

Michelson-Morley Experiment

Valery Timin

Creative Commons Attribution 3.0 License

(August 28, 2019)

Russia, RME

The Michelson-Morley experiment is devoted to the experimental measurement of the anisotropy of the speed of light propagation on the Earth's surface. Since at that time it was believed that space is filled with ether and light propagates in it, it was assumed possible to determine the speed of the Earth relative to the "ether" and the direction of motion of the Solar system in the space ASO.

Опыт Майкельсона-Морли посвящен экспериментальному измерению анизотропии скорости распространения света на поверхности Земли. Т.к. в то время считалось, что пространство заполнено эфиром и свет распространяется в ней, то предполагалось возможным определить скорость Земли относительно "эфира" и направления движения Солнечной системы в космическом АСО.

(Translated by Yandex Translator [Яндекс-Переводчик](#))

Эксперимент Майкельсона-Морли

Оглавление

Эксперимент ММ в галилеевом пространстве	3
Экспериментальная установка ММ.....	5
Объяснение эксперимента ММ в СТО.....	6

Опыт Майкельсона-Морли посвящен экспериментальному измерению анизотропии скорости распространения света на поверхности Земли. Т.к. в то время считалось, что пространство заполнено эфиром и свет распространяется в ней, то предполагалось возможным определить скорость Земли относительно "эфира" и направления движения Солнечной системы в космическом АСО.

Этот вопрос вызывает большой интерес в среде физиков и сегодня, потому что ответ на него не очевиден и в пространствах с различной геометрией и скоростью получения информации ответ может быть различным. Геометрия реального пространства определяется ее физическими эталонами, а в теоретической физике - ее абстрактной математической метрикой, повторяющей свойства эталонов. Например, в галилеевом пространстве, в котором возможно движение м.о. с произвольной скоростью, скорость получения информации стремится к бесконечности. И в ней должны существовать два абсолютных эталона – длины и времени.

Кроме движения м.о. с произвольной скоростью, в пространстве возможно также и волновое движение, скорость распространения фронта волны которой конечна. В галилеевом пространстве с бесконечной скоростью получения информации можно однозначно получить информацию о скорости распространения фронта волны простым опытом по формуле вычисления скорости по известному расстоянию L и времени распространения Δt :

$$c = \frac{L}{\Delta t}, \quad (1)$$

причем этим способом можно получить скорость фронта волны в любом направлении. В том мире, в котором мы живем, эта формула прекрасно работает с любыми волновыми движениями. Но оказалось, не со всеми. Эксперимент Майкельсона-Морли показал, что свет распространяется в любом направлении в любой с.о. с одной и той же скоростью $c \sim 3 \cdot 10^8$ м/с.

В пространстве, в котором нет абсолютных эталонов, возможно существование только эталонов на основе не абсолютных эталонов длины и времени на основе волновых движений. Следовательно, и сами параметры волновых движений можно будет измерять только сравнением с другими волновыми процессами. А основными волновыми параметрами являются длина и временная продолжительность определенного количества волн эталонного периодического процесса в вакууме (в "эфире"?). В свете этого скорость распространения света не может зависеть ни от направления, ни от скорости с.о., потому что они должны быть измерены с помощью этой же световой волны или по крайней мере связаны с ней через электромагнитные взаимодействия. В опыте Майкельсона-Морли еще питали надежду, что это не так и "твердые" м.о. не являются "волновыми" объектами, а являются галилеевыми объектами.

Современные практические эталоны, используемые в технике и физике, как раз являются такими. Международный комитет мер и весов в 1967 г. принял **новое определение**

секунды, которая получила название АТОМНОЙ СЕКУНДЫ, - это время, в течение которого совершается $9'192'631'770$ переходов между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 при температуре абсолютного нуля по шкале Кельвина. **Метр** определяется как длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299792458$ с. Из этого следует, что в системе СИ скорость света в вакууме принята равной 299792458 м/с.

А. Эйнштейн в своей работе “К электродинамике движущихся сред” указывал, что распространению принципа относительности на оптику и электродинамику содействовали “неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно “светоносной среды”. Многие физики считают, что появление специальной теории относительности (СТО) А. Эйнштейна было следствием объяснения отрицательного результата именно опыта Майкельсона-Морли, в котором, как полагают, вопрос о движении Земли относительно эфира был поставлен в наиболее прямой форме. Эта версия укоренилась в литературе, в частности, в учебной: очень удобно методически выводить СТО из опыта Майкельсона-Морли.

