленное относительным движением Земли и светоносного эфира, то оно не может быть намного больше, чем 0,01 расстояния между полосами» (из статьи Майкельсона и Морли). По вертикальной оси откладывается смещение полос. Горизонтальная ось относится к ориентации интерферометра относительно линии восток—запад.

Экспериментальные результаты, полученные Майкельсоном и Морли, противоречат тому, что мы могли бы ожидать, основываясь на преобразовании Галилея. В течение 80 лет после их опытов подобные опыты повторялись (с видоизменениями) для света различных длин волн, для света звезд или для предельно монохроматического света современного лазера. Они проводились на большой высоте и под землей, на различных

континентах и в различное время года. В результате этих опытов скорость движения Земли относительно эфира следует считать равной нулю с возможной ошибкой менее 10^3 см/сек, т. е. менее одной тысячной от скорости орбитального движения Земли вокруг Солнца, так как с такой точностью равны между собой значения скорости света по направлению движения Земли и против него.

10.6. Инвариантность величины c

Результат опытов Майкельсона и Морли показывает, что нельзя обнаружить существование эфира. Это означает, что величина эффекта Доплера при распространении света должна зависеть только от относительной скорости двух систем отсчета, а не от абсолютной скорости по отношению к какому-то неподвижному эфиру *). Этот результат означает также, что величина скорости света не зависит от движения источника или наблюдателя. Последний вывод довольно хорошо доказан экспериментально, но точность этих экспериментов можно еще улучшить. Работа Саде, цитируемая в гл. 11, показывает, что скорость γ -лучей, испускаемых источником, который движется со скоростью порядка $1/2c$, остается постоянной с точностью $\pm 10\%$ независимо от скорости движения источника.

На основании всех экспериментальных данных мы приходим к следующему выводу: *если фронт световой волны от точечного источника является сферическим в какой-либо одной инерциальной системе отсчета, то он будет сферическим и для наблюдателя в любой другой инерциальной системе отсчета.*

Мы отметили выше, что скорость распространения электромагнитных волн не зависит от частоты в интервале от 10^8 до 10^{22} *гц*. Тщательные измерения показывают также, что величина c не зависит от интенсивности света и от наличия других электрических и магнитных полей. Все это относится только к электромагнитным волнам, распространяющимся в свободном от вещества пространстве.

10.7. Предельная скорость

Мы видели, что в свободном от вещества пространстве электромагнитные волны могут распространяться только со скоростью c . Может ли скорость чего-либо превосходить этот предел скорости c ?

Рассмотрим движение заряженных частиц в ускорителе. Можно ли так разогнать частицы, чтобы они двигались со скоростью, большей c ? До сих пор мы в этом курсе еще не встречались

*) Заметьте, что в этом отношении распространение света отличается от распространения звука. При анализе эффекта Доплера для звука мы должны были знать скорость среды относительно источника и приемника. Опыты Майкельсона и Морли говорят нам, что, рассматривая распространение света в свободном от вещества пространстве, мы должны забыть об эфире.