14. Конференция по эксперименту Майкельсона–Морли, состоявшаяся в обсерватории Маунт Вилсон, г. Пасадена, Калифорния, 4 и 5 февраля 1927 г.

Conference on the Michelson–Morley experiment.
Held at the Mount Wilson Observatory, Pasadena, California,
February 4 and 5, 1927

Присутствие проф. А.А.Майкельсона и проф. Г.А.Лоренца в Пасадене в первых месяцах 1927 г. оказалось исключительно своевременным для проведения конференции по теоретическому и практическому аспектам эксперимента Майкельсона–Морли. Поскольку проф. Майкельсон планировал совместно с обсерваторией Маунт Вилсон повторить эксперимент, проведение этой конференции было особенно желательно. Большую инициативу в этом отношении проявил доктор Чарльз Э.Ст.Джон. Экспериментальная часть была представлена доктором Р.С.Кеннеди. Проф. Э.Р.Гедрик представил математический расчет светового пути, выполненный им совместно с проф. Л.Ингольдом, присутствовавший проф. П.С.Эпштейн привел расчет эксперимента Троутона–Нобеля, недавно повторенного Чейсом в Калифорнийском технологическом институте, а также другими экспериментаторами. После основных представленных докладов состоялась дискуссия. Доктором Фрицем Цвики и Гленом Х.Пальмером из Калифорнийского института были представлены короткие заметки.

Выступления проф. Майкельсона и Лоренца были посвящены детальному изложению результатов, полученных Д.К.Миллером, который, к счастью, также смог присутствовать.

ДОКЛАДЫ

1. Профессор А.А.Майкельсон, Чикагский университет

В 1880 году я задумался над возможностью измерения оптическим способом скорости w движения Земли в Солнечной системе. Ранние попытки обнаружить эффекты первого порядка основывались на идее движения системы сквозь стационарный эфир. Эффекты первого порядка пропорциональны w/c, где c – скорость света. Исходя из представлений о любимом старом эфире (который теперь заброшен, хотя я лично еще его придерживался), ожидалась одна возможность, а именно, что аберрация света должна быть различной для телескопов,

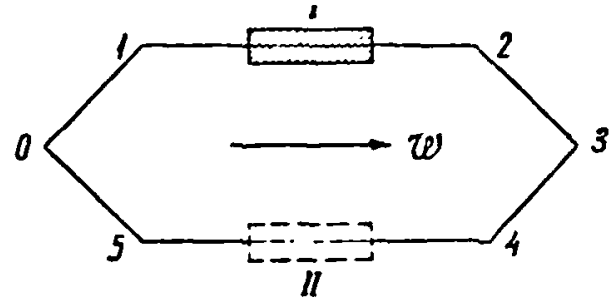


Рис. 14.1. Схема устройства с двумя световыми лучами; один из лучей проходит через трубу с водой

заполненных воздухом или водой. Однако эксперименты показали вопреки существующей теории, что такой разницы не существует.

Теория Френеля первая объяснила этот результат. Френель предположил, что вещество захватывает эфир частично (увлечение эфира), придавая ему скорость w, так что

$$w' = \rho w .$$

Он определил ρ – коэффициент Френеля через показатель рефракции μ:

$$\rho = \frac{\mu^2 - 1}{\mu^2} .$$

Этот коэффициент легко получается из отрицательного результата следующего эксперимента. Два световых луча пропускаются вдоль одного пути (рис. 14.1: 0, 1, 2, 3, 4, 5) в противоположных направлениях и создают интерференционную картину. I – это труба, заполненная водой. Если теперь вся система движется со скоростью w сквозь эфир, при перемещении трубы из положения I в положение II должно ожидаться смещение интерференционных полос. Смещение же не наблюдалось. Из этого эксперимента при учете частичного увлечения эфира может быть определен коэффициент Френеля ρ. Он может быть также очень просто и непосредственно выведен из преобразований Лоренца.

Результат Френеля считался универсальным исследователями, включая Максвелла, который подчеркнул, что хотя не может существовать эффектов первого порядка; возможно, могут существовать эффекты второго порядка, пропорциональные w^2/c^2 Тогда при $w \approx 30$км/с для орбитального движения Земли $w/c = 10^{-4}$ и $w^2/c^2 = 10^{-8}$, значение слишком малое для измерения, по мнению Максвелла.

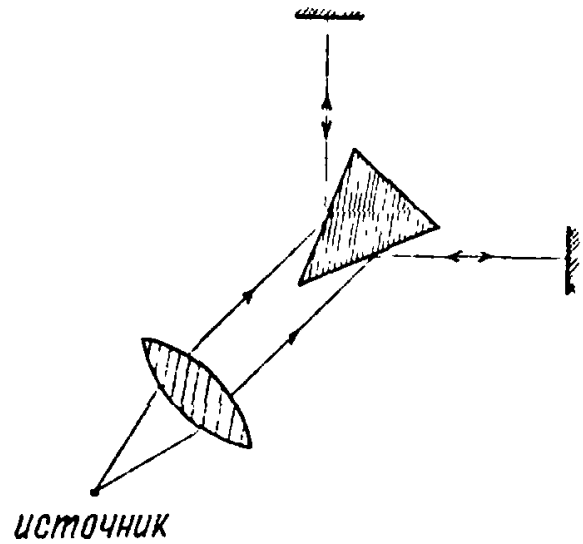


Рис. 14.2. Схема первого аппарата для обнаружения эффектов второго порядка

Мне показалось, однако, что, используя световые волны, можно придумать соответствующее приспособление для измерения такого эффекта второго порядка. Продуман аппарат, включающий в себя зеркала, движущийся со скоростью w сквозь эфир, в аппарате два световых луча проходят взад и вперед, один параллельно к w, а другой – под прямым углом к w. В соответствии с классической теорией изменения в световом пути, вызванные w, должны быть различными для обоих лучей и это должно производить ощутимое смещение интерференционных полос. Первая схема, в которой реализована попытка обнаружения эффектов второго порядка, изображена на рис. 14.2. При реализации ее, однако, натолкнулись на очень большие трудности и от нее вскоре отказались, и к счастью, потому что это привело к созданию конструкции интерферометра, который доказал свою ценность во многих экспериментах.

Интерферометр (рис. 14.3) известен всем вам. При наложении двух лучей, пропущенных соответственно от источника к стеклянной пластинке и затем к зеркалам 1 и 2 и обратно, получается ряд интерференционных полос. Если применен белый свет, то центральные полосы будут белыми, а края полос – цветными. При движении аппарата со скоростью w сквозь эфир должен возникать такой же эффект в свете, что и при движении лодки, стремящейся плыть вниз или вверх по течению или вперед и назад поперек течения. Время, требуемое для преодоления дистанции вперед или назад, будет различным для обоих случаев. Это легко видеть из того, что какова бы ни была скорость течения, лодка всегда должна вернуться к тому месту, из которого она стартовала, если она движется поперек течения, в то время как, если

она движется вдоль течения, она может оказаться неспособной вернуться обратно против течения.

Я попытался провести эксперимент в лаборатории Гельмгольца в Берлине, но вибрации городских магистралей не позволили стабилизировать положение интерференционных полос. Аппаратура была перенесена в лабораторию в Потсдаме. Я забыл имя директора (думаю, что это был Фогель), но вспоминаю с удовольствием, что он немедленно проявил интерес к моему эксперименту. И хотя он никогда не видел меня раньше, он предоставил всю лабораторию вместе с ее штатом в мое распоряжение. В Потсдаме я получил нулевой результат. Точность была не очень высока, потому что длина оптического пути составляла около 1 м. Тем не менее интересно отметить, что результат был вполне хорошим. Когда я вернулся в Америку, мне посчастливилось в Кливленде вступить в сотрудничество с проф. Морли. В аппаратуре был применен все тот же принцип, что и в аппаратуре, использованной в Берлине, хотя длина светового пути была увеличена за счет введения некоторого числа отражений вместо единственного прохождения луча. Фактически длина пути составила 10-11 м, что должно было за счет орбитального движения в эфире дать смещение в половину полосы. Однако ожидаемого смещения обнаружено не было. Смещение полос было определено меньше, чем 1/20 или даже 1/40 от предсказанного теорией. Этот результат может быть истолкован так, что Земля захва-

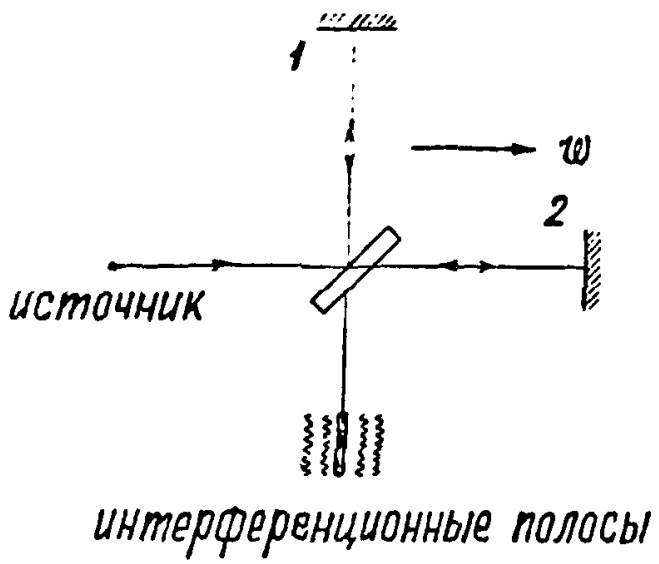


Рис. 14.3. Интерферометр Майкельсона

тывает собой эфир почти полностью, так что относительная скорость эфира и Земли на ее поверхности равна нулю или очень мала. Это предположение однако весьма сомнительно, потому что противоречит другому важному теоретическому условию. Лоренцем было предложено иное объяснение (Лоренцово сокращение), которое в окончательной форме выведено как результат знаменитых преобразований Лоренца. Они составляют сущность всей теории относительности. Эксперимент Майкельсона–Морли был предложен Морли и Миллером,. которые снова получили отрицательный результат. Миллер затем продолжил работы самостоятельно, и похоже теперь, что получен определенный положительный эффект. Этот эффект, однако, не может быть получен за счет орбитального движения Земли. Похоже, что он возникает вследствие движения Солнечной системы относительно звездного пространства, скорость которого может быть много большей орбитальной скорости Земли.

Наблюдения г-на Миллера вызывают новый интерес к проблеме. Превосходная часть работы уже выполнена господином Кеннеди, чей доклад вы услышите. Я сам намерен вернуться к этому эксперименту, но может пройти несколько месяцев, прежде чем я смогу изложить мои результаты, которые, как я надеюсь, смогут пролить свет на этот предмет.

II. Профессор Г.А.Лоренц, Лейден, Голландия

Движение Земли сквозь гипотетический эфир (называемый так в соответствии с исторической терминологией) может оказывать влияние на различные явления. Первым, относящимся сюда явлением, обнаруженным экспериментально, была аберрация света. Она обсуждалась на основе волновой теории света в форме, предложенной Френелем. Точку зрения Френеля мы можем выразить следующим образом: мы строим наши диаграммы в системе координат, связанных с Землей. В этой системе вся весомая материя покоится. Но эфир может двигаться сквозь нее. Допустим, скорость эфира есть w. Если эфир не движется, то скорость света, проходящего сквозь вещество, будет равна $u=c/\mu$, где μ – показатель преломления, а c – скорость света в вакууме. Теперь сформируем вокруг P элементарную волну. Через время dt она образует сферу радиусом udt. Центр O этой волны не будет, однако, совпадать с P, а будет смещен на расстояние $kwdt$, где $(1-k)$ есть коэф-

фициент Френеля $1-1/\mu^2=\rho$. Таким образом, $k=1/\mu^2$ .PQ есть путь света. (Мы обозначим через v скорость луча света.)

Из рис. 14.4, на котором $PQ=vdt$;$PO=kwdt$ и $OQ=udt$, мы получим соотношение:

$$PQ : PO : OQ = v : kw : u$$

и, следовательно,

$$u^2 = v^2+k^2w^2-2kv\cos\theta . \qquad (1)$$

Вывод этой формулы основан на принципе Гюйгенса и увлечении Френеля. Принцип Гюйгенса может быть использован в любом случае. Он просто отражает распространение элементарной волны и образование волнового фронта. Относительно коэффициента увлечения я напоминаю, что Френель нашел его сначала на механической основе, исходя из упругой теории света. Это было для того времени весьма значительное преобразование.

Если мы пренебрежем членами с w^2, мы найдем

$$v = u+kw\cos\theta ;$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{u} - \frac{kw}{u^2}\cos\theta .$$

Направление луча света между данными точками определяется из условия (принцип Ферма):

$$o = \delta\int \frac{dS}{v}$$

или

$$o = \delta\int(\frac{dS}{u} - \frac{kw}{u^2}\cos\theta dS) . \qquad (2)$$

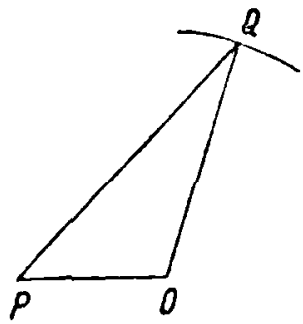


Рис. 14.4. Векторное суммирование относительной скорости эфира и скорости света, проходящего сквозь вещество, или соответствующих путей за время dt

Полагая теперь

$$\frac{k}{u^2} = \text{const},$$

получим, что k обратно попорционально μ^2. *Для $\mu = 1$ это дает $k = 1$.* Следовательно,

$$k = \frac{1}{\mu^2}.$$

Второй член в (2) получается таким:

$$\frac{1}{c^2}\int w \cos\theta dS.$$

Теперь будем считать перемещение эфира на нашей диаграмме безвихревым, так что *w зависит от скоростного потенциала φ:*

$$w = \text{grad}\,\varphi.$$

Тогда интеграл

$$\int w \cos\theta dS$$

для пути между точками P и P' будет равен

$$\int_P^{P_1} \frac{d\varphi}{dS} dS = \varphi_p' + 4_p.$$

Это значение одинаково для всего пути и условие (2) становится простым:

$$\delta\int \frac{dS}{u} = o.$$

так, как если бы не было движения эфира. Таким образом, мы заключаем, что направление луча не изменяется при движении эфира.