Эксперимент ММ в галилеевом пространстве

Цель опыта Майкельсона-Морли заключалась в определении скорости “эфирного ветра”, обусловленного движением Земли относительно эфира - гипотетической среды, заполняющей, все мировое пространство и свободно проходящей сквозь любые вещества и среды: твердые тела, жидкости, газы. В настоящее время точность опытов позволяет найти относительные отклонения изотропности скорости света в единицы 10^{-18} , однако на этом уровне никаких отклонений не найдено. Опыты Майкельсона являются эмпирической основой принципа инвариантности скорости света, входящего в общую теорию относительности (ОТО) и специальную теорию относительности (СТО).

Посмотрим, как происходит движение света, точнее, время движения света, в представлении как классической волны, в простейшем случае при движении от точки *A* до точки *B* и обратно. Это движение может быть разделено на два принципиально различных случая – 1) в состоянии покоя и 2) в состоянии движения относительно эфира. В каждом из этих случаев можно выделить еще три подслучая: а) движение “туда”, б) движение “обратно”, с) движение “туда и обратно”. В галилеевом абсолютном пространстве каждый из этих случаев не только вычисляется теоретически, но и экспериментально измеримо. В не абсолютном пространстве это может быть и не так – в каждой с.о. свои эталоны длины и времени.

1). **Если нет “эфирного ветра”**, т.е. точки *A* и *B* находятся в состоянии покоя относительно “эфира”. Время распространения “туда и обратно” определяется по формуле

$$T_{||} = t_b + t_n = \frac{L}{c} + \frac{L}{c} = \frac{2L}{c}. \quad (2)$$

Здесь *c* – скорость света,

$T_{||}$ – общее время движения света “туда и обратно”,

L – расстояние между точками *A* и *B*,

t_b - время движения света “туда”,

t_n - время движения света “обратно”.

В данном случае время движения “туда” равно времени движения “обратно”.

2). **Если есть “эфирный ветер”** со скоростью *v*, то точки *A* и *B* находятся в состоянии относительного движения относительно “эфира”. С точки зрения “эфира” это эквивалентно движению источника в обратном направлении.

Michelson-Morley Experiment

а) Время распространения "туда" определяется по формуле

$$t_{\text{в}} = \frac{L}{c + v}. \quad (3)$$

б) Время распространения "обратно" определяется по формуле

$$t_{\text{н}} = \frac{L}{c - v}. \quad (4)$$

с) Время распространения "туда и обратно" определяется по формуле

$$T_{\parallel} = t_{\text{в}} + t_{\text{н}} = \frac{L}{c + v} + \frac{L}{c - v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} = \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{2L}{\gamma c}. \quad (5)$$

где $\gamma = 1 - \frac{v^2}{c^2}$.

Сравнивая эти случаи, видим, что при наличии "эфирного ветра" время движения "классического света" отличается от предыдущего случая и зависит от направления "встречно – попутно" "эфирного ветра". А общее время движения "туда – сюда" становится меньше, чем как если бы не было ветра.

Сложность выполнения эксперимента по представленному выше расчету заключается в том, что мы не можем в реальном эксперименте разделить эти два случая. Мы даже не знаем, есть этот самый ветер или его нет. А если есть – не знаем, в каком направлении он дует. И сама наша задача заключается в определении его существования и измерении его направления и скорости.

Для избежания этой сложности можно одновременно использовать два взаимно перпендикулярных когерентных луча. В соответствии с теорией эфира разность фаз в параллельном и перпендикулярном плече поддаются количественной оценке и обнаруживаются соответствующими экспериментальными средствами (интерферометр Майкельсона — Морли): если скорость "эфирного ветра" в направлении двух лучей различна, то и время движения для этих лучей будет различной,

В дополнение к формулам (1) – (5) рассчитаем количественную оценку времени прохождения луча по перпендикулярному направлению для сравнения с прохождением в попутном направлении. Для определения скорости волны в перпендикулярном направлении воспользуемся сложением векторов v и c как катеты в прямоугольном треугольнике. Пусть $v + c$ — скорость волны в направлении зеркала. Тогда v_{\perp} будет равняться

$$v_{\perp} = |v_{\perp}| = \sqrt{v^2 + c^2} = c \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}. \quad (6)$$

Мы можем теперь вычислить и время прохождения луча по перпендикулярному направлению:

$$t_{\perp} = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}} \sim \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{2c^2}\right). \quad (7)$$

