

ПОВТОРЕНИЯ ОПЫТА МАЙКЕЛЬСОНА *

(Памяти А. А. Майкельсона, 1852 — 1931)

Георг Иоос (Иена)

Когда теория требует получения для какой-нибудь единственной величины вполне определенного числового значения, например нуля, то экспериментальное подтверждение такой теории связано с некоторым затруднением.

Определить какую-либо величину совершенно точно на опыте, разумеется, невозможно, и в связи с этим возникают сомнения в толковании наблюдаемых отклонений, в особенности если теория оспаривается на том или ином основании. Именно в таком затруднительном положении оказывается исследователь в вопросе о влиянии переносного движения земли на оптические лабораторные опыты.

Единственным опытом такого рода, при котором, основываясь на представлении о покоящемся мировом эфире, можно ожидать измеримого эффекта, является опыт Майкельсона. Отрицательный результат этого опыта служит исходным пунктом теории относительности, которая не может допустить ни малейшего измеримого влияния движения земли. При первой постановке опыта, в 1881 г., достигнутая точность измерений только немного превышала величину ожидаемого эффекта; поэтому в последующее время был произведен ряд повторений опыта Майкельсона. Основной причиной для этого являлось желание повыше-

* Naturwissenschaften 19, 784, 191.

нием точности по возможности снизить верхнюю границу возможного эффекта или же исследовать, не вызовет ли изменение условий опыта появление измеримого положительного эффекта.

Для получения меры необходимой чувствительности аппарата следует оценить, основываясь на представлении об эфире, пределы возможного эффекта. Число Δz полос, на которые сместится интерференционная картина при повороте аппарата на 90° из положения, при котором одно из плеч направлено вдоль движения земли, дается известным равенством:

$$\Delta z = \frac{2l}{\lambda} \left(\frac{v}{c} \right)^2,$$

где l — длина плеч интерферометра, λ — длина световой волны (равная $5 \cdot 10^{-8}$ см) и v — компонента земной скорости в плоскости аппарата.

Со времен первого опыта вошло в привычку полагать в качестве ожидаемого эффекта для v значения 30 км/сек, что соответствует земной орбитальной скорости, и, следовательно, для $\left(\frac{v}{c} \right)^2$ берется число 10^{-8} . Величина эта взята, разумеется, произвольно, так как кроме скорости движения Земли вокруг Солнца существует еще и общая скорость движения всей солнечной системы относительно неподвижных звезд, равная 19 км/сек и имеющая, следовательно, тот же порядок величины. Апокс этого движения имеет такие небесные координаты: склонение 32° и прямое восхождение 270° . Подобное движение обуславливало бы сильную зависимость эффекта от времени года. Наибольшим был бы общий эффект в 45 км/сек для начала апреля. Это влияние времени года будет, однако, усилено вследствие движения всей системы Млечного пути относительно внегалактического мира, в настоящее время твердо установленного. Скорость последнего оценивается по крайней мере в 300 км/сек, скорость же солнечной системы сравнительно очень мала, так что эффект, будучи отнесенным к звездному времени, должен в течение года оставаться постоянным. Положительный эффект, который следовало бы ожидать при всех

обстоятельствах, должен состоять в некотором более или менее правдоподобном суточном ходе положения интерферен-

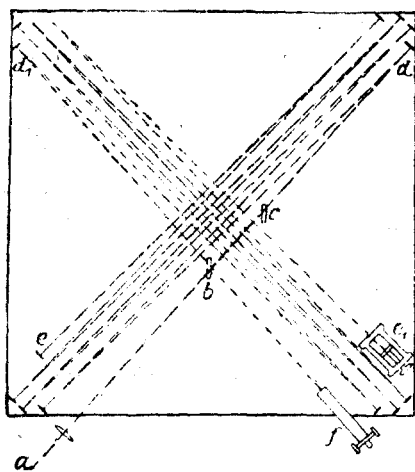


Рис. 1. Ход лучей в интерферометре Майкельсона 1887 г.