Рассуждения, приведенные выше, включают также случаи отражения и преломления.

Теперь рассмотрим два пути (индексы 1 и 2 на рис. 14.5) для луча света, проходящего из заданной точки P к другой заданной точке P'. Время, требуемое для прохождения света между ними, для пути 1 составляет

$$\int_1 \frac{dS}{u} = \int_1 \frac{dS}{u} - \frac{1}{c^2}\int_1 w \cos\theta\, dS;$$

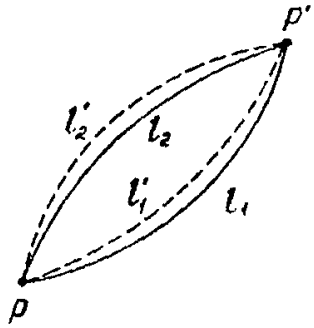


Рис. 14.5. Прохождение света между двумя точками по двум различным путям

а для пути 2

$$\int_2 \frac{dS}{v} = \int_2 \frac{dS}{u} - \frac{1}{c^2}\int_2 w\cos\theta\, dS\,.$$

Последние члены выражений равны. Поэтому разность между двумя интервалами времени не меняется при движении эфира. Это движение, следовательно, не оказывает влияния как на интерференцию, так и на дифракцию.

Можно заметить, что разность между интервалами времени, которая обсуждалась, должна зависеть от движения эфира, если это движение не безвихревое. Изменение создано разностью двух интегралов

$$\int_1 w\cos\theta dS \quad \text{и} \quad \int_2 w\cos\theta dS\,,$$

взятых для двух путей между P и P'. Для этой разности можно написать линейный интеграл скорости w, взятый по замкнутой цепи, сформированной двумя траекториями.

Рассмотрим два примера вращения Земли. Если эфир стационарен, его движение относительно Земли будет вращением в противоположном направлении. Если теперь зафиксировать относительно Земли широкий контур прямоугольной формы и в нем пропустить в противоположных направлениях два луча света, то относительное движение эфира даст изменение в положении полос интерференционной картины, образованной этими двумя лучами. Этот эффект наблюдался проф. Майкельсоном и Гелем.

В нижеследующем не должно возникать вопроса о вращении Земли, а только должна учитываться годичная аберрация. Для пояснения этого приведенных рассуждений достаточно. Если в точке, находящейся на некотором расстоянии от Земли, направление луча, проходящего

от звезды, задано в той системе координат, в которой движется Земля, то оно может быть сведено к такому направлению луча в системе координат, фиксированной относительно Земли, что направления этих относительных лучей определятся обычными законами оптики.

Мы провели обсуждение некоторых специальных теорий. В теории Френеля эфир предполагается неподвижным; его движение относительно Земли может быть истолковано как постоянное смещение, которое, конечно, безвихревое. Необходимо вводить коэффициент увлечения, потому что при наблюдениях эфир движется сквозь весомые тела (линзы), содержащиеся в нашем приборе.

Стокс предложил теорию, в которой эфир обладает безвихревым движением, так что во всех точках земной поверхности его скорость равна скорости Земли. С помощью этого последнего предположения он смог избежать ввода френелевского коэффициента.

Как бы то ни было, наконец, когда эфир предполагался несжимаемым, допущения Стокса пригодны для любого эфира. Если сфера движется с постоянной скоростью в несжимаемой среде, движение среды полностью определяется условием отсутствия в ней вихрей и тем, что в направлении, нормальном к поверхности, точки сферы и примыкающей к ней среды имеют одинаковую скорость. В тангенциальном же направлении две скорости будут непременно различны.

Пока дело касается аберрации, модификация теории Френеля допустима. Когда же мы добавляем коэффициент увлечения, мы можем принять существование некоторого движения эфира, допуская, что он безвихревой. Фактически это обязательное его состояние. Предположим для примера, что на верхней части поверхности Земли, которая может рассматриваться как плоскость, эфир течет в горизонтальном направлении x со скоростью w, и его скорость увеличивается с высотой y над поверхностью Земли. Это движение может и не быть безвихревым и может не приводить к наблюдаемой аберрации. Поскольку существование скоростного потенциала требует равенства производных dw_x/dy и dw_y/dx, наблюдаемая аберрация может существовать только тогда, когда в дополнение к предполагаемому движению в горизонтальной плоскости имеется некоторая вертикальная скорость эфира, меняющаяся от одной точки поверхности к другой.

Пока стоял вопрос только об эффектах первого порядка, то есть об эффектах, которые должны быть пропорциональны первой степени отношения скорости Земли к скорости света. Сюда относятся почти все случаи, в которых астрономы и физики пытаются выделить составляющую движения Земли в оптических и электрических явлениях, толь-

ко эффекты этого порядка величины могли бы наблюдаться. Тот факт, что все эти попытки оказались бесплодными и что это могло быть объяснено при теоретическом рассмотрении типа приведенного, вновь и вновь вело к признанию того, что движение Земли никогда не сможет быть обнаружено с помощью эффектов первого порядка. В этом мнении значительно утвердились, когда Эйнштейн развил свою теорию относительности и просто постулировал, что результаты всех экспериментов, которые мы проводим в наших лабораториях, должны быть независимы от движения Земли, каковы бы ни были точности наших измерений и порядок эффектов, которых мы могли бы достичь. К экспериментальным свидетельствам, которые мы всегда имели, добавилось обаяние красивой и самосогласующейся теории.

Я могу добавить, что исторически до развития теории относительности ситуация была несколько похожа на ту, которая сейчас характерна для квантовой механики. Конечно, имелось не так много людей, работающих в области физических полей, как сейчас. И все же мы часто живо обсуждали этот предмет. Я особенно запомнил собрание Германского общества естественных наук в Дюссельдорфе в 1898 г., на котором присутствовали немецкие физики Планк, В.Вин, Друде и многие другие. Было представлено несколько приборов, с помощью которых можно было бы наблюдать эффект, но, насколько мне известно, ни одна из этих попыток не была даже предпринята. Убеждение в том, что эффекты первого порядка не могут быть обнаружены, слишком сильно. Мы даже привыкли в конце концов рассматривать только аннотации экспериментальных статей, которые подтверждали это положение. В случае, когда результат оказался отрицательным, мы чувствовали полное удовлетворение.

Что касается эффекта второго порядка, то здесь ситуация была значительно сложнее. Экспериментальные результаты могли быть объяснены известным способом – путем преобразования координат из одной системы в другую. Было также необходимо преобразование времени. Так я ввел концепцию местного времени, которое различно для различных систем отсчета, движущихся друг относительно друга. Но я никогда не думал, что это относится как-то к реальному времени. Реальное время для меня было по-прежнему представлено старым классическим понятием как абсолютное время, которое не зависит от каких бы то ни было специальных систем отсчета. Там существует, по моему мнению, только это одно истинное время. Я рассматриваю мои преобразования времени только в качестве эвристической рабочей гипотезы. Подобным же образом теория относительности есть реально

работа исключительно Эйнштейна. И можно не сомневаться, что он понимает это, даже если бы работа всех его предшественников и не была выполнена. Его работа в этом отношении не зависит от предшествующих теорий.

Я немного скажу о теории эксперимента Майкельсона–Морли, который с начала и всегда имел отношение к эффектам второго порядка. Результат снова должен быть отрицательным, если мы следуем теории относительности. Если же вместо этого мы учтем в эксперименте наш старый стационарный эфир, то мы должны с большой тщательностью продумать пути интерферирующих лучей и время, за которое свет проходит вдоль каждого из них от источника до точки, где возникает интерференция.

Для этой цели мы должны снова применить фундаментальное уравнение (1). Ограничивая себя распространением в эфире, мы можем положить $u = c$, $k = 1$, так что уравнение приобретает вид

$$c^2 = v^2 + w^2 - 2vw\cos\theta .$$

Принимая во внимание члены второго порядка w^2/c^2, получим

$$v = c\left(1 + \frac{w}{c}\cos\theta - \frac{w^2}{2c^2}\sin^2\theta\right):$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{c}\left\{1 - \frac{w}{c}\cos\theta + \frac{w^2}{c^2}\left(\cos^2\theta + \frac{1}{2}\sin^2\theta\right)\right\}.$$

Теперь рассмотрим два пути 1 и 2, вдоль которых свет может идти от точки P до точки P' (см. рис. 14.5). Для каждого из них время, требуемое для распространения, будет определяться выражением в форме

$$\int\frac{ds}{v} = \frac{1}{c}\int ds - \frac{1}{c^2}\int w\cos\theta ds + \frac{1}{c^2}\int w^2\left(\cos^2\theta + \frac{1}{2}\sin^2\theta\right)ds , \qquad (3)$$

и мы сможем рассчитывать оба времени, если мы знаем траектории, вдоль которых берем интегралы. Допустим, что траектории l_1 и l_2 изображают пути двух лучей такими, какими они должны быть, если эфир не движется сквозь диаграмму. Как показано, эти траектории не меняются при движении до тех пор, пока мы учитываем лишь члены порядка w/c. Они могут, однако, меняться, если, как теперь предлагается, принять во внимание члены второго порядка. Мы получим тогда, в частности, пунктирные линии l_1' и l_2', отстоящее от

l_1 и l_2 на расстояние по нормали к этим линиям на величину второго порядка. Мы должны теперь рассчитать время распространения для путей l_1' и l_2', обозначаемое через T_{l_1}' и T_{l_2}'. Поскольку, однако, T минимально для l_1 и сравнивается с рядом лежащей траекторией и поскольку смещение от l_1 до l_1' есть величина второго порядка, различие между T_{l_1} и T_{l_1}' будет четвертого порядка. Этим можно пренебречь, когда мы отыскиваем величины второго порядка. Подобным же образом мы сместим T_{l_2}' от T_{l_2}. Это означает, что в определении фазовых разностей мы можем использовать величины из (3) для лучей, так что они будут соответствовать обычным законам оптики при отсутствии движения Земли.

Таким образом, мы пришли к обычной теории эксперимента, который должен дать надежду на смещение интерференционных полос, отсутствие которого объясняется хорошо известным гипотетическим сокращением (Лоренцово сокращение).

Если меня спросят, рассматриваю ли я это сокращение как реальность, я отвечу "да". Она такая же реальность, как все, что мы наблюдаем.

III. Профессор Дэйтон К.Миллер, Кейсовская школа прикладных наук

Эксперименты, о которых я буду докладывать сегодня, похоже, приводят к заключению, которое противоречит обычной интерпретации эксперимента Майкельсона–Морли. Для того чтобы изложить историю полнее, я начну с заключения по экспериментам, которые были проведены Майкельсоном и Морли в 1887 г. в Кливленде; эти эксперименты были истолкованы как показавшие отсутствие эфирного ветра. Д-р Лоренц в 1895 г. предложил первое объяснение этому неожиданному результату, предположив, что движение твердого тела сквозь эфир может сопровождаться сокращением размера этого тела в направлении движения с одновременным вытягиванием его в поперечном направлении, сокращение и растяжение пропорциональны квадрату отношения скоростей перемещения и света, их значения таковы, что уничтожают эффект эфирного ветра в интерферометре Майкельсона–Морли. Оптические размеры этого ин-

терферометра были определены базой из песчаника, на которой были размещены зеркала. Если сокращение размеров зависит от физических свойств твердого тела, то можно предположить, что сосновые балки будут испытывать большее сокращение, чем песчаник, в то время как сталь может сократиться в меньших пределах. Если сокращение размеров нивелирует ожидаемое смещение полос в одном аппарате, то оно же может в другом аппарате дать смещение, отличное от нуля, возможно, даже противоположного знака.

На Международном конгрессе по физике, состоявшемся в 1900 г. в Париже, Лорд Кельвин произнес речь, в которой он изложил теорию эфира. Он заметил, что "... только единственным облаком в ясном небе теории был нулевой результат эксперимента Майкельсона–Морли". Профессор Морли и автор присутствовали при этом, и в разговоре Лорд Кельвин сказал, что эксперимент должен быть повторен с более чувствительным прибором. Автор в содружестве с профессором Морли сконструировал интерферометр примерно в четыре раза более чувствительный, чем примененный в первом эксперименте, с длиной оптического пути 214 футов (65,3 м), эквивалентной, примерно, 130 млн. длин волн. В этом приборе относительная скорость Земли и эфира, равная орбитальной скорости Земли, должна быть выявлена смещением интерференционных полос на 1,1 полосы. Такое смещение определяется размером прибора, который с тех пор и применялся. Оптическая часть была сделана заново, из первоначального аппарата использовали только бак с ртутью и деревянный поплавок.

Такой прибор с основой из сосновых досок был применен в Кливленде в 1902, 1903 и 1904 гг. для непосредственной проверки эффекта Лоренца–Фицжеральда, но изменения параметров деревянной рамы, вызванные изменениями влажности и температуры, затрудняли получение точных наблюдений. Проф. Ф.Х.Нефф из отделения гражданской техники Кейсовской школы прикладных наук рассчитал новый опорный каркас в целях обеспечения как симметрии, так и жесткости. Этот каркас или основа был сделан из структурной стали и был так сконструирован, что оптические размеры могли быть зависимыми лишь от длины кусков дерева или же самого стального каркаса. Наблюдения с этим аппаратом были выполнены в 1904 г. Вся методология была основана на ожидании эффекта, вызванного комбинацией суточного и годичного движения Земли совместно с предполагаемым движением Солнечной системы со скоростью в 19 км/с в направлении созвездия Геркулеса. Для наблюдений было выбрано два момента времени, когда результирующая этих движений лежала в плоскости ин-

терферометра: около 11 ч 30 мин (до полудня) и в 9 ч (после полудня). Рассчитанный азимут движения должен быть для этих двух моментов времени различен. Наблюдения для этих двух моментов времени были поэтому сконструированы таким образом, чтобы ожидаемый азимут для утреннего времени совпадал с азимутом для вечернего времения. Наблюдения для этих двух моментов времени суток дали результаты, имеющие положительную амплитуду, но почти противоположные фазы; когда они были сложены, результат был почти нулевым. Таким образом, результат оказался противоположным ранее обсуждавшейся теории, но согласуется с идеями, которые появились позже и изложены в настоящем докладе; теперь видно, что совмещение двух серий наблюдений с различными фазами основано на ошибочной гипотезе и что положительные результаты, полученные тогда, находятся в согласии с новой гипотезой солнечного движения. Наш доклад об этих экспериментах, опубликованный в Philosophical Magazine в мае 1905 г., заканчивается следующим соображением: "Можно полагать, что эксперимент лишь показал, что эфир в конкретной подвальной комнате увлекается в продольном направлении вместе с ней. Мы собираемся поэтому переместить аппарат на холм, чтобы посмотреть, не обнаружится ли там эффект".