Michelson-Morley Experiment

L_{\perp} - это гипотенуза, по ней сигнал идёт с увеличенной скоростью, при этом прохождение катета со скоростью c даст то же время, что и прохождение гипотенузы с этой увеличенной скоростью. Поэтому достаточно рассмотреть время в виде

$$t_{\perp} = \frac{2L}{c}. \quad (8)$$

Разность фаз двух перпендикулярных лучей будет пропорциональна разности времен прохождения своих путей каждым из лучей:

$$\delta = c(t_{\perp} - T_{\parallel}) = 2 \left(L - \frac{L}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) \sim 2L \frac{v^2}{c^2}. \quad (9)$$

Экспериментальная установка ММ

Этой экспериментальной схемой воспользовались ученые конца XIX – начала XX веков

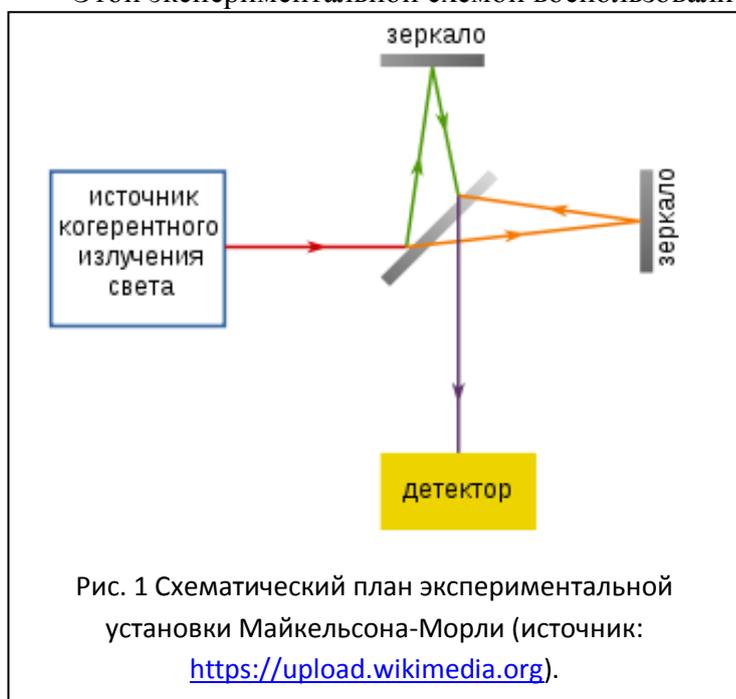


Рис. 1 Схематический план экспериментальной установки Майкельсона-Морли (источник: <https://upload.wikimedia.org>).

Майкельсон и Морли. Схематически установка для проведения такого опыта приведена на рис. 1. Суть опыта заключается в следующем. Монохроматический луч света от источника когерентного источника, пройдя через собирающую линзу, попадает на полупрозрачное зеркало (1), наклоненное под углом 45 градусов, где разделяется на два луча, один из которых движется перпендикулярно направлению предполагаемого движения прибора относительно эфира, другой — параллельно этому движению. На одинаковом расстоянии L от полупрозрачного зеркала (1) установлены два плоских зеркала — C и D . Лучи света, отражаясь от этих зеркал, снова падают на зеркало (1),

частично отражаются, частично проникают сквозь него и попадают на экран (детектор).

На детекторе формируются интерференционные волны, по отклонениям которых от некоторого нормального положения определяют скорость "эфирного ветра". Если интерферометр покоится относительно эфира, то время, затрачиваемое первым и вторым лучами света на свой путь, одинаково, и в детектор попадают два когерентных луча в одинаковой фазе. Следовательно, возникает интерференция, и можно наблюдать центральное светлое пятно на интерференционной картине, характер которой определяется соотношением форм волновых фронтов обоих пучков. Если же интерферометр движется относительно эфира, то время, затрачиваемое лучами на свой путь, оказывается разным.

Опыт Майкельсона-Морли принципиально был направлен на то, чтобы подтвердить (или опровергнуть) существование мирового эфира посредством выявления «эфирного ветра» (или факта его отсутствия). Опыты Майкельсона-Морли и многочисленные современные опыты с высокой точностью показали, что "эфирного ветра" нет и, следовательно, во всех предыдущих случаях времена должны совпадать.

