# О линейном эффекте в опыте Майкельсона

**Штырков Е.И. (sht99@mail.ru)**

**Казанский Физико-Технический Институт**

В 1927 г. в дискуссии на конференции в Пасадене (Калифорния [1]), посвященной эксперименту Майкельсона–Морли, Х.А.Лоренц поднял вопрос о важной роли эффектов первого порядка по отношению скорости Земли к скорости света. Речь шла о тех опытах, где физики и астрономы пытались выделить составляющую движения Земли в оптических и электрических явлениях (см. в [2] его выступление в переводе В.А. Ацюковского). Бесплодность всех этих попыток привела его к глубокому убеждению, что этот линейный эффект никогда не проявится в экспериментах по измерению скорости Земли при помощи проводимых на ней опытов. К тому же в это время всем было известно, что в интерференционном опыте Майкельсона при поиске эфирного ветра, вызываемого движением Земли, ожидалось проявление только квадратичного эффекта, который на 4 порядка величины слабее линейного. Однако можно показать, что в этом опыте при сохранении принятой тогда модели механики Галилея может проявляться также линейный эффект, который может быть как слабее квадратичного, так и значительно превосходить его в зависимости от настройки интерферометра Майкельсона.

Допустим, что в равномерно движущейся системе координат есть эфирный ветер с произвольным вектором скорости $\mathbf{v}_e$. Относительная скорость света в такой системе координат $\mathbf{c}'$ связана тогда с векторами абсолютной скорости света в эфире $\mathbf{c}$ и скорости эфирного ветра известным векторным соотношением $\mathbf{c}'=\mathbf{c}+\mathbf{v}_e$. Модуль этого вектора представляет собой значение этой относительной скорости, которое зависит от угла $\eta$ между направлениями распространения света и эфирного ветра, и имеет вид [1]

$$c' = c(1+2\beta\cos\eta+\beta^2)^{1/2} \qquad (1),$$

где $\beta = v_e / c$

Это общее выражение пригодно для любых ситуаций. В частном случае при проведении опыта Майкельсона интерферометр, схема которого приведена на рис1 , поворачивают в горизонтальной плоскости, т.е. вокруг зенитной оси, ортогональной плоскости рисунка..

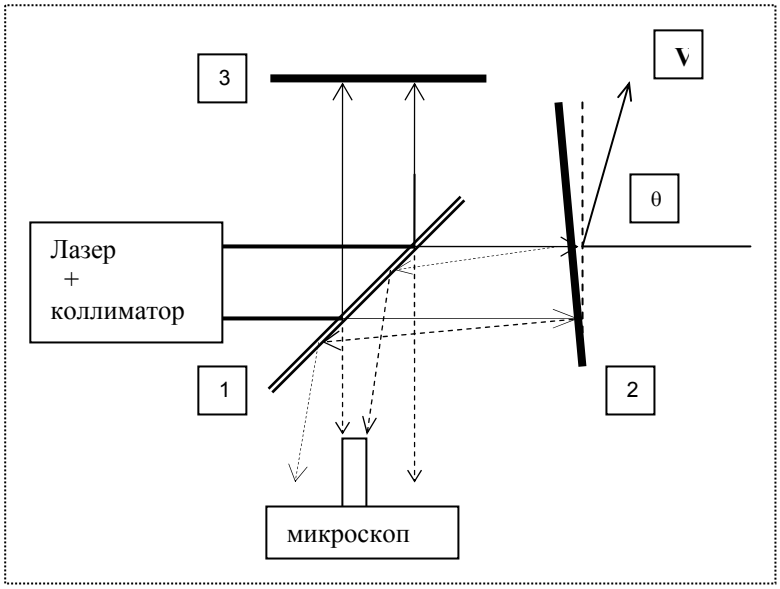


Рис.1. Интерферометр Майкельсона

При достаточно быстром повороте (например, менее 1 мин за полный оборот) положение Земли в пространстве практически не успевает измениться. Поэтому проекция эфирного ветра на горизонтальную плоскость также сохраняет свои значение **v** и направление, а угол $\vartheta$ (между вектором **v** и одним из плеч интерферометра) изменяется. Чтобы найти относительную скорость света на каждом из путей света в интерферометре от любой точки j до точки i, выражение (1) можно использовать поэтапно при замене в нем $v_e$ на v и $\eta$ на $\vartheta_{ji}$ (угол между вектором **v** и направлением луча на данном участке пути). На различных участках интерферометра угол $\vartheta_{ji}$ различен и он может быть выражен через один и тот же угол $\vartheta$. На этом рисунке концевое зеркало 2 повернуто на малый угол $\alpha$ для получения интерференционных полос конечной ширины от лучей, угол между которыми после отражения на зеркале 2 и полупрозрачной пластинке 1 равен $2\alpha$.