Как о важном факторе я могу упомянуть о наших представлениях, при которых мы выполняли эксперимент. Было желательно получить определенный эффект, чтобы подтвердить конкретную теорию. Мы представляли, что должна получаться определенная картина. Мы рассчитали амплитуду и азимут эффекта из теории и обсуждали наши экспериментальные результаты в связи с этими специфическими ожиданиями. В каждом случае мы устанавливали, что результат был отрицателен, как и ожидалось. Но никогда не было числового нуля, даже в первоначальном эксперименте Майкельсона–Морли. Это был нуль лишь по отношению к орбитальному движению Земли. Полученный же эффект, однако, был более чем достаточным, чтобы быть измеренным. Эксперименты были призваны доказать, что это происходит не только не благодаря магнитным деформациям формы прибора, но и не вследствие температурных возмущений, тем более, что смещения полос были систематическими. Высказывалось предположение, что эфир может увлекаться внешней и внутренними сторонами каменного строения различно.

Осенью 1905 г. Морли и Миллер возвратили интерферометр из подвального помещения лаборатории на место на Евклидовых высотах в Кливленде, свободное от нагромождения зданий и находящееся на

высоте около 300 футов (90 м) над озером Эри и около 870 футов (265 м) выше уровня моря. Дом был построен из очень легких конструкций и его стеклянные окна были расположены в направлении ожидаемого эфирного ветра. В 1905–1906 гг. было сделано пять серий наблюдений, которые дали определенный положительный эффект – около 1/10 ожидаемого дрейфа. Проф. Морли устранился от активной работы в 1906 г., и продолжение эксперимента легло на плечи автора настоящего доклада. Было весьма желательно, чтобы дальнейшие наблюдения были вынесены на большую высоту, но многочисленные причины препятствовали проведению наблюдений.

Во время солнечного затмения 1919 г. было проведено измерение отклонения света звезд Солнцем, подтвердившее теорию относительности. Полученные результаты были широко восприняты как подтверждение этой теории. Это вновь возбудило интерес автора к экспериментам по эфирному ветру, интерпретация которых никогда для него не была приемлема. Благодаря любезности президента Мерриама и директоров Хале и Адамса было предоставлено место в обсерватории Маунт Вилсон на вершине горы Маунт Вилсон, имеющей высоту около 6000 футов (1860 м). Интерферометр для исследования эфирного ветра был установлен на место в феврале 1921 г., и наблюдения продолжались в течение пяти лет.

Наблюдения были начаты в марте 1921 г., аппарат и методика, использованные Морли и Миллером в 1904, 1905 и 1906 гг., претерпели некоторые изменения и были дополнены в деталях. Первое же наблюдение дало положительный эффект, такой, какой и должен был бы быть произведен реальным эфирным ветром, соответствующим движению Земли относительно эфира со скоростью 10 км/с. Однако прежде чем объявлять этот результат, показалось необходимым изучить каждую возможную причину, которая способна вызвать смещение интерференционных полос, подобное тому, что вызывается эфирным ветром; среди причин наиважнейшими были магнитострикция и тепловое излучение. Для исследования последнего металлические части интерферометра были полностью закрыты пробкой толщиной 1 дюйм; было проведено 50 серий наблюдений, обнаруживших такое же периодическое смещение интерференционных полос, как и в первых наблюдениях, и таким образом показавших, что тепловое излучение не является причиной наблюдаемого эффекта.

Летом 1921 г. стальной каркас интерферометра был демонтирован, и база из цельного куска бетона, усиленного латунью, была помещена на чан с ртутью. Все металлические части были сделаны из алюминия

или латуни; таким образом, весь аппарат был освобожден от магнитных влияний, а возможные эффекты, зависящие от тепла, были сильно уменьшены. В декабре 1921 г. были проведены 42 серии наблюдений с немагнитным интерферометром. Они показали положительный эффект, такой, как от воздействия эфирного ветра, который полностью соответствовал наблюдениям в апреле 1921 г. В этот период было испытано множество вариаций случайных воздействий. Наблюдения проводили с вращением интерферометра по часовой и против часовой стрелки с быстрым и очень медленным вращением, с интерферометром, крайне наклоненным благодаря нагрузке на одну сторону поплавка. Результаты наблюдений не зависели ни от одного из этих изменений.

Весь аппарат был возвращен в лабораторию в Кливленд. За период 1922 и 1923 гг. было проведено множество испытаний при различных условиях, которые контролировались, с множеством модификаций и переделками частей аппарата. Были переделаны призмы и зеркала, так что источник света можно было расположить вне помещения для наблюдения, далее потребовалось усложнение зеркал для наблюдения интерференционных полос в стационарный телескоп. Были опробованы методы фотографической регистрации с помощью кинокамеры. Были опробованы различные источники света, включая Солнце и электрическую фару. Наконец, подготовка был признана удовлетворительной для того, чтобы проводить наблюдения с астрономическим телескопом, имеющим объектив с 5-дюймовой апертурой (127 мм) и увеличением в 50 раз. Источником света служила яркая ацетиленовая лампа типа тех, которые применяются в автомобилях в качестве головных фар. Для определения влияния неравномерности температуры и теплового излучения была проведена обширная серия экспериментов, в которой были опробованы различные изолирующие покрытия для основы интерферометра и его оптических путей. Эти эксперименты доказали, что в условиях реальных экспериментов периодические смещения не могут быть вызваны температурными эффектами. Расширенные исследования, проведенные в лаборатории, показали, что полнопериодическое смещение полос, упоминавшееся в предварительном докладе о наблюдениях на Маунт Вилсон, обязательно проявляется в результате геометрической регулировки зеркал, когда используются интерференционные полосы конечной ширины, и что это смещение исчезает только для полос неопределенной ширины, что и предполагается простой теорией эксперимента.

В июле 1924 г. интерферометр был вновь перенесен на Маунт Вилсон и смонтирован на новом месте, где температурные условия

были более благоприятные, чем в 1921 г. Домик для интерферометра был также смонтирован с иной ориентацией. Снова наблюдения показали периодическое смещение интерференционных полос, как и во всех наблюдениях, предварительно выполненных на Маунт Вилсон и в Кливленде.

Несмотря на многочисленные попытки, оказалось невозможным объяснить эти эффекты как результат каких-либо земных причин или ошибками эксперимента. Были проделаны обширные вычисления с целью попытаться примирить теорию эфира с вероятным движением Земли в пространстве. Для того чтобы последовательно исследовать одну за другой предлагаемые гипотезы, наблюдения для определенных эпох были повторены. В конце 1924 г., когда объяснение получаемых результатов казалось уже невозможным, для начала каждого месяца года были проведены полные вычисления ожидаемого эффекта. Они показали, что смещение полос должно быть максимальным около 1 апреля и что направление максимального смещения полос должно вращаться вокруг горизонта в течение 24 часов в сутки. Для проверки этого предположения были проведены наблюдения в марте и апреле 1925 г. Смещение полос оказалось максимальным из всех ранее наблюдавшихся, но его направление не проходило последовательно все направления компаса и не давало направления 90° в сторону через интервал в шесть часов. Вместо этого направление максимума смещения полос только колебалось вперед и назад на угле около 60°, имея в основном северо-западное направление.

До 1925 г. эксперимент Майкельсона–Морли всегда использовался для проверки определенной гипотезы. Рассматривалась только та теория эфира, которая предполагала, что это абсолютно стационарный эфир, через который Земля движется, совершенно не возмущая его. Применительно к этой гипотезе эксперимент дал отрицательный ответ. Этот эксперимент был предназначен только для проверки вопроса с учетом особенностей известных движений Земли, называемых осевым и орбитальным, сложенных с постоянным движением Солнечной системы по направлению к созвездию Геркулеса со скоростью около 19 км/с. Результаты эксперимента оказались не согласованными с такими предполагаемыми движениями. Эксперимент был годен и для проверки гипотезы Лоренц–Фицжеральда, предполагавшей, что размеры тел изменяются при их движении сквозь эфир; были проведены проверки эффектов магнитострикции, теплового излучения и гравитационной деформации каркаса интерферометра. И хотя все эти наблюдения, продолжавшиеся годами, на различные вопросы давали отрицательный

ответ, неизменно присутствовал постоянный и устойчивый небольшой эффект, который не был объяснен.

Интерферометр для измерения эфирного ветра – это инструмент, который обычно приспособлен для определения относительного движения Земли и эфира; следовательно, он способен указать направление и скорость абсолютного движения Земли и Солнечной системы в пространстве. Если наблюдения были проведены для определения такого абсолютного движения, то каков же должен быть результат, независимый от каких бы то ни было ожиданий? Для ответа на этот главный вопрос *было решено провести более обширные наблюдения в другие* периоды 1925 г., что и было сделано в июле, августе и сентябре.

Можно задать вопрос: почему к этому не пришли раньше? Ответ частично заключается в том, что наше внимание было сконцентрировано на проверке определенной, так называемой "классической" теории, а частично в том, что не так-то легко разработать новые гипотезы, если для этого нет особых причин. Возможно, что существенной причиной неудач является значительная сложность выполнения наблюдений во все время суток в течение каждого периода времени. Я не думаю, что я самоуверен, я просто устанавливаю факт, когда отмечаю, что наблюдения эфирного ветра наиболее утомительны и изнурительны, требуют наибольшего физического, умственного и нервного напряжения из любых научных работ, с которыми я соприкасался. Простое регулирование интерферометра для интерференционных полос белого света и сохранение их в этом отрегулированном *состоянии при длине светового пути в 214 футов* (65 м) содержало более 60 различных операций, когда он находился на открытом воздухе; это требует как крепких нервов, так и твердой руки. Проф. Морли однажды сказал: "Терпение есть самообладание, без которого нельзя начинать наблюдения подобного рода". Наблюдения должны проводиться в темноте, в дневное время интерферометр должен затеняться экраном из черной бумаги; наблюдения должны проводиться при температуре точно такой же, что и на открытом воздухе; наблюдатель должен ходить по кругу диаметром около 20 футов (6 м); наблюдатель не должен касаться интерферометра во время этого хождения и в то же время он не должен терять из виду интерференционные полосы, которые видны только через маленький зрачок в окуляре телескопа, имеющий диаметр 1/4 дюйма (6,5 мм); наблюдатель должен удерживать глаз на движущемся окуляре телескопа, укрепленного на интерферометре, который плавает в ртути и равномерно поворачивается на своей оси со скоростью около одного оборота в минуту; наблюдатель делает 60 считываний положе-

ния интерференционных полос за каждый оборот, иногда сопровождая их электрическим щелчком. Эти операции должны продолжаться без перерыва во всей серии наблюдений, которая длится обычно 15-20 мин, и это повторяется непрерывно в течение нескольких часов рабочего цикла.

Когда наблюдения проходят успешно, интерферометр, к которому прикреплен наблюдательный телескоп, заставляют вращаться в ртутной ванне, так что отсчетные точки телескопа последовательно проходят все румбы или, что то же самое, точки всех азимутов. Относительное движение Земли и эфира должно служить причиной периодического смещения интерференционных полос, полосы движутся сначала в одну сторону, а затем в другую по отношению к исходному состоянию в поле зрения с двумя полными периодами в каждом обороте прибора. Начальная точка отсчета телескопа – север, положение интерференционных полос отмечается на 60 равноотстоящих в горизонтальной плоскости точках. Когда смещение максимально, что бывает 2 раза в сутки, отмечается азимут линии зрения, после чего несложно рассчитать прямое восхождение и склонение или "апекс" предполагаемого "абсолютного" движения Земли в пространстве. Определение направления движения Земли зависит только от направления, в котором находится отсчетная отметка телескопа при наблюдении максимального смещения полос, и не зависит от самого смещения или от смещения полос по отношению к некоторому частному положению нуля отсчета. Поскольку считывание проводится в интервале времени около 3 с, положение максимума зависит от наблюдений, перекрывающих интервал времени менее, чем 10 с. Полный же период смещения растягивается на время порядка 25 с. Кроме того, наблюдения для определения направления абсолютного движения существенно зависят от обычных температурных возмущений. Однако наблюдения являются дифференциальными и могут быть сделаны со значительной определенностью при всех условиях. Серия отсчетов обычно состоит из 20 поворотов интерферометра, сделанных, примерно, за 15 мин, это дает 40 определенных периодических эффектов. Эти 40 величин составляют одно "наблюдение". Любые температурные эффекты и другие причины возмущений, которые не являются регулярно периодическими в каждые 20 с на интервал в 15 мин будут гарантированно исключены в процессе усреднения. Периодический же эффект сохраняется в окончательном среднем, которое и должно быть реальным.