ционной картины. Точка неба, к которой направлен вектор результирующей скорости и из которой, таким образом, как бы дует эфирный ветер, должна описывать подобно звезде на небе круг параллели. Если только этот круг не сливается в полярную точку (что соответствовало бы исчезновению суточного хода), то наблюдаемый азимут эфирного ветра должен совершать простые колебания, достигая в течение дня равных максимальных значений на восток и запад.

Первое повторение было предпринято самим Майкельсоном совместно с Морлеем * в 1887 г. в Кливлэнде. Примененный ими принцип — увеличение оптического пути посредством многократного отражения (зеркалами) без увеличения основных размеров прибора — был сохранен всеми последующими экспериментаторами. Ход лучей изображен на рис. 1. Вся оптика, включая и источник света (горелка Аргана), была собрана на каменной квадратной плите

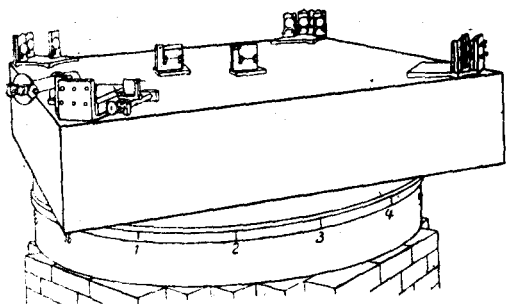


Рис. 2. Монтаж зеркал в опыте 1887 г.

* A. A. Michelson and E. W. Morley, *Philosophic. Mag.* (V), 24, 449 (1887).

со стороны в 1,5 м. Путь света при использованном трехкратном отражении достигал 11 м. Таким образом, полагая v равным 30 км/сек, можно было ожидать эффект в 0,4 полосы. Примененная установка, в которой достигалась плавность вращения прибора, явилась также образцом для почти всех последующих экспериментаторов. Каменная плита a (рис. 3) была укреплена на деревянном кольце b , плавающем в кольцеобразном сосуде со ртутью c . Приведение во вращение плавающей системы производилось при помощи центральной оси d . Визуальный отсчет следовал через каждые $1/16$ оборота. Результаты ряда опытов даны на рис. 4;

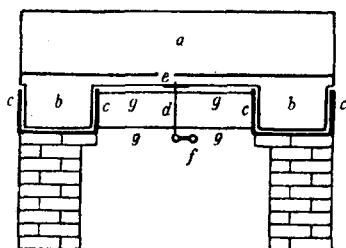


Рис. 3. Установка, посредством которой осуществлялось вращение интерферометра 1887 г.

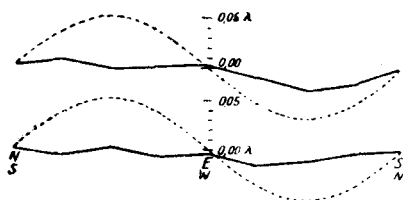


Рис. 4. Сдвиг полос, наблюдаемый в опытах 1887 г. (Абсциссы,—ориентировка аппарата.)

пунктирной кривой обозначен ожидаемый сдвиг полос при вращении аппарата, причем для него ординаты уменьшены в 4 раза. Как высшую возможную границу эффекта Майкельсон дает 0,01 ширины полосы.

По инициативе Кельвина, называвшего результаты опыта Майкельсона-Морлея единственным облаком на ясном небе теории эфира, Морлей и Миллер* изготовили еще более чувствительный прибор несколько измененной конструкции. Действительные размеры плеч были увеличены до 4 м, что дает при примененном четырехкратном отражении общий оптический путь в 32 м. Таким образом при $v = 30$ км/сек ожидался эффект в $1/3$ ширины полосы. Зеркала были установлены сначала на деревянной крестовине, которая, однако, не оказалась достаточно жесткой системой. Вследствие этого деревянная крестовина была заменена соответ-

* E. W. Morley a. D. C. Miller, Phil. Mag. (VI), 9, 680 (1905).