Время прохождения света в каждом плече длиной $L_{ji}$ от начальной точки j до его конца (точка i) равно

$$\tau_{ji} = L_{ji} / c'_{ji} = \frac{L_{ji}}{c}\left[1 + 2\beta\cos\vartheta_{ji} + \beta^2\right]^{-1/2} \quad \text{при} \quad \beta = v/c \qquad (2)$$

Поскольку $\beta$ практически всегда много меньше единицы, это выражение можно упростить, разложив его в ряд по малому параметру $\delta$, который в скобках выражения (2) равен $2\beta\cos\vartheta_{ji}+\beta^2$. Затем после пренебрежения всеми членами, содержащими $\beta$ в кубе и с более высокими степенями, можно получить

$$\tau_{ji}=\frac{L_{ji}}{c}\left[1-\beta\cos\vartheta_{ji}+\frac{\beta^2}{2}\left(3\cos^2\vartheta_{ji}-1\right)\right] \qquad (3)$$

Разность интервалов времени между интерферирующими лучами в интерферометре Майкельсона, как известно, равна $\Delta\tau=(\tau_{12}+\tau_{21})-(\tau_{13}+\tau_{31})$. Она может быть определена с использованием выражения (3) после определения $\vartheta_{ji}$ на различных участках пути света: от полупрозрачной пластинки 1 до зеркала 2 $\vartheta_{12}=\vartheta$, на обратном пути $\vartheta_{21}=(\pi-\vartheta)+2\alpha$, в другом плече (на участке 13) $\vartheta_{13}=\pi/2-\vartheta$ и при обратном ходе в этом плече $\vartheta_{31}=(3\pi/2-\vartheta)$. Без уменьшения общности можно положить, что интерферометр имеет равные плечи $L_{12}=L_{13}=L$. Более того, из-за малости угла $\alpha$ можно считать $L_{12}=L_{21}$. После использования всех этих параметров в выражении (3) и простых тригонометрических преобразований можно получить

$$\Delta\tau=\beta\frac{L}{c}\left[2\sin\alpha\sin(\vartheta-\alpha)\right]+\beta^2\frac{3L}{2c}\left[\cos2(\vartheta-\alpha)\cos2\alpha+\cos2\vartheta\right] \qquad (4)$$

Такая задержка после пренебрежения во втором члене величиной $\alpha$ из-за его малости приводит к смещению интерференционной картины в пространстве, выраженному в долях полосы

$$\Delta N=\frac{\Delta\tau}{T_o}=q\sin(\vartheta-\alpha)+p\cos2\vartheta \qquad (5),$$

где амплитуды $q=2\beta\frac{L}{\lambda}\sin\alpha$, $p=3\beta^2\frac{L}{\lambda}\cos2\alpha$, а $T_o$ и $\lambda$ - период и длина волны источника света, используемого в опыте,

Из этого выражения видно, что кроме квадратичного эффекта (второй член) в опыте Майкельсона должен проявляться и эффект первого порядка (линейный по $\beta$ первый член). При этом характерно, что этот член представляет собой периодическую величину для каждого полного оборота интерферометра, в отличие от второго члена, который представляет собой вторую гармонику по углу. Значение угла $\alpha$ из-за своей малости практически не влияет на амплитуду квадратичной компоненты, но в то же время является критическим для наличия или отсутствия линейного эффекта. Например, при $\alpha=0$ (при получении полос бесконечной ширины),

как видно из формулы, линейный эффект полностью исчезает. Амплитуда линейной компоненты $q$ по сути дела связана с шириной полосы, что значительно упрощает процесс измерения, так как исчезает необходимость измерять во время эксперимента очень малые углы. Действительно, можно использовать известное из дифракционной оптики выражение $2d\sin(\varepsilon/2)=\lambda$, где $d$ - период решетки (полная ширина полосы), а $\varepsilon$ - угол между интерферирующими лучами. В нашем случае $\varepsilon=2\alpha$ и мы имеем $q=\beta\frac{L}{d}$. Как отсюда видно, при уменьшении ширины полосы линейный эффект усиливается, а из сопоставления амплитуд в членах выражения (5) следует, что при $d=\frac{\lambda}{3\beta}$ оба члена сравниваются по величине. Например, при $\beta=10^{-4}$ и $\lambda=0,6\cdot10^{-4}$см (желтый свет) этот порог наступает при ширине полосы 0,2см. Дальнейшее уменьшение периода решетки приводит к значительному преобладанию линейного эффекта над квадратичным. Это позволит использовать интерферометр с высокой чувствительностью, но с короткими плечами, что значительно облегчит процесс устранения паразитных причин влияния на смещение полос. Например, для небольшого интерферометра с плечами L=100см при настройке на полосы с шириной $d=0,01$см ожидаемое смещение из-за эфирного ветра со скоростью 30км/с может составить 2 полосы при повороте интерферометра на $180^{o}$ из первоначального положения с углом $\vartheta=90^{o}$. При той же длине плеча это смещение может быть значительно увеличено при дальнейшем уменьшении ширины полосы. При этом для регистрации смещения интерференционной картины необходимо использовать уже не телескоп, как это делали Майкельсон, Миллер и др., а микроскоп.