Положение системы интерференционных полос исчисляется в десятых долях ширины полос. Действительная скорость земного движе-

ния определяется амплитудой периодического смещения, которая пропорциональна квадрату относительной скорости Земли и эфира и длине оптического пути в интерферометре. Относительная скорость 30 км/с, равная орбитальной скорости Земли, будет производить смещение полос от одного экстремума до другого, равное 1,1 полосы. Возмущения из-за изменений температуры или из-за других причин, продолжительностью в несколько секунд или в несколько минут могут исказить действительное значение наблюдаемого смещения и, таким образом, дать менее достоверное значение скорости относительного движения, однако в то же время положение максимума смещения не изменится. Значит, следует ожидать, что наблюдения для определения скорости движения не будут столь точными, как наблюдения за направлением движения. Обе величины – амплитуда и азимут наблюдаемого относительного движения совершенно не зависят одна от другой.

Желательно проводить наблюдения, равномерно распределенные по 24 часам суток; поскольку одна серия требует около 15 мин времени, то 96 правильно распределенных серий будет достаточно. Чтобы провести такую серию, обычно нужно затратить 10 дней. Наблюдения окончательно сводятся к одной группе, и средняя дата принимается за дату всей серии наблюдений. Наблюдениям, выполненным на Маунт Вилсон, соответствуют три даты – 1 апреля, 1 августа и 15 сентября; их более чем вдвое больше, чем всех других наблюдений эфирного ветра, выполненных начиная с 1881 г. Общее число наблюдений, выполненных в Кливленде, потребовало около тысячи оборотов интерферометра, в то время как для всех наблюдений, выполненных на Маунт Вилсон до 1925 года, понадобилось 1200 оборотов. Наблюдения же 1925 года состоят из 4400 оборотов интерферометра, за время которых было сделано более 100.000 отсчетов. Группа из восьми отсчетов дает значения скорости и направления эфирного течения, так что было получено 12.500 отдельных измерений ветра. Это потребовало, чтобы наблюдатель прошел пешком в темноте по малой окружности 100 миль, произведя при этом отсчеты. В течение этих наблюдений условия были особенно хорошими. Все время был туман, который поддерживал температуру весьма стабильной. На внешних окнах дома были повешены четыре прецизионных термометра; часто максимальные изменения температуры не превышали 0,1°, а обычно они были менее 0,4°. Такие вариации не влияли на периодическое смещение интерференционных полос. Можно добавить, что во время отсчетов не только наблюдатель, но и записывающий показания не могли иметь даже смутного представления о том, какой из двух

периодов они наблюдают, и еще менее, каковы направление и величина какого бы то ни было периодического эффекта.

Сто тысяч отсчетов, сложенные в группы по двадцать и усредненные, затем изображены в виде кривых. Эти кривые подвергнуты механическому гармоническому анализу в целях определения азимута и скорости эфирного ветра. В этой работе использованы все первичные наблюдения без каких-либо пропусков и без придания весовых коэффициентов; к тому же наблюдаемые величины никак не корректировались. Результаты анализа окончательно картированы таким образом, чтобы показать изменения азимута ветра за полные сутки для каждой эпохи; вариации амплитуды были картированы подобным же образом.

Наблюдения 1925 г. были описаны, а детали результатов были показаны с помощью световых слайдовых диаграмм. Подобный доклад, переданный в адрес президента Американского физического общества, прочитан в Канзас-Сити 29 октября 1925 г. Эта речь полностью отпечатана в Science, т. 63, С.433-443, 30 апреля 1926 г.

Вычисления, основанные только на наблюдениях 1925 г., были выполнены для того, чтобы определить абсолютное движение Земли. Результат этого, как было доложено на совещании в Канзас-Сити, показал, что Солнечная система движется вперед со скоростью, превышающей 200 км/с. Для того чтобы подкрепить доложенное в Канзас-Сити, на Маунт Вилсон была выполнена серия наблюдений, составляющая 2020 оборотов интерферометра и соответствующая дате 10 февраля 1926 г. Полные вычисления, которые были теперь проделаны, включают наблюдения как 1925, так и 1926 г., из них вытекает следующее заключение: эксперименты по эфирному ветру на *Маунт Вилсон показали, во-первых, что имеется систематическое смещение* интерференционных полос в интерферометре, соответствующее относительному движению Земли и эфира в этой обсерватории со скоростью 10 км/с с вероятной погрешностью 0,5 км/с; во-вторых, что вариации в направлении и скорости указанного движения именно такие, как если бы происходило постоянное движение Солнечной системы в пространстве со скоростью 200 км/с или более по направлению к апексу в созвездии Дракона, около полюса эклиптики, который имеет прямое восхождение в 255° (17 часов) и склонение +68°; и, в-третьих, что ось, вокруг которой флуктуирует наблюдаемый азимут эфирного ветра, указывает в северо-западном направлении, тогда как простая теория показывает, что эта ось должна совпадать с северным и южным меридианом.

Аргументы, на которых основаны эти заключения, могут быть проиллюстрированы с помощью рис. 14.6 и 14.7. На рис. 14.6,*б* четыре кривые отражают средний азимут для четырех дат наблюдений, составленных применительно к местному или гражданскому времени Маунт Вилсон. Все кривые отражают величины по ординате на ноль часов, а полуденные величины – для 12 часов. Толстая кривая изображает среднее из 4 серий наблюдений, и ясно видна ее нерегулярность и близость величин к прямой. На рис. 14.6,*а* четыре азимутальные кривые, напротив, приведены к звездному времени. Толстая кривая отражает среднюю отчетливо видимую периодическую кривую. Если эффект возникает благодаря движению Земли сквозь пространство, то звездное время в том месте, где кривая пересекает временную ось, означает прямое восхождение апекса движения. Это время соответствует 17 часам. Склонение апекса, определяемое из амплитуды кривой и косинуса широты обсерватории, равно +68°. На рис. 14.7 внизу показана средняя дневная вариация азимута (ломаная линия) сравнительно с теоретической вариацией, показанной плавной линией. В верхней части рис. 14.7 ломаной линией показана средняя дневная вариация наблюдаемой амплитуды смещения полос, а плавная линия показывает ее теоретическую вариацию. Если это проявление эфирного ветра, то звездное время минимального значения амплитуды есть прямое восхождение аспекса. Это 17 часов, время, находящееся в соответствии с прямым восхождением, полученным из азимутальной кривой. Склонение апекса зависит от минимума и максимума эффекта и превышает широту обсерватории. *Вычисленное значение близко к +69°, оно согласуется* с тем, которое получено из азимутальной кривой. Как показали инструментальные исследования, азимут и амплитуда не зависят друг от друга; только в том случае, если на них оказала влияние одна и та же причина, появляется между ними некоторая связь. Согласование вычисленного и наблюдаемого эффектов как для амплитуды, так и для азимута, уверенно указывает на реальную космическую причину. Этот результат не может быть истолкован как "нулевой" эффект, он не может быть вызван инструментальными или локальными возмущениями.

Тот факт, что направление и амплитуда наблюдаемого эфирного ветра *не зависят от местного времени и постоянны* по отношению к звездному времени, предполагает, что в наблюдениях влияние орбитального движения Земли очень незначительно. Проведенные эксперименты не показали эффекта от действия орбитального движения и, следовательно, они не более согласуются со старой теорией непод-

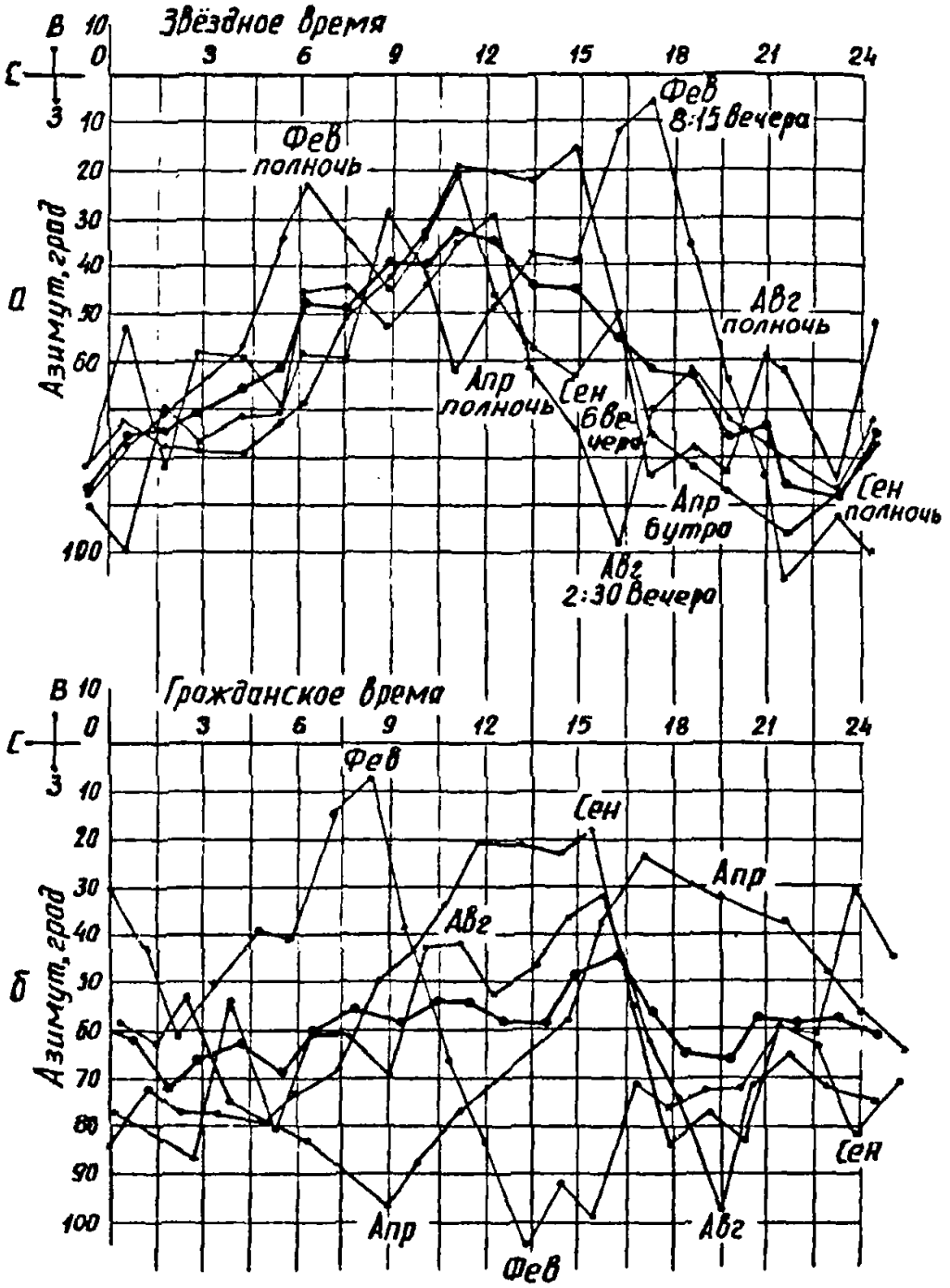
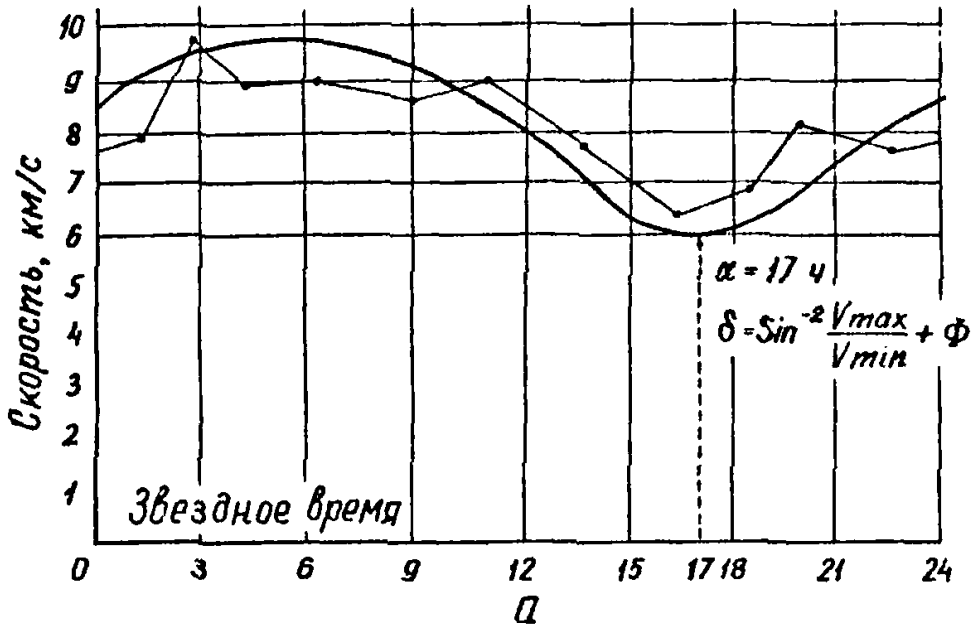


Рис. 14.6. Данные наблюдений азимута эфирного ветра, приведенные к звездному времени (*а*) и к времени суток (*б*)



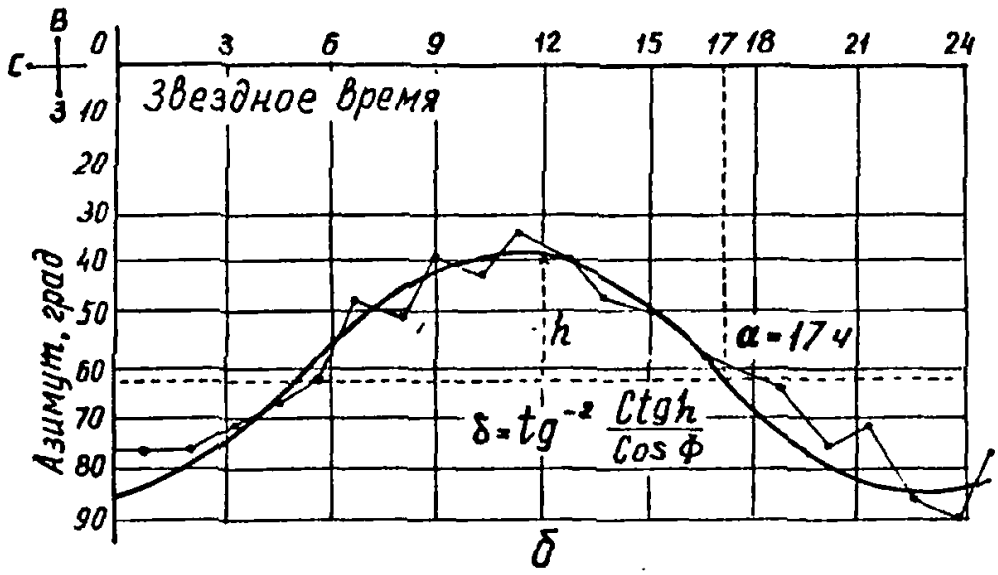


Рис. 14.7. Теоретические плавные кривые и экспериментальные ломаные кривые скорости (*а*) и азимуты эфирного ветра (*б*)

вижного эфира, чем эксперименты Майкельсона и Морли. Отсутствие орбитального эффекта позволяет считать, что постоянная скорость движения Земли в пространстве больше 200 км/с, но это не объясняет причин уменьшения скорости относительного движения Земли и эфира в интерферометре на Маунт Вилсон до 10 км/с; при этих условиях составляющая скорости, равная орбитальной скорости Земли, будет в результирующем значении вызывать эффект, который практически ниже наименьшего значения, которое может быть измерено данным интерферометром. Это и есть та причина, которая привела к выводу о том, что скорость движения Солнечной системы составляет самое меньшее 200 км/с, а может быть и много больше.