Объяснение эксперимента ММ в СТО

Посмотрим, как именно теория относительности Эйнштейна объясняет нулевой результат данного эксперимента. Основываясь на представлениях теории относительности, лауреат Нобелевской премии по физике Л. Купер так объясняет нулевой результат эксперимента Майкельсона-Морли: "Предположим, что мы осмысливаем опыт, предназначенный для определения скорости с точки зрения движущегося прибора. Рассмотрим, например, время распространения импульса, движущегося параллельно направлению движения прибора. Мы могли бы сказать, что при движении вперед скорость света равна $c - v$, а при обратном движении равна $c + v$. Тогда

$$t_{\text{в}} = \frac{L}{c + v}. \quad (3)$$

$$t_{\text{н}} = \frac{L}{c - v}. \quad (4)$$

и, как и раньше,

$$T_{\parallel} = t_{\text{в}} + t_{\text{н}} = \frac{L}{c + v} + \frac{L}{c - v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2}. \quad (5^*)$$

Однако результат опыта Майкельсона-Морли можно объяснить, если считать, что

$$T_{\text{СТО}} = \frac{2L}{c}. \quad (10)$$

(независимо от величины v)".

Но возможно ли такое? Как известно, вся теория относительности построена на двух принципах или постулатах Эйнштейна. Эйнштейн предположил, что в любой системе координат, безотносительно к существованию или не существованию "мирового эфира", уравнение распространения электромагнитного поля должно иметь вид:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2. \quad (11)$$

Этим он исключил из расчетов "эфир" и формула (10) стала правильной в любой ИСО.

Нетрудно видеть, что Эйнштейн предположил, что скорость света в неподвижной и движущейся системах координат есть величина постоянная. Это значит, что, независимо от того, существует или не существует "эфирный ветер", скорость распространения света равна фундаментальной скорости $c \sim 300'000'000$ м/с. Именно на основании этого предположения им выведена так называемая "релятивистская" формула сложения скоростей, согласно которой

$$c \# v = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = \frac{c - v}{1 - \frac{cv}{c^2}} = c, \quad (12)$$

где "#" - знак "релятивистского" сложения (вычитания) скоростей.

С другой стороны, согласно теории относительности, плечо интерферометра, параллельное его движению, сокращается пропорционально множителю $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$, а также происходит замедление течения времени с этим же коэффициентом. Учитывая это, получим из классического (5)

Michelson-Morley Experiment

$$T_{\parallel} = T'_{\parallel} = t_{\text{в}} + t_{\text{н}} = \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow \quad (5^*)$$

результат с точки зрения релятивистского наблюдателя, связанного с движущимся объектом:

$$\begin{aligned} T_{\parallel} &= \frac{2L}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{2 \left(L_{\text{СТО}} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \rightarrow \\ &= \frac{T_{\text{СТО}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2L_{\text{СТО}}}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow \\ &T_{\text{СТО}} = \frac{2L_{\text{СТО}}}{c}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для перпендикулярного луча имеем (8):

$$t_{\perp} = \frac{2L}{c}. \quad (8)$$

Учитывая, что ход времени замедляется, а длина в перпендикулярном направлении не изменяется, с точки зрения релятивистского наблюдателя, связанного с движущимся объектом имеем:

$$\begin{aligned} \frac{t_{\perp}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} &= \frac{2L}{c} \rightarrow \\ T_{\text{СТО}} &= \frac{2L_{\perp \text{СТО}}}{c}. \end{aligned} \quad (14)$$

Мы видим полное соответствие друг другу формул (2), (13) и (14). Только с одним существенным отличием: (2) верен только в выделенной эфиром АСО, а (13) и (14) в любой ИСО – как будто выделенной эфиром с.о. (АСО) вовсе нет.

Обратный переход от (13) из ИСО СТО в АСО покоящегося "эфира" осуществляется по следующей процедуре. В СТО имеем:

$$T_{\text{СТО}} = \frac{2L_{\text{СТО}}}{c}. \quad (13^*)$$

Предполагая, что АСО "эфира" имеет скорость v , переведем это уравнение в с.о. АСО, проведя обратные операции. Первая операция – деление на релятивистский коэффициент:

$$\frac{T_{\text{СТО}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2L_{\text{СТО}}}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow \quad (15)$$

Michelson-Morley Experiment

$$\frac{T_{\text{СТО}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2L_{\text{СТО}} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow$$
$$T_{\parallel} = \frac{2L_{\text{СТО}} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \rightarrow$$
$$T_{\parallel} = \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Получили то, с чего начали – результат идентичен (5). Но этот переход можно провести, только если известна скорость АСО "эфира". А в СТО безразлично, существует "эфир" или его нет. В ней любая ИСО как АСО, и все ИСО равноправны. Но если будет доказано экспериментом, что АСО эфира существует, то это не приведет к отставке СТО. Просто появятся новые возможности для более глубокого изучения того, где мы существуем. А СТО будет работать в области, где эффект от существования эфира не проявляется. Примерно так же, как релятивизм не учитывается в КФ.