Более того, для проведения этого опыта совсем не обязательно использовать схемы с возвратом луча, т.е. именно интерферометр Майкельсона. Можно использовать любую схему, которая наиболее удобна для получения интерференционных картин с высокой пространственной частотой. Например, для интерферометра Маха-Цендера при повороте глухого зеркала на угол $\alpha$ расчет с использованием выражения (3) для интерферирующих лучей с углом между ними $\varepsilon=2\alpha$ приводит к

$$\Delta N=\frac{\beta L}{d}\sin(\vartheta-\alpha)+\frac{3\beta^{2}L}{2\lambda}\sin 2\alpha\sin 2(\vartheta-\alpha) \qquad (6).$$

Поскольку угол поворота зеркала $\alpha$ обычно мал (например, для видимого света при уменьшении ширины полосы даже до 50мк он не превосходит $10^{-2}$ радиана), то второй член, как видно из этой формулы, практически не оказывает влияния на смещение интерференционной полосы. Поэтому мы здесь можем им пренебречь по сравнению с первым, т.е. имеет место чистый линейный эффект.

В дискуссии на конференции в Пасадене [1] Д.Миллер предположил, что наблюдаемый им ранее в его эксперименте полно-периодический эффект тоже был связан с наличием эфирного ветра. Однако, не осознавая его линейного характера из-за непонимания его природы, он тогда не использовал его для определения скорости ветра, а старался устранить его во время эксперимента, как и все другие до него. Действительно, имеется много внешних причин для появления полно-периодических смещений интерференционной картины (неравномерный нагрев деталей установки, магнитострикция, деформации и пр.). Поэтому все исследователи старались избавиться от этих паразитных смещений. При тщательном устранении всех паразитных причин у Д.Миллера все же этот эффект оставался и ему приходилось проводить гармонический анализ для выделения квадратичной компоненты [3,4]. У него при этом не измерялись ни угол поворота зеркал, ни ширина полос, но, как он отметил во время дискуссии [1], это смещение было невелико, когда на расстоянии 10см наблюдалось пять полос, т.е. ширина полосы была примерно 2см. Используя такое значение в (5) при длине плеча его интерферометра 64м и скорости 30км/с, можно получить для ожидаемой в его случае амплитуды линейной компоненты смещение полос $q = 0,32$ полосы. Хотя при таких условиях это значение меньше амплитуды квадратичной компоненты в эксперименте Миллера, вклад его все же был достаточен для искажения общей кривой. Поэтому Миллеру приходилось применять гармонический анализ для выделения второй гармоники.

Хотелось бы еще обратить внимание на работы [5,6], где были приведены качественные кривые для полно-периодических смещений. Они здесь объяснялись как следствие неких сжатий интерферометра при его вращении [6]. Если полагать, что эти смещения были связаны именно с линейным по эфирному ветру эффектом, а не с деформацией, то при ширине полосы 2см (значение в этой работе не приведено), при длине плеча в этом интерферометре 26м и $\beta = 10^{-4}$ ожидаемая амплитуда смещений из-за линейного эффекта должна быть 0,13 полосы. В работе [6] эта экспериментальная амплитуда полно-периодического колебания была 0,03 полосы, что примерно в 4 раза меньше, т.е. это должно соответствовать значению скорости эфирного ветра около 7км/с. Это практически совпадает со значением, которое было получено в этой работе из анализа результатов измерений по квадратичному эффекту [5].

Таким образом, данные приведенных здесь расчетов свидетельствуют о том, что в интерференционных опытах по измерению эфирного ветра, целесообразно использовать не квадратичный, а именно линейный эффект по отношению скорости Земли к скорости света.

**Литература**

1. Conference on Michelson-Morley experiment, Astrophys. J. 1928. 68. 5. 341

2. Эфирный ветер (ред. В.А. Ацюковский), М., Энергоатомиздат, 1993, 289

3. Д.К.Миллер, Эфирный ветер, УФН,1925, т.5,177-185.

4. Miller D.C., Significance of the ether-drift experiments of 1925 at Mount Wilson, Science 1926, 63, 433-443

5. Pease F. Ether drift data. San Francisco, California: Publ. of the Astronomical Society of the Pacific. 1930. V. XLII. 248. P. 197-202.

6. Michelson A., Pease F., Pearson F. Repetition of the Michelson-Morley experiment, JOSA, 1929, 18, 3, 181-182