Некоторые критики полагают, что ранние кливлендские наблюдения дали реальный нулевой эффект и что положительный эффект на Маунт Вилсон достигнут благодаря большой высоте. Это неверно. Числовые значения положительного эффекта на Кливленде и на Маунт Вилсон столь близки, что эти наблюдения и теперь полезны, хотя на Кливленде число их было невелико, невозможно установить, что какой-либо эффект возник благодаря влиянию высоты. Если и есть некоторая доля влияния высоты, то она очень мала. Дальнейшие наблюдения в Кливленде дадут ответ на этот вопрос.

Чтобы объяснить эти эффекты результатом действия эфирного ветра, представляется необходимым учесть, что Земля захватывает эфир так, что относительное движение в точке наблюдения уменьшается с 200 км/с или более до 10 км/с и что этот захват, кроме того, смещает истинный азимут движения на 60° к западу от севера. Возможно, что западное отклонение определено влиянием направления хребта Маунт Вилсон, протянувшегося с юго-востока на северо-запад. Уменьшение указанной скорости с 200 км/с или более до наблюдаемого значения 10 км/с может быть объяснено теорией Лоренца-Фицжеральда сокращения тел без привлечения представлений о захвате эфира. Это сокращение может зависеть или не зависеть от физических свойств тела, и это может быть или не быть пропорциональным квадрату относительной скорости Земли и эфира. Очень слабое отклонение сокращения от значения, вычисленного Лоренцом, должно быть отнесено на счет наблюдаемого эффекта.

Числовые значения абсолютной скорости Солнечной системы, полученные из наблюдений эфирного ветра, вполне согласуются с результатами, полученными другими методами. Недавние исследования собственного движения звезд, выполненные Ральфом Вильсоном из Дадлеевской обсерватории, и радиального движения звезд, выпол-

ненные Кэмпбэллом и Муром из Ликовской обсерватории, дали апекс Солнечного пути в созвездие Геркулеса с прямым восхождением 270° и склонением около +30° со скоростью около 19 км/с. Д-р Г.Штремберг из обсерватории Маунт Вилсон, исходя из результатов исследований шаровидных скоплений и спиральных галактик, установил с очевидностью факт движения *Солнечной системы в точку, имеющую прямое* восхождение 307° и склонение +56° со скоростью 300 км/с. Лундмарк, изучая спиральные галактики, установил факт движения со скоростью 400 км/с. Все различные определения движения Солнечной системы дают то же самое главное направление с погрешностью в пределах окружности, имеющей радиус 20°.Принятая нами скорость 200 км/с есть просто нижний предел, она может составлять и 300 и 400 км/с. Первое допущение, следовательно, не представляет трудности. Нахождение апекса в созвездии Дракона с прямым восхождением 255° и склонением +68° находится внутри 6° от полюса эклиптики. Установленное движение Солнечной системы почти перпендикулярно плоскости эклиптики. Направление оси Солнца указывает в точку, находящуюся в пределах 12° от этого апекса. Однако это не может разрешить недоумение, откуда же могли появиться подобные функциональные зависимости в этих фактах.

Аргумент, рассматриваемый теперь, может быть продемонстрирован только с помощью наблюдений, продолжающихся все 24 часа в сутки, для того, чтобы определить точную форму ежедневных вариаций амплитуды и азимута эффекта, и посредством наблюдений, сделанных в различное время года, чтобы выяснить, как эффект зависит от звездного времени. Ранние наблюдения 1887 и 1905 гг. были проведены в небольшом количестве и они не были распределены внутри суток таким образом, чтобы можно было рассчитать направление ветра. Эти ранние наблюдения были сделаны в целях определения орбитального движения Земли и, следовательно, были выполнены лишь в два выделенных момента суток, так что в один момент времени этот частичный эффект давал максимум, а в другой момент был равен нулю. Эти два момента в сутки были выбраны так, что азимуты орбитальной составляющей скорости движения должны были сильно различаться по величине. К тому же до 1925 г. эксперименты никогда не превышали интервала в 6 месяцев. Причиной того, что вторая серия экспериментов не была выполнена после этого интервала, проста: не *было получено ожидаемого эффекта в первой серии.*

Наблюдения, выполненные в Кливленде Майкельсоном и Морли в 1887 г., и позже, повторенные Морли и Миллером, были точно пересчитаны под настоящую гипотезу, поэтому ранних наблюдений не

достаточно для определения направления ветра, но они всецело совместимы с заключением, сделанным на основании экспериментов на Маунт Вилсон. Или иначе, настоящий результат полностью подтверждает результаты ранних экспериментов Майкельсона и Морли, не давая очевидного эффекта орбитального движения Земли. В дополнение к этому с помощью последних экспериментов тщательно изучен остаточный эффект, показавший, что имеется систематический космический эффект, такой, как от реального эфирного ветра. Это заключение поставило новый вопрос, почему этот эффект меньше, чем ожидаемый по классической теории и почему направление эффекта на Маунт Вилсон смещено к западу? Этот вопрос, конечно, не более труден, чем многие другие, теперь ожидающие своего решения.

Интерферометр снова установлен на территории Кейсовской школы прикладных наук в Кливленде около места, где в 1887 г. был проведен первый эксперимент Майкельсоном и Морли. Предполагается провести серию наблюдений для четырех моментов времени года, чтобы сравнить каждую серию с сериями Маунт Вилсон. Это даст информацию для возможного определения влияния на эффект местных условий; есть надежда, что будет определено влияние на эффект высоты и орбитального движения.

IV Доктор Рой Кеннеди, Калифорнийский технологический институт

После публикации проф. Миллером своих выводов, представленных нам вчера, стало необходимым или, по крайней мере, весьма желательным независимое повторение эксперимента. Я собираюсь обсудить выполнение такого эксперимента.

В данном эксперименте оптические пути были сокращены до 4 м, а требуемая чувствительность была получена с помощью приспособления, способного определить очень малые смещения интерференционной картины. Вся оптическая система была заключена в герметичный металлический корпус, заполненный гелием под давлением 1 атм. Вследствие малых размеров аппарат был эффективно изолирован, что исключало циркуляцию и изменение плотности газа в оптических путях. Более того, поскольку величина $\mu-1$ для гелия составляет лишь одну десятую часть величины $\mu-1$ для воздуха при том же давлении, то очевидно, что возмущающие эффекты изменения плотности газа соответствуют таким же

эффектам в воздухе лишь при одной десятой атмосферного давления. Фактически было обнаружено, что любое колебание интерференционной картины было незаметным и при достижении температурного равновесия не было постоянного сдвига.

На рис. 12.1* приведена схема устройства. Оптические элементы монтируются на квадратной мраморной плите, сторона которой равна 122 см, а толщина – 10,5 см и которая покоится на кольцеобразном поплавке в сосуде с ртутью, имеющем диаметр 77 см. Это просто упрощенная копия исходной установки Майкельсона. Зеркала M_1 и M_4 находятся в фиксированном положении. Такие регулировки компенсирующей пластины C и зеркала M_2, которые необходимы после установки кожуха на место, могут выполняться из того места, где находится наблюдатель телескопа. Зеленый свет с длиной волны λ=5461 выделен системой линз и призм из излучения маленькой ртутной лампы S, прикрепленной к плите, и проходит через небольшое отверстие в экране Z. Узкие пучки световых лучей тщательно ограничиваются экранами и фокусировкой для предотвращения попадания в глаз рассеянного света, снижающего его чувствительность. Юстировка выполняется таким образом, чтобы формировались широкие дифракционные полосы на поверхности M_1 и M_2, на которых фокусируется телескоп. Окончательная регулировка выполняется вращением компенсационной пластины C с помощью точного дифференциального винта и с помощью размещения небольших грузов по углам плиты. При соответствующих условиях груз в 5 г отклоняет тяжелую плиту достаточно заметно. Регулирующие винты приводятся в действие валиками, проходящими через короткие податливые трубки таким образом, чтобы вращаться свободно, но не пропускать воздух. После предварительной регулировки зеркал кожух осторожно опускается на место, герметично соединяется с плитой, а затем заполняется гелием.

Схема интерферометра приведена на рис. 12.2. Луч практически плоскопараллельного однородного света, плоско поляризованный так, что его электрический вектор лежит в плоскости листа, перемещается вправо и падает на зеркало M_3 при угле полной поляризации для данной длины волны. На верхней поверхности луч расщепляется тонкой платиновой

*Ввиду того, что этот и два следующих рисунка в точности повторяют рисунки 12.1, 12.2 и 12.3 из статьи 12, они здесь не приводятся. – *В.А.*.

пленкой на две части почти равной интенсивности, одна проходит к зеркалу M_1, другая – к M_2. Оттуда они отражаются обратно к M_3, где воссоединяются и попадают в глаз через телескоп, сфокусированный на M_1 и M_2. Использованием плоскополяризованного света достигаются две цели: первая – полностью исключаются интерферирующие лучи, обозначенные пунктирными линиями, которые образовались бы естественным светом; вторая – восстановленные лучи могут регулироваться для достижения равенства интенсивности изменением относительной отражательной способности M_1 и M_2.

Поскольку верхний луч должен пройти большее число стекло-воздушных сопряжений, чем нижний, выравнять оба компонента натурального света таким способом невозможно.

Высокая чувствительность необходима в связи с тем, что короткие пути обеспечиваются преимущественно простым устройством поднятия половины поверхности зеркала M_2 на небольшую долю длины волны при наличии разделяющей линии между двумя уровнями, возможно более прямой и четкой. Используемое зеркало было выполнено путем покрытия части плоской пластины покровным стеклом микроскопа с острыми кромками и дополнительным утолщением за счет выделения на катоде отложений платины, чем обеспечено на всей пластине полностью отражающее покрытие. Несколько лет назад я натолкнулся на предложение использовать подобное разделенное зеркало в интерферометрии, но не знаю, кому оно принадлежит.

Теория устройства представляет собой следующее. Явление интерференции будет аналогично случаю, как если бы зеркало M_2 было замещено своим изображением на M_3. При условии эксперимента, в котором пути почти равны, M_2 перпендикулярно падающему на него лучу, а отраженные лучи почти параллельны, изображение M_2 будет почти параллельно и будет совпадать с поверхностью M_1. Элементарная теория показывает, что получающаяся в результате интерференционная картина практически совпадает с M_1. Нет необходимости усложнять данную дискуссию разработкой общей теории интерференции для всех наклонов зеркал, необходим лишь один экспериментально доказанный случай почти полного параллелизма.

Пусть рис.12.3 представляет собой увеличенный размер M_1 и изображение M_2, нормальное к их плоскости и разделяющей линии в M_2, лежит в плоскости $x = 0$, и уровни M_2 находятся на равных расстояниях на противоположных сторонах параллельной плоскости на расстоянии x от M_1. Пусть монохроматическая волна, в которой смещение дано как

$$\xi = a\cos\omega(t + \varepsilon - \frac{x}{c}),$$

падает на M_1 и M_2 слева. На поверхности M_1 смещение в отраженной волне будет равно

$$\xi_1 = a\cos\omega(t + \varepsilon),$$

если мы пренебрежем потерями за счет несовершенного отражения. Смещение в плоскости M_1 в волне, отраженной от верхней части M_2, составит

$$\xi_2 = a\cos\omega\,[t + \varepsilon - \frac{2(x-a)}{c}].$$

Получающийся в результате квадрат смещения есть

$$(\xi_1 + \xi_2)^2 = a^2\left\{\cos\omega(t + \varepsilon) + \cos\omega\,[t + \varepsilon - \frac{2(x-a)}{c}]\right\}.$$

Его можно сократить до выражения

$$2a^2\,[1 + \cos\frac{2\omega}{c}(x-a)]\cos^2\omega(t-\delta).$$

Аналогично, квадрат смещения, получающегося в интерферирующих лучах, определится как

$$2a^2\,[1 + \cos\frac{2\omega}{c}(x-a)]\cos^2\omega(t-\delta).$$

Интенсивность, пропорциональная квадратам амплитуды, может быть представлена в виде

$$I_1 = ka^2[1 + \cos\frac{2\omega}{c}(x-a)]$$

$$I_2 = ka^2\,[1 + \cos\frac{2\omega}{c}(x-a)].$$

Поскольку $\omega = 2\pi\nu$, где ν – частота света, то $\omega/c = 2\pi\lambda$. Следовательно,

$$I_1 = ka^2\,[1 + \cos\frac{4\pi a}{\lambda}(x-a)] \text{ и } I_2 = ka^2\,[1 + \cos\frac{4\pi a}{\lambda}(x+a)].$$

Для значений $x = n\lambda/4$, где n – целое число,

$$I_1 = ka^2(1 \pm \cos\frac{4\pi a}{\lambda})$$

при знаке "+" для четных величин и "-" для нечетных. То выражение справедливо для T_2. Следовательно, для этих условий

$$I_1 = I_2 .$$

Для наблюдателя поля обзора одинаково интенсивно по обеим сторонам от разделяющей линии, если $x = n\lambda/4$.