ствующей конструкцией из стальных труб. Применение железа для изготовления чувствительных частей аппарата, при помощи которых устанавливается расстояние между зеркалами, весьма рискованно. Земное поле вызывает при вращении такого интерферометра магнетострикцию, которая должна сопровождаться точно таким же эффектом, как и эфирный ветер; при двух положениях прибора, разнящихся на 180° , в случае использования для постройки железа, при 32-метровой длине пути света вызванное указанным явлением смещение полос должно достигать нескольких десятых долей полосы. Учитывая это обстоятельство, Миллер позднее заменил железо немагнитным материалом, странным образом не получив при этом ни малейшего изменения сравнительно с прежним, не вполне отрицательным результатом. Оптические части помещались на конструкции из стальной жести, которая в свою очередь плавала средней частью в ртути.

Результаты опытов, выполненных с описанной аппаратурой в 1904 г., были признаны Морлеем и Миллером в тогдашнем сообщении отрицательными. Однако позднее, например в 1928 г. * на конференции на Моунт-Вильсон, Миллер вопреки мнению Морлея признал прежний вывод об отрицательном результате неправильным и основанным на недопустимом усреднении отсчетов, полученных в различное время суток.

Опыты производились Морлеем и Миллером, а с 1906 г. одним Миллером вблизи Кливлэнда в специальной легкой постройке. Производя опыты в пространстве, окруженном лишь тонкими стенами, Миллер причинил немало затруднений своим противникам. Примененный интерферометр требовал благодаря своей высокой чувствительности постоянства температуры до $1/100$ градуса. Разумеется, такого постоянства невозможно достичь в легкой хижине, к тому же имеющей окна. Учитывая основное положение гипотезы эфира — его способность пронизывать любые тела, возможно было бы окружить интерферометр каменной стеной, тем более что по Миллеру же атмосфера высоту в

* Astrophys. J., 68, 341—402 (1928).

1800 м не оказывает никакого влияния на увлечение эфира. Граничит с мистикой замечание Миллера, что постройка в том месте, откуда, повидимому, должен был дуть эфирный ветер, имела большое стеклянное окно. К сожалению, не указано, имелось ли на противоположной стене окно для достижения хорошего сквозняка!

С тем же аппаратом, получившим некоторые механические улучшения, был произведен ряд опытов в 1921—1926 гг. частью на Моунт-Вильсон, частью в Кливленде. Результаты этих опытов, вызвавших во всем мире величайшую сенсацию, были истолкованы как положительный эффект в 10 км/сек. В противоположность своим первоначальным указаниям, в резюмирующем сообщении * Миллер подчеркивал тот факт, что эффект в Кливленде был так же велик, как и на высоте 1800 м на Моунт-Вильсон. Однако полученные результаты отнюдь не соответствовали рассмотренному выше требованию определенного правдоподобного хода в течение суток; азимут эфирного ветра не принимает в течение 24 часов равных крайних положений — восточного и западного. Далее, например из кривой, приведенной Вебером ** по данным Миллера, видно, что отклонения от теоретического хода столь же велики, как и сам полученный эффект.

Несмотря на наличие столь многих сомнительных пунктов результаты опытов Миллера вызвали в кругах противников теории относительности необычайное воодушевление; и только после спокойного обсуждения отовсюду слышались требования повторения. Действительно, нельзя было представить окончательное суждение о результатах опытов, являющихся решающими для основных положений физики, уверенности одного исследователя.

Из многочисленных, следовавших затем повторений опыта следует прежде всего упомянуть о работе самого Майкельсона, произведенной им совместно с Ф. Г. Пизом и Ф. Парсоном *** на Моунт-Вильсон. Интерферометр

* Astrophys. J., 68, 341—402 (1928).

** J. Weber, Physik. Z., 27, 5, (1926).

*** A. A. Michelson, F. G. Pease and F. Parson, Nature, 123, 88 (1929); J. opt. Am. Soc., 18, 181 (1929).

соответствовал в общих чертах аппарату Морлея и Миллера. Оптический путь света составлял 25 м. Источник света был установлен на оси прибора и вращался вместе с прибором. Свет после соединения обоих интерферирующих пучков также отбрасывался вдоль оси вверх, где находился вращающийся со всей системой наблюдатель. И в этом опыте отсчет производился субъективно. В опубликованном сообщении указывается как основная причина предпринятых опытов не результаты опытов Миллера, а очень малый эффект, выведенный Штромбергом из учета большой скорости движения всей системы Млечного