Сейчас нам необходимо определить то наименьшее изменение x, которое позволит воспринимать разницу в освещении двух сторон поля. Если x дает вариацию δx при сохранении постоянной a, разница в интенсивности составит

$$\delta I = (\frac{\partial_1}{\partial x} - \frac{\partial I_2}{\partial x}) .$$

Теперь

$$\frac{\partial I_1}{\partial x} = \pm \frac{4\pi k a^2}{\lambda} \sin \frac{4\pi a}{\lambda} .$$

Аналогично

$$\frac{\partial I_2}{\partial x} = \pm \frac{4\pi k a^2}{\lambda} \sin \frac{4\pi a}{\lambda} .$$

Следовательно,

$$\partial I = \pm \, [\frac{8\pi k a^2}{\lambda} \sin \frac{4\pi a}{\lambda}] \partial x ,$$

знак не имеет значения.

Воспринимаемость вариации определяется не только одной δI, но и отношением δI к общей интенсивности I_1 или I_2. В соответствии с законом Вебера–Фехнера, если δI берется как наименьшая воспринимаемая вариация в интенсивности, последующее соотношение почти постоянно для довольно большого диапазона значений интенсивности. При таком значении ∂I δx становится определяемым изменением в положении M_2.

Если вначале освещение однородно, то из приведенных уравнений получим

$$\frac{\partial I}{I} = \frac{8\pi}{\lambda} \partial x \frac{\sin \frac{4\pi a}{\lambda}}{1 \pm \cos \frac{4\pi a}{\lambda}}$$

и

$$\partial x = \frac{\lambda}{8\pi}\frac{\partial I}{I}\frac{1 \pm \cos\frac{4\pi a}{\lambda}}{\sin\frac{4\pi a}{\lambda}}.$$

Если теперь $\delta I/I$ истинно постоянно, то в случае знака "-", соответствующего слабой освещенности поля, получим чувствительность прибора, неопределенно возрастающую с уменьшением a. С уменьшением a I уменьшается и вскоре "постоянная" Фехнера быстро уменьшится. Тем не менее, условия освещенности и контрастности аналогичны имеющимся в полутеневом полярископе, и из теории Липпиха ясно, что $\delta I/I$ равно приблизительно $8 \cdot 10^{-3}$. Отсутствие абсолютной плоскости зеркал и одинаковости интенсивности интерферирующих лучей является дальнейшим ограничивающим фактором. Несложный эксперимент показывает, что a не должно быть намного меньше $0{,}025\lambda$, что и было в конечном итоге использованным значением. Подставляя эти значения в последнее уравнение, получаем

$$\partial\xi = 5 \cdot 10^{-5}\lambda$$

в качестве наименьшего определяемого изменения в положении одного из зеркал. Это соответствует изменению оптической длины пути

$$\partial l = 2\partial x = 10^{-4}\lambda\,.$$

Для полной реализации преимуществ устройства потребовались бы более совершенные зеркала и усилители и, следовательно, более нагретый источник света, чем это было бы желательно вблизи чувствительного аппарата, а кроме того, увеличение интервала между наблюдениями, что приведет к большим возможностям проявления любых температурных сдвигов. Во время проведения эксперимента не делалось попыток добиться значения ∂l, меньшего $2 \cdot 10^{-3}$. Такие вариации определялись без малейшей неуверенности.

На этом аппарате скорость 10 км/с, полученная Миллером, давала бы сдвиг, соответствующий $8 \cdot 10^{-3}$ длины волны зеленого цвета, что в четыре раза больше наименьшего определяемого значения.

Эксперимент проводился в лаборатории Норман Бридж, в помещении с постоянной температурой в различное время дня, но чаще во время, когда выводы Миллера обещают наибольший эффект. Чувствительность глаза исследовалась для каждого испытания помещением или снятием небольшого груза на плиту до и после ее вращения. При отсутствии флуктуаций в поле зрения не было необходимости усреднить результаты считываний. Как было показано, сдвиг, состав-

ляющий 1/4 сдвига по Миллеру, был бы замечен. Результат был совершенно определенным. Отсутствовал знак сдвига в зависимости от ориентации.

Поскольку эфирный ветер мог зависеть от высоты, эксперимент был повторен на Маунт Вилсон в здании обсерватории. Здесь эффект также был нулевым.

(Запись, добавленная в апреле 1928 г.: Иллингворт в Калифорнийском технологическом институте продолжил работу с прибором Кеннеди, используя усовершенствованные оптические поверхности и метод усреднения. Он сделал вывод о том, что скорости эфирного ветра, большей 1 км/с, не существует . [1])

V. Профессор Е.Р.Хедрик, Калифорнийский университет, Лос-Анжелес

В связи с недостатком времени проф. Хедрик представил лишь краткое описание своего сообщения, подготовленного им и проф. Ингольдом из университета шт. Миссури.

Введение

Известный опыт Майкельсона по определению относительного движения Земли и светоносного эфира был впервые поставлен в 1881 г. [2]. Возражения по поводу математической теории были высказаны Лоренцем в 1886 г. [3], и в 1887 г. теория была модифицирована Майкельсоном и Морли с учетом высказанных замечаний [4]. В настоящее время принята теория, соответствующая 1887 г.

До 1898 г. никаких серьезных возражений теория не вызывала. С этого времени появляется большое количество статей по данному вопросу, включающих возражения то по одной, то по другой детали теории. Различия в мнених возникали, очевидно, из-за различных концепций, касающихся механизма явления интерференции [5].

Ввиду широкого различия мнений относительно этого предмета целесообразно вновь разработать теорию на базе приемлемых гипотез, использующих иные представления о явлении интерференции.

Часть настоящего исследования тесно связана с той частью работы Риги, доложенной Штейном [6], которая подтверждает своими независимыми вычислениями результаты, полученные Риги; это имеет большое значение, поскольку точность самой этой работы поставлена под сомнение [7].

Отражение от движущегося зеркала

Мы начинаем с получения некоторых общих формул для отражения света от движущегося зеркала. Рассматриваются два случая:

а) направление движения зеркала совпадает с направлением лучей света перед отражением;

б) направление движения зеркала образует угол θ с направлением лучей света.

а) Обозначим скорость света через c и скорость зеркала через v. Пусть h означает тангенс угла наклона зеркала в направлении движения.

На рис. 14.8 AZ представляет фронт волны, движущейся на зеркало от A. В то время как зеркало движется от AL к $A'L'$, часть волны от Z проходит расстояние ZL'. Следовательно, обозначая угол $A'AL$ через a, получим

$$tg\, a = \frac{AZ}{ZL'} = (1 - \frac{v}{c})\, h = (1 - \beta)h\,,$$

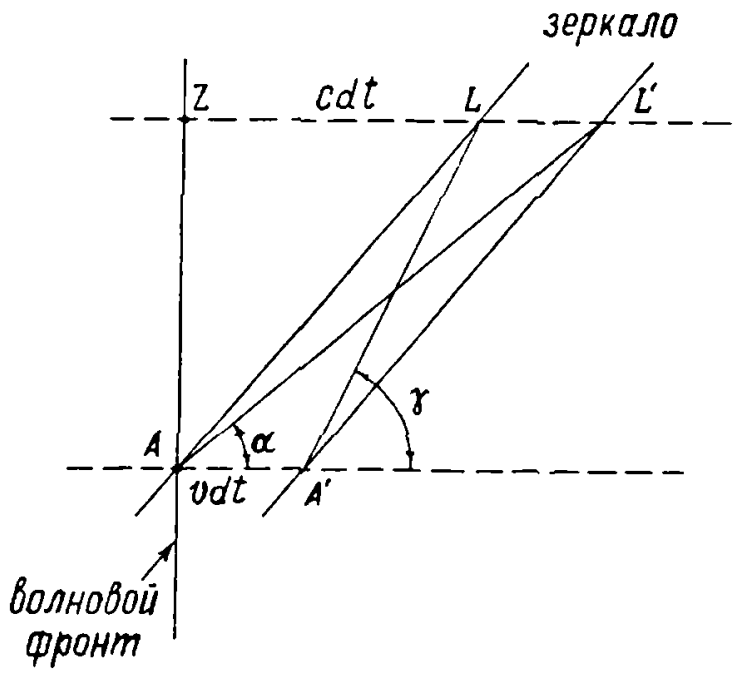


Рис. 14.8. Отражение фронта волны света от движущегося зеркала

что соответствует положению эквивалентного неподвижного зеркала.

Аналогично $A'L$ есть положение эквивалентного неподвижного зеркала для луча, приходящего с противоположного направления CA; и если мы обозначаем $CA'L$ через γ, то получим

$$tg\,\gamma = (1+\beta)h\,.$$

б) Если направление движения зеркала составляет угол θ с направлением лучей, то из рис. 14.9 видно, что зеркало в действительности движется со скоростью

$$v\cos\theta - \frac{v\sin\theta}{h}\,.$$

Таким образом, формулы для этого случая могут быть получены из предыдущих путем подстановки

$$\beta(\cos\theta - \frac{\sin\theta}{h})$$

вместо β.

Если зеркало наклонено под углом 45° в направлении лучей света, то $h = 1$ и

$$tg\,a = 1 - \beta(\cos\theta - \sin\theta)\,,$$

в то время как

$$tg\,\gamma = 1 + \beta(\cos\theta - \sin\theta)\,.$$

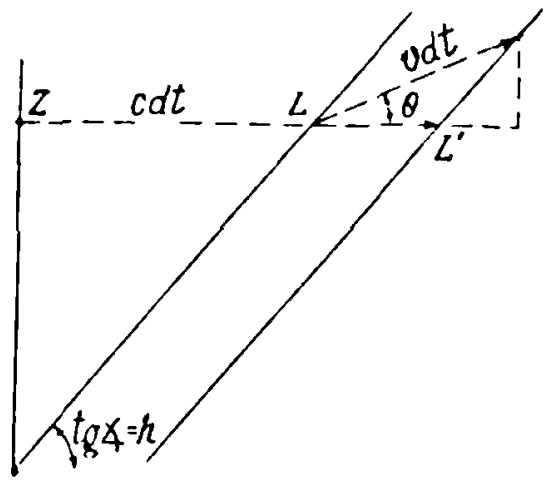


Рис. 14.9. Движение зеркала под углом к направлению луча света

Применение к эксперименту Майкельсона–Морли

В эксперименте Майкельсона-Морли луч от источника света S (рис. 14.10) встречает в A полупрозрачную стеклянную пластину, наклоненную под углом 45° к его пути. Часть света отражается зеркалом в B, переллельным SA, откуда вновь отражается для прохождения через пластину в A и затем в телескоп в T. Другая часть пропускается через стеклянную пластину в A к зеркалу в C, перпендикулярному SA, от которого свет возвращается к стеклянной плате в A' и от нее, кроме того, часть отражается в телескоп в T. Если зеркала установлены точно так, как описано, то мы называем эксперимент "идеальным экспериментом Майкельсона-Морли".

Мы хотим вычислить угол $T'A'T$. Предположим, что Земля и прибор движутся сквозь эфир в направлении, образующем угол θ с траекториями лучей SA. Необходимо определить положение эквивалентного неподвижного зеркала в B.

Для удобства обозначим $\beta(\cos\theta - \sin\theta)$ как x, угол $CAB = 2\alpha$, где $\operatorname{tg}\alpha = 1 - x$.

На рис. 14.11, если BE есть фронт волны луча, отраженного от A, и если зеркало в B движется от BM к $B'M'$ (расстояние r в направлении θ), тогда как часть волнового фронта в E движется к M', то BM' есть

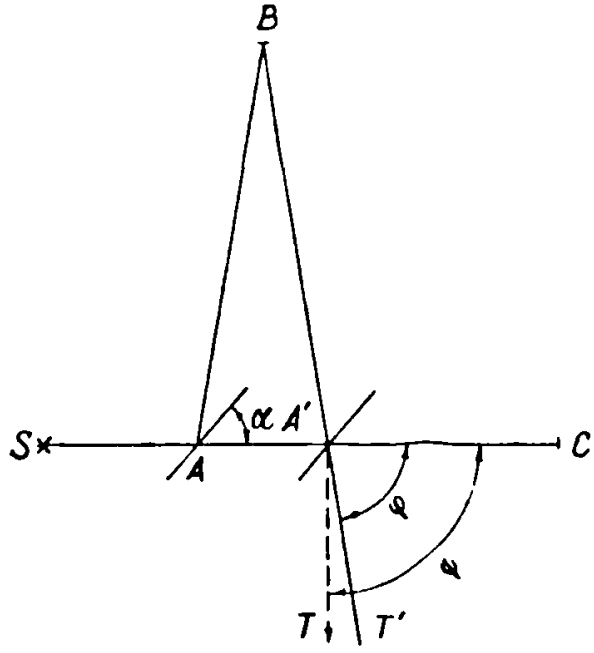


Рис. 14.10. Схема эксперимента Майкельсона-Морли

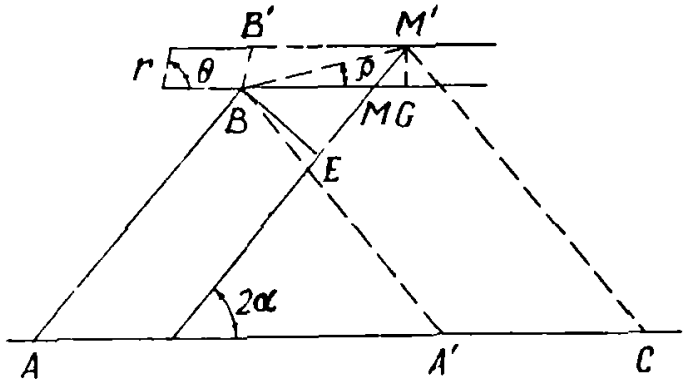


Рис. 14.11. Смещение фронта волны луча при движении зеркала в эксперименте

положение эквивалентного неподвижного зеркала. Обозначим угол MBM' через ρ, тогда

$$tg\,\rho = \frac{GM'}{BG},$$

где GM' перпендикулярно BM;

$$GM' = MM' \sin 2\alpha = r \sin\theta; \quad BG = BM + MM' \cos 2\alpha;$$

$$BM = \frac{EM}{\cos 2\alpha}; \quad \beta = \frac{r}{EM + MM'}.$$

Следовательно,

$$tg\,\rho = \frac{r \sin\theta}{BM + MM' \cos 2\alpha} = \frac{r\beta \sin\theta}{\frac{EM\beta}{\cos^2\alpha} + MM' \cos 2\alpha} = \frac{r\beta \sin\theta \cos 2\alpha}{r - r\beta \sin\theta \sin 2\alpha}$$

Но $\operatorname{tg}\alpha = 1 - \xi$; следовательно, для членов второго порядка

$$\sin\alpha = 1 - \frac{\xi^2}{2}, \quad \cos 2\alpha = \xi + \frac{\xi^2}{2}.$$

Подставляя эти величины в выражение для $\operatorname{tg}\rho$ получим

$$\operatorname{tg}\rho = \beta^2 \sin\theta (\cos\theta - \sin\theta).$$

Если теперь мы обозначим угол $CA'T$ через φ, а угол CAT' через ψ, то, помня, что φ и ψ – отрицательные углы, получим:

$$\psi + \rho = 2\alpha - \rho \text{ или } \varphi = 2(\rho - \alpha);$$

$$\psi = 2\gamma - 180^\circ.$$

Таким образом, положительный угол

$$T'A'T = \varphi - \psi = 2\rho - 2\alpha - 2\gamma + 180^\circ.$$

Чтобы определить тангенс этого угла, найдем

$$\operatorname{tg}(-2\alpha) = \frac{2(1-\xi)}{1-(1+\xi)^2};$$

$$\operatorname{tg}(-2\alpha - 180^\circ) = \frac{2(1-\xi)}{1-(1+\xi)^2};$$

и, следовательно,

$$\operatorname{tg}(-2\alpha - 2\gamma + 180^\circ) = \frac{4\xi^2}{4-\xi^4}.$$

Из этого получаем

$$\operatorname{tg}(\varphi - \psi) = \frac{\xi^2 + 2\beta^2 \sin\theta(\cos\theta - \sin\theta)}{1 - 2\beta^2\xi^2 \sin\theta(\cos\theta - \sin\theta)},$$

так как $\operatorname{tg}2\rho = 2\beta^2 \sin\theta(\cos\theta - \sin\theta)$ для членов второго порядка. Окончательно получим:

$$\operatorname{tg}(\varphi - \psi) = \beta^2 \cos 2\theta.$$

Эта формула была получена Риги, сделавшим на ее основе вывод, что вращение прибора на 90° в идеальном эксперименте не вызывает абсолютно никакого эффекта, так как, несмотря на обмен расстояний, пройденных двумя лучами, их положения в это же время также обмениваются; таким образом луч, имеющий более длинный путь, занимает такую же относительную позицию по отношению к лучу, имеющему более короткую траекторию после вращения, как и ранее. Отсюда следует, что картина интерференционных полос после поворота не может быть отличима от той, что была до поворота [8].

Обычная теория

Тщательное вычисление разницы длины путей, пройденных двумя *лучами, дает тот же самый результат, какой дается в обычной теории*, а именно: $\beta^2\cos 2\theta$. Фактически было также известно, что при идеальных условиях существует разность второго порядка в направлениях конечных лучей. Существовало мнение, что эта разность в направлениях может оказать влияние на разность во времени для телескопа и, следовательно, на разность в фазе только на величину третьего порядка в β. Таким образом, считалось, что эта разница не имела влияния на положение интерференционных полос, хотя и могла изменять ширину полос [9].

В следующем разделе мы исследуем, насколько это возможно, справедливость этого мнения. В качестве основы для исследования мы используем принцип механизма явления интерференции, использованный *в других случаях. Законно ли его применение в данном* примере, можно решить экспериментальным путем, но в данном случае отсутствуют какие-либо видимые причины для отказа от этого применения.

Можно отметить, что совершенно независимо от какой-либо специальной гипотезы, касающейся явления интерференции, доказательство Риги, приведенное в выводах предыдущего раздела, абсолютно доказывает, что изменением второго порядка в угле между конечными лучами, по крайней мере, можно пренебречь, так как в идеальном эксперименте ожидаемый сдвиг для вращения на 90° пропорционален $2\beta^2$, если этот угол не принимается во внимание, но сдвиг равен нулю, *если угол принимается во внимание.*

Возможное влияние разности угла на положение интерференционных полос

На рис. 14.12 показана схема волновых фронтов интерферирующих лучей. Пространство между F_1 и F_2 представляет собой центральную светлую полосу.

Пусть луч s изменит свое направление относительно луча t на $\Delta\alpha$ Если новый волновой фронт f_2 встречает старый волновой фронт f_1 возле кромки полосы на N, то центр полосы будет сдвинут влево от M до M^1. Сдвиг, зависящий полностью от изменения угла между лучами, будет зависеть и от расстояния от точки пересечения последовательных волновых фронтов до кромки полосы. При приближении этой точки к центру полосы расстоянием MM^1 можно пренебречь. В этом случае

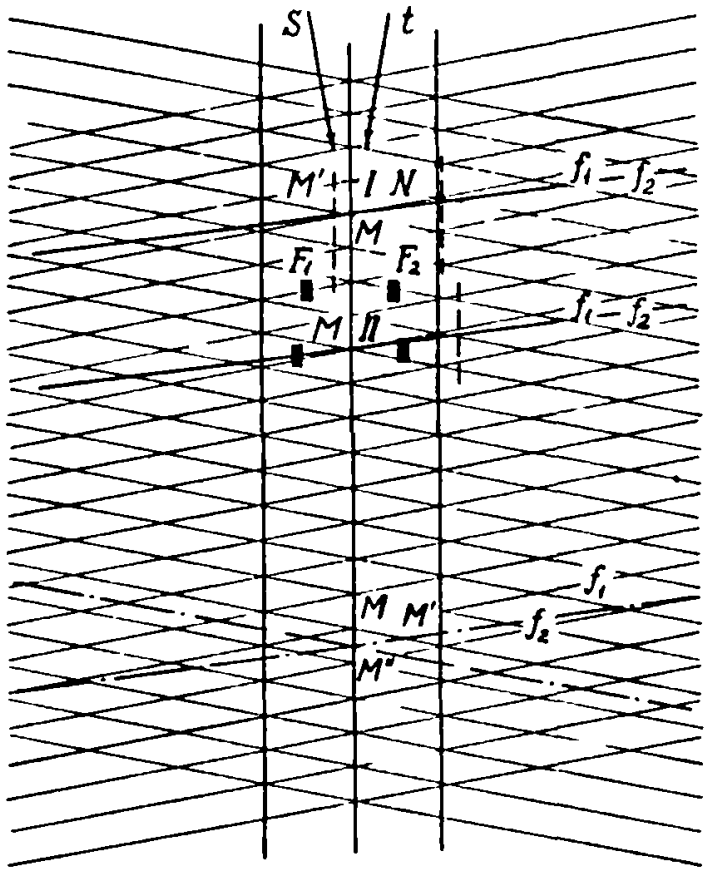


Рис. 14.12. Схема расположения волновых фронтов интерферирующих лучей

эффект выражается в расширении полосы без заметного изменения положения ее центра.

Нижеследующее основано на гипотезе, что расстояния, пройденные двумя лучами, не изменяются. Если расстояние, пересекаемое t, изменится, то волновой фронт LM примет новое положение, обозначенное штриховой линией.

Теперь фактически два изменения происходят одновременно, и поскольку оба являются периодическими, то кажется неизбежным, что точка пересечения f_1 и f_2 должна в конце концов приблизиться настолько, что произведет заметное смещение полос.

Возможно, конечно, что два эффекта смогут нейтрализовать друг друга, как показано в нижней части рисунка, где точка пересечения лучей выходит за центральную полосу.

Формула для сдвига полос

Представляется невозможным получить формулу для сдвига полос, не делая определенных предположений относительно природы явления интерференции.

Кажется, что простейшей процедурой является изучение схемы параллелограммов, вычерченных таким образом, что каждая система параллельных сторон представляет собой последующие положения какой-либо фазы волн в соответствующем луче.

Пусть рис. 14.12 представляет собой такую схему параллелограммов и пусть a означает расстояние от середины центральной полосы вправо до какого-либо удобного начала отсчета. Это расстояние будет зависеть от начальной регулировки между расстояниями, пройденными двумя лучами.

Если договориться об учете только относительных положении и длин путей двух лучей s и t, то можно предположить, что один из лучей остается фиксированным по длине, в то время как другой остается фиксированным по направлению.

Предположим, что луч t вращается вокруг точки в окрестностях своего изображения. Тогда можно предположить, что одна из линий f, представляющая одну из фаз t, охватывает окружность. Пусть b означает расстояние вправо от точки контакта этого круга с f в его начальном положении.

Используем следующую систему обозначений: a' равно новому значению a в связи с изменением длины s; b' равно новому значению b в связи с изменением направления t; M' означает середину центральной полосы после изменения длины s; M'' означает конечную позицию центральной полосы.

После поворота прибора на угол θ получим:

$$a' = a - D\beta^2(1 - \cos 2\theta);$$

$$b' = b + D\beta^2(1 - \cos 2\theta);$$

$$\frac{M'M''}{1 - \cos 2\theta} = \frac{a - b - 2D\beta^2(1 - \cos 2\theta)}{r + \cos 2\theta}$$

Прибавляя M' M'' к a', получим для положения M'' новую срединную точку центральной полосы:

$$a'' = \frac{a(r+1) + b\cos 2\theta - D\beta^2\,[r + 2 - (r+3)\cos 2\theta + \cos^2 2\theta\,]}{r + \cos 2\theta}.$$

Положение максимального сдвига

Выражение, приведенное в предыдущем разделе, показывает, что полосы имеют периодическое движение в пределах поля зрения телескопа. Максимум и минимум положения M зависят от значений a, b и r. Значения a и r зависят от начальной регулировки, а значение b, очевидно, будет различным для экспериментов, проводимых в разное время.

Если затем не будут предприняты попытки управления значениями этих величин, то можно предположить, что максимальные и минимальные положения для серии отсчетов будут иметь полностью случайные распределения. *Поэтому будет неправомерным просто усреднить* выводы серий наблюдений, как это было сделано в эксперименте Майкельсона–Морли. Фактически будет высокая степень вероятности того, что эта процедура приведет к чрезвычайно незначительным результатам, если ее применить к большому количеству наблюдений.

Проф. Хедрик заметил в конце доклада, что его результаты были рассмотрены проф. Эпштейном с точки зрения физики. Результаты дискуссии любезно представлены для публикации.

VI. Профессор Пауль С.Эпштейн, Калифорнийский технологический институт

Результаты анализа Хедрика заключаются в том, что два луча света получают разность фаз

$$\delta - \delta' = h\beta^2\cos 2\theta$$

и разность направлений

$$\Delta\alpha = \beta^2\cos 2\theta,$$

где членами четвертого порядка можно пренебречь.

Выберем теперь плоскость, в которой мы наблюдаем полосы, как $x = 0$ декартовой системы координат (рис. 14.13). Мы можем представить две волны выражениями (s – световой вектор):

$$s = A\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x\cos\alpha + y\sin\alpha + ct) + \delta\right];$$

$$s' = A\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x\cos\alpha' + y\sin\alpha' + ct) + \delta\right];$$

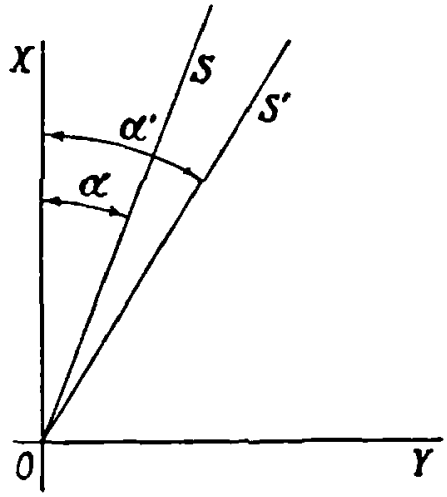


Рис. 14.13. Пересечение двух лучей света

Освещение экрана определится при $x = 0$, $\sin\alpha = a$, как

$$(s + s')^2 = 4A^2 \cos^2 [\frac{2\pi}{\lambda} y(a - a') + \delta - \delta'] \cos [\frac{2\pi}{\lambda} y(a + a') +$$

$$2ct + \delta + \delta'] = 2A^2 \cos^2 [\frac{2\pi}{\lambda} y(a - a') + \delta - \delta'].$$

Функция имеет максимум, когда аргумент косинуса кратен π. Положение центральной полосы дается как

$$\frac{2\pi}{\lambda} y_0(a - a') + \delta - \delta' = 0,$$

$$y_0 = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\delta - \delta'}{\alpha - \alpha'}. \qquad (1)$$

Расстояние между двумя максимумами, или ширина полос, определяется уравнением

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta y (\alpha - \alpha') + \delta - \delta' = \pi$$

или

$$\Delta y = \frac{\pi - (\delta - \delta')}{\alpha - \alpha'} \cdot \frac{\lambda}{2\pi}. \qquad (2)$$

Вначале рассмотрим интерферометр в покое. Мы не сможем обеспечить *идеальную регулировку, так как тогда не будем иметь полос.* Формула (2) показывает, что для получения конечной ширины полос

должна быть полезная разность $\alpha_0 - \alpha_0'$. Эта ширина составляет около 1 мм, так что при $\delta - \delta' = 0$ мы получим

$$\alpha_0 - \alpha_0' = \frac{\lambda}{2\Delta y} = \frac{5\cdot 10^{-5}}{2\cdot 10^{-1}} = 2{,}5\cdot 10^{-4}.$$

В реальном эксперименте дополнительно к $\alpha_0 - \alpha_0'$ есть поворот на $\Delta\alpha$:

$$\alpha - \alpha' = \alpha_0 - \alpha_0' + \Delta\alpha;$$

$$y_0 = -\frac{\lambda}{2\pi}\frac{\delta - \delta'}{\alpha_0 - \alpha_0' + \Delta\alpha}.$$

Порядок величин:

$$\Delta\alpha = (\frac{v}{c})\cos 2\theta = (\frac{3\cdot 10^5}{3\cdot 10^{10}})^2\cos 2\theta = 10^{-8}\cos 2\theta.$$

Следовательно, допустимо расширение

$$y_0 = -\frac{\lambda}{2\pi}(\frac{\delta - \delta'}{\alpha_0 - \alpha_0'} - \frac{\delta - \delta'}{(\alpha_0 - \alpha_0')^2}\Delta\alpha);$$

$$y_0 = -\frac{\lambda}{2\pi}\frac{\delta - \delta'}{\alpha_0 - \alpha_0'}(1 - \frac{\Delta\alpha}{\alpha_0 - \alpha_0'}).$$

Первый член выражения представляет собой сдвиг в связи с разностью фаз, а второй связан с поворотом. Видно, что он составляет $0{,}4\cdot 10^{-4}$ первого члена, и совершенно очевидно, что находится вне возможностей наблюдения в условиях эксперимента Майкельсона, Морли и Миллера.