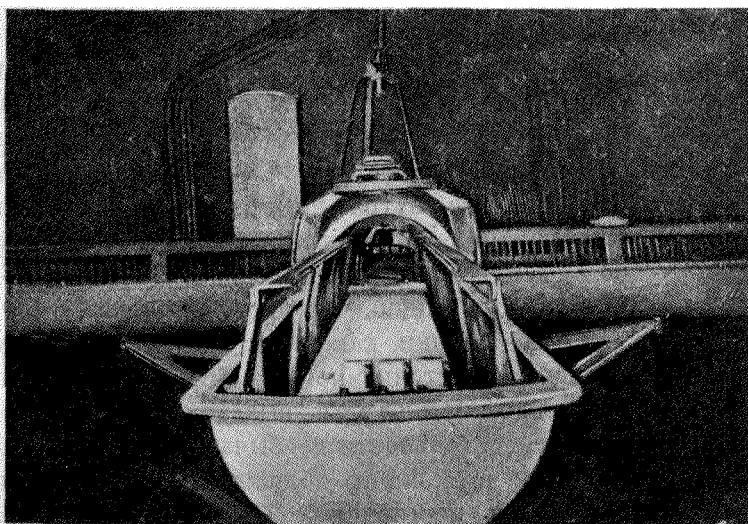


Рис. 5. Расположение оптики в интерферометре Цейса.

пути. Ожидаемый им эффект должен бы соответствовать смещению на $17/1000$ ширины полосы при оптическом пути в 16 м. Однако основания этого расчета в статье не приведены. Результат опыта оказался во всяком случае меньше $1/15$ величины, рассчитанной Штромбергом, или круглым числом менее $1/1000$ ширины полосы.

Подобные же размеры имел аппарат, построенный фирмой Цейс при участии автора этой статьи для дальнейшей про-

верки результатов Миллера *. Целью являлся аппарат высокой чувствительности, т. е. с большим оптическим путем, позволяющий осуществить регистрацию интерференционных полос с тем, чтобы каждый желающий мог промерить полученные таким образом объективные документы. Оптический путь при длине плеч в 3,5 м и трехкратном отражении был доведен до 21 м. Зеркала монтировались на крестовине из плавленнного кварца, отчетливо видной

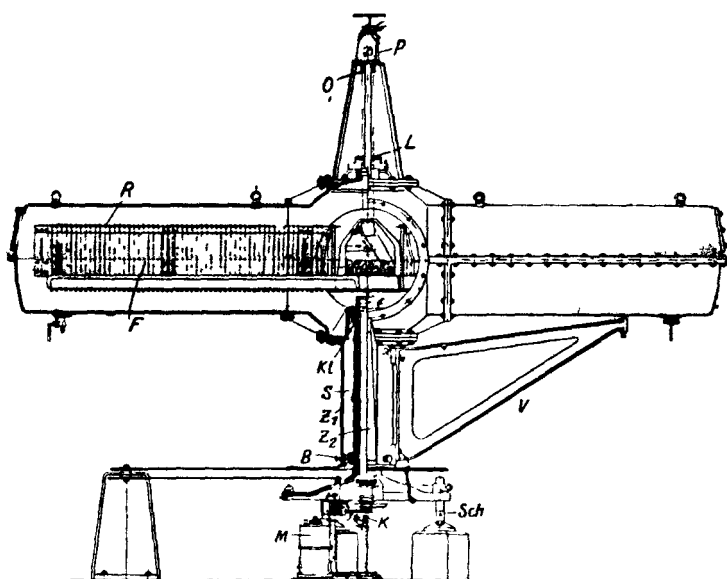


Рис. 6. Механическая установка интерферометра Цейса.

на рис. 5. Механическая конструкция аппарата значительно отличается от всех предыдущих моделей. Часть, несущая оптику, не плавает в ртути, а подвешивается при помощи сотен пружин к специальной вращающейся раме. Рама при помощи мотора, снабженного регулятором, вращается, весьма точно сохраняя направление оси благодаря специальному шарикоподшипнику и четырем кронштейнам, скользящим по оси и служащим для ее точной юстировки. Все это заключено в кожух из силуминовой отливки, предназначен-

* Подробное изложение в Ann. d. Physik (5), 7, 385 (1930).

ный для уменьшения температурных помех и допускающей некоторую от качку прибора, что, впрочем, в опыте не понадобилось. Источником света служит маленькая точечная ртутная лампа, помещенная на оси прибора и движущаяся вместе с ним (см. рис. 6). Свет, соединившийся вновь после прохождения обоих путей, отбрасывается вдоль оси вниз при помощи вогнутого зеркала, дающего изображение полос, и другого плоского зеркала. Внизу помещается подвижная фотокамера. Из интерференционной картины при помощи щели шириною в 0,2 мм, перпендикулярной к полосам, вырезается малый участок, мимо которого проходит фотопластинка при вращении прибора. При наличии положительного эффекта система полос должна совершить два полных синусоидальных колебания с ампли-

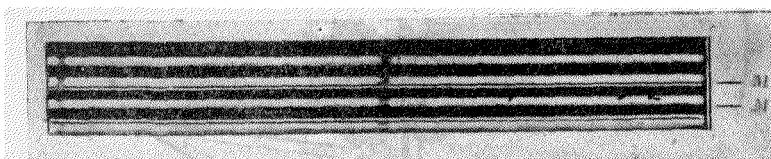


Рис. 7. Запись интерференционных полос для двух оборотов аппарата.

тудой в $3/4$ полосы при каждом обороте. На рис. 7 представлены результаты, полученные при двух оборотах интерферометра; марки, обозначенные на фотографии буквой М, получены при помощи проволоки, натянутой на месте полос, следовательно перед одним из зеркал, возвращающих свет. Невооруженным глазом совершенно невозможно заметить колебания зарегистрированных таким образом кривых. Для того чтобы получить числовое значение для крайних склонений, снимки были профотометрированы поперек полосы в восьми местах для каждого оборота, и на регистрирующей пластинке измерялись при помощи нанесенных марок расстояния между экстремальными почернениями. Таким образом были обнаружены колебания в несколько тысячных ширины полосы, которые уже обуславливаются наличием зерен эмульсии. Достаточно просмотреть результаты ряда опытов, сделанных в течение 24 часов, пред-

ставленные на рис. 8, для того, чтобы убедиться в том, что не может быть и речи о каком-либо систематическом ходе.

Таким образом можно с достаточной уверенностью указать как высшую границу еще возможного эффекта $1/1000$ ширины полосы. Следует отметить при этом, что подобное заключение можно сделать уже по результатам одного дня. Полученная величина при переводе на скорость эфирного ветра дает несколько более $1,5 \text{ км/сек.}$

Подобные же регистрации были получены Пикаром и Стаелем*. Их аппарат имел небольшие размеры, так как предназначался, главным образом, для работы на воздушном шаре. Действительный оптический путь составлял всего лишь $1,4 \text{ м.}$ и неточность отдельного результата компенсировалась большим числом измерений. При снимках на воздушном шаре весь шар вращался при помощи небольших пропеллеров, приводимых в движение электромоторами. Число оборотов было значительным (до двух в минуту). Результаты опытов с воздушным шаром, при которых, правда, значительно мешали колебания температуры, не обнаружили на высоте 2500 м никакого миллеровского эффекта в 10 км/сек. однако пределы ошибок были также недалеки от этой величины. Значительно большую точность представляют земные опыты, выполненные с той же установкой на Рижии, следовательно на высоте Моунт-Вильсон, и в Брюсселе. На основании большего числа опытов как высшая граница возможного эффекта была получена также вели-

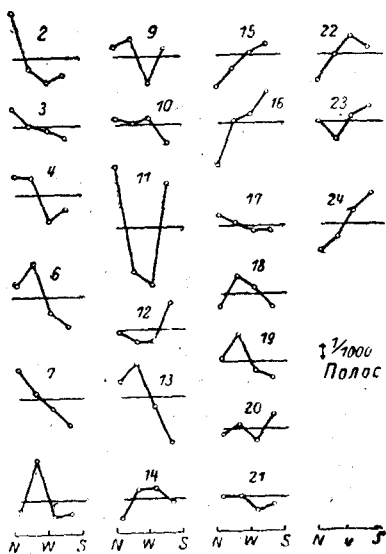


Рис. 8. Серия наблюдений, полученная в течение 24 часов при немском опыте.

* A. Piccard et E. Stahel, J. Physique et Radim (6), 8, 56 (1927).

чина 1,5 км/сек; но точность этих измерений следует считать несколько переоцененной, так как снимки не фотометрировались, а лишь визуально измерялось при помощи компаратора расстояние от марок.

Новую идею внес в свою конструкцию Мак-Кеннеди *. Он с успехом попытался повысить чувствительность своего аппарата применением метода полутеневого отсчета. За счет этого он смог значительно уменьшить общую длину плеч, чем существенно уменьшались температурные помехи. Весь прибор был смонтирован на квадратной плите со сто-

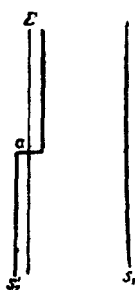


Рис. 9. Полутеневой интерференционный принцип Мак-Кеннеди.

роною в 122 см при оптическом пути в 4 м. Для дальнейшего ослабления температурных помех аппарат наполнялся гелием, что благодаря малому показателю преломления этого газа равносильно эвакуации до 1/10 атмосферы. Метод полутеневого наблюдения заключался в следующем: одно из зеркал, на поверхности которого проектируются интерференционные полосы, перпендикулярно к полосам разделено резкой линией на две половины, так что поверхность одной из них выступает вперед на долю волны (примерно на $1/10 \lambda$) (рис. 9). Такая разница толщин была достигнута катодным распылением металла.

При установке на интерференционные полосы видны две системы полос, несколько смещенные одна относительно другой. Места равных яркостей лежат там, где интерферирующие пучки имеют разность хода в $\frac{n\lambda}{4}$, считая для ступеньчатого зеркала (s_2) от средней линии (Σ). Малейшее изменение разности хода тотчас заставляет одну половинку казаться ярче другой. Чувствительность этого приема была оценена Кеннеди в $2 \cdot 10^{-3}$ ширины полосы. „Миллеровский“ эфирный ветер должен был составить для данного прибора $8 \cdot 10^{-3}$ ширины полосы. Однако ни на Моунт-Вильсон ни на равнине не было обнаружено ни малейшего его присутствия. И л и н

* R. J. Mc Kennedy, Proc. Nat. Acad. Wash., 12, 621 (1926).

г в о р т, продолжавший работать с аппаратом Кеннеди, полагает *, что, учитывая совокупность большого числа наблюдений, можно ручаться за 1 км/сек как за верхнюю границу эффекта.

Таким образом общая картина всех поставленных после Миллера опытов дает возможность утверждать, что эфирный ветер, если таковой существует, не может быть более 1 км/сек . Этот результат, выраженный в ширине полос, дает величину в сто раз меньшую наблюдаемой Миллером. Наконец, это означает, что эффект должен быть по крайней мере в 900 раз меньше ожидаемого, если полагать последний равным 30 км/сек . Достигнутой точностью можно вполне удовлетвориться и считать эту главу физики завершенной.

Однако, исходя из представления об эфире, можно предположить наличие отличных свойств у света, посылаемого над земными источниками, в особенности неподвижными звездами. Этот вопрос разрешил Томашек весьма изящным образом. Так как здесь дело идет только об различии смещения по отношению к земным источникам света, то, очевидно, можно работать с неподвижным интерферометром, причем вращение аппарата происходит благодаря вращению земли. При других опытах не представлялось возможным воспользоваться подобным методом ввиду того, что весьма затруднительно удерживать интерференционные полосы в покое часами. В данном же случае при относительных измерениях одновременное движение обеих систем полос не мешает измерениям. Установка Томашека имела длину плеч, равную $8,6 \text{ м}$. Сравнительным источником света служило натровое пламя; исследовался свет Солнца, Луны, Сириуса и Арктура. Наблюдавшиеся отклонения не превышали $1/100$ ширины полосы, что заключается в пределах возможных ошибок. Таким образом и эту последнюю возможность следует считать экспериментально исключенной.

* К. К. Illingworth, *Physic. Rev.*, 30, 692 (1927).