Интересно, что в идеальном случае

$$y_0 = -\frac{\lambda}{2\pi}\frac{\delta - \delta'}{\Delta\alpha} = -\frac{\lambda}{2\pi}\frac{h\beta^2\cos 2\theta}{\beta^2\cos 2\theta} = -\frac{\lambda h}{2\pi}.$$

Таким образом, мы имеем постоянное положение полос независимо от ориентации прибора. Если бы Майкельсон проделал эксперимент так, чтобы иметь не полосы, но свет в определенном положении прибора или идеально отрегулированном интерферометре, ожидая получить темноту в другом положении прибора вследствие разности фаз, то эксперимент ничего бы не доказал.

Устройство доктора Кеннеди занимает промежуточное положение. Он берет полосы значительно большей ширины. Ширина, необходимая для получения заметной ошибки, равна приблизительно 250 см, однако совершенно определенно, что полосы в приборе не были строль широки. Теория Хедрика очень интересна и важна в сочетании с экспериментом Кеннеди.

VII. Профессор Пауль С.Эпштейн, Калифорнийский технологический институт

Я не могу сообщить сегодня что-либо свое, а намереваюсь дать краткий обзор ряда недавних экспериментов, касающихся опыта Миллера, выполненного в основном вне Пасадены. Я дам краткое объяснение трех экспериментов, осуществленных Томашеком в Германии, Чейзом в Пасадене и Пиккаром в Брюсселе.

В одном из своих экспериментов Томашек использовал следующее устройство. В непосредственной близости от заряженного конденсатора I (рис. 14.14) подвешивалась магнитная стрелка II. Эксперимент был направлен на проверку старой идеи Рентгена, заключающейся в следующем. Заряженный конденсатор, будучи в движении, представляет собой систему параллельных токов, движущихся в противоположных направлениях. Эти токи образуют магнитные поля, влияющие на магнитную стрелку. Если конденсатор движется относительно эфира, то должно быть обнаружено отклонение магнитной стрелки. В действительности этот прибор не может обеспечить удовлетворительных условий для выбора между старой и новой теориями. Точный анализ показывает, что обе теории ведут к одинаковому результату, так как это эффект первого порядка. Объяснение отсутствия эффекта заключается в том, что дви-

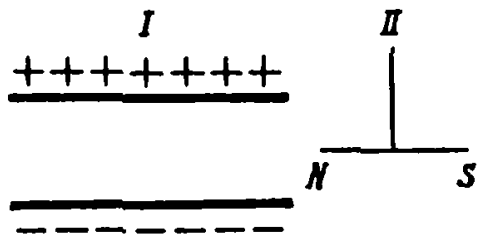


Рис. 14.14. Эксперимент Томашека с заряженным конденсатором:
I – заряженный конденсатор; II – магнитная стрелка на подвесе

жется не только конденсатор, но и индицирующая магнитная стрелка. Это вызывает второй крутящий момент, уравновешивающий первый. Более того, Томашек выполнял опыт с металлическим покрытием вокруг стрелки. В такой компоновке, исключающей все магнитные взаимодействия между I и II, он исключал любой эффект, который мог возникать без экранирования. Поэтому неудивительно, что он не получил положительного эффекта.

Томашек и независимо от него Чейз в нашей лаборатории повторили старый эксперимент Троутона и Нобля более точным, как они думали, способом. В его основе лежала следующая идея.

Предположим I (см. рис. 14.14), заряженный конденсатор, подвешен таким образом, что он может вращаться. Для конденсатора в состоянии покоя существует только сила притяжения между двумя пластинами в связи с наличием зарядов противоположного знака. В находящемся в движении со скоростью v (рис. 14.15) аппарате положительный заряд движется в магнитном поле, возникающем от движения отрицательного заряда, и наоборот. Следовательно, две дополнительные силы воздействуют на конденсатор, и они обнаруживают себя как моменты, так что следует ожидать вращения конденсатора. Можно легко вычислить этот момент M:

$$M = \frac{U}{\varepsilon}\left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin 2\theta \cos 2\varphi ,$$

где U – энергия, содержащаяся в конденсаторе; ε – диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего конденсатор; φ – азимут, характеризующий проекцию v на плоскость конденсатора по отношению к подвеске.

Следующая формула получена на основе предположения, что диэлектрическая среда может рассматриваться как континуум. Структура ε

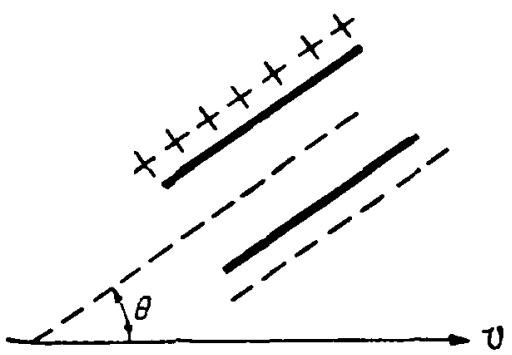


Рис. 14.15. Заряженный конденсатор в движении

во внимание не принимается, но это не имеет значения. И Томашек, и Чейз использовали не один конденсатор, а большое количество пластин для получения большой емкости и, следовательно, имели большую электрическую энергию.

Момент практически одинаков как для классической теории, так и для теории относительности, различие лишь в некоторых членах четвертого порядка, которые не имеют практического значения. Несмотря на существование момента, теория относительности утверждает, что никакого эффекта наблюдать нельзя. Это происходит потому, что момент определенным образом компенсируется. Объяснение этого любопытного факта можно найти в характеристике тензора массы в теории относительности. В этой теории масса имеет различное значение при ускорении в направлении движения (m_l) и под прямыми углами к нему (m_{tr}). Соотношение масс дается выражением

$$\frac{m_l}{m_{tr}} = \frac{1}{1-(v/c)^2}.$$

Для того чтобы проанализировать эффект момента, найденного выше, необходимо разделить действующие силы на два компонента: один в направлении движения, другой – под прямыми углами к нему. Первый компонент действует против более тяжелой массы m_l и вызывает относительно более слабое ускорение, чем второй. Таким образом, получается, что два ускорения как векторы указывают на центр тяжести системы (конденсатора), хотя силы этого не делают. При этом момент компенсируется в конечном эффекте. Таким образом, видно, что тензор массы является причиной отсутствия эффекта. Сокращение Лоренца не было принято во внимание совсем. Даже в случае отсутствия сокращения Лоренца эффект на конденсаторе нами не был получен. Если бы, однако, эффект наблюдался, это было бы противоречием теории относительности, так как соотношение m_l/m_{tr} есть прямое следствие этой теории. Томашек и Чейз заявили, что можно определить нескомпенсированный момент, соответствующий скорости 4 км/с. Для меньших скоростей их аппаратами отклонение определить нельзя. Это ограничение по точности получено на основе предположения о воздействии этого момента. Сейчас это предположение не представляется достаточно верным даже с точки зрения классической теории. Поскольку ядра атомов имеют электрическое строение, в классической теории необходимо принимать во внимание определенное отношение между массой и скоростью ядер. Рассматривая ядра как прочные сферы (Абрахам), находим:

$$\frac{m_l}{m_{tr}} = \frac{(1-\beta^2)}{(1-4/5\beta^2)}.$$

Если использовать эту формулу, момент будет скомпенсирован частично, но не полностью, как в теории относительности. Из формулы легко определить, что 20% вычисленного момента проявит себя как отклонение. Минимальная скорость, которую мог бы наблюдать Чейз, была равна 4 - 5 км/с, что близко к значению 10 км/с, полученному Миллером. Будучи интересными, эти эксперименты сами по себе не могут говорить за или против результатов Миллера. Для этого было бы хорошо провести их с более высокой точностью.

Несколько замечаний относительно эксперимента Пиккара в Брюсселе. Пиккар думал, что высота над поверхностью Земли должна иметь влияние на эффект, найденный Миллером. Это заблуждение, так как Миллер не заявлял о таком влиянии. Если предположить, что эфирный ветер на Маунт Вилсон больше, чем на уровне моря, то он должен быть еще больше в свободной атмосфере. Пиккар предпринял эксперимент с аэростатом. Его интерферометр имел плечи с оптическим путем, равным 2,8 м. Постоянство температуры поддерживалось термостатом. Аэростат вращался вдоль вертикальной оси пропеллером. Самописцем было зарегистрировано 96 оборотов. Был проведен гармонический анализ полученных кривых, но оказалось, что термостат не функционировал так, как ожидалось. Из-за этого случайные ошибки были слишком велики (возможная ошибка соответствовала скорости 7 км/с). Все, что заявляет Пиккар, – это то, что на высоте 2300 м в свободной атмосфере эфирный ветер не больше, чем на Маунт Вилсон. Никаких других выводов из этого эксперимента сделать нельзя.

Запись, добавленная в апреле 1928 г.: Чейз и Пиккар продолжали работу, после чего Чейз, работавший в Гарварде, увеличил точность своих измерений в три раза. Даже с учетом коэффициента 1/5, упомянутого выше, его новый аппарат смог бы определить скорость эфирного ветра 3 км/с. В пределах такой точности его результаты были отрицательными, обеспечивая тем самым значительную поддержку теории относительности [10]. Наиболее точная и недавно законченная работа Пиккара выполнялась совместно с Стаэлем на наибольшей высоте в 1800 м. Был использован такой же самозаписывающий интерферометр с термостатом. Результаты были полностью отрицательными, эфирный ветер составлял лишь 1/40 ожидаемого по Миллеру [11].

Дискуссия

Д-р Адамс, директор обсерватории, открыл дискуссию, выражая надежду, что проф. Лоренц и проф. Майкельсон выскажут свое мнение относительной соображений Риги и Хедрика.

Проф. Лоренц: Я ощущаю некоторую вину относительно работы Риги. Я прочел его работы давно и недостаточно хорошо помню их содержание, так как был занят последние годы абсолютно другими вещами. Необходимо было прочитать их снова, но я не смог сделать это вследствие большой занятости в Пасадене. После прочтения доклада Хедрика я намеревался очень тщательно исследовать эти вопросы вновь в связи с экспериментом Миллера. Более того, необходимо вновь принять во внимание Брилинского. Без подготовки я могу лишь сказать, что результаты Хедрика противоречат тем, которые я представил вчера. До сегодняшнего дня я считал вполне удовлетворительными соображения, основанные на принципе Ферма. Однако после сообщения г-на Хедрика я должен тщательно рассмотреть эти вопросы. По результатам Хедрика получается, что результат, ожидаемый в эксперименте Майкельсона–Морли, в числовом отношении отличается от того, который мы обычно ожидаем на базе классической теории. Числовое значение эффекта второго порядка будет отличаться от вычисленного Майкельсоном. Мой вариант предоставляется мне наиболее легким и прямым. Все же необходимо найти, в чем находится расхождение между двумя способами. В случае выбора метода, отличного от метода Ферма, необходимо проделать значительную работу. Необходимо очень тщательно, например, разграничить лучи света и перпендикуляры к цугам волн. Но, поскольку имеются расхождения между результатами, полученными двумя методами, я собираюсь проделать детальные вычисления как можно быстрее. Пока же я надеюсь, что мои общие соображения верны.

Теперь я хотел бы сделать несколько замечаний по поводу эксперимента Миллера. Я считаю, что существует серьезная проблема, связанная с эффектом, периодическим для полного оборота аппарата, и сброшенная со счетов Миллером, подчеркивающим значение эффекта полупериода, т.е. повторяющегося при полуобороте аппарата, и касающаяся вопроса об эфирном ветре. Во многих случаях эффект полного периода значительно больше эффекта полупериода. По Миллеру эффект полного периода зависит от ширины полос и будет нулевым для неопределенно широких полос.

Хотя Миллер утверждает, что он смог исключить этот эффект в значительной степени в своих замерах в Кливленде, и это можно легко объяснить в эксперименте, я хотел бы более четко понять причины этого. Говоря в данный момент как приверженец теории относительности, я должен утверждать, что такого эффекта вовсе не существует. Действительно, поворот аппарата в целом, включая источник света, не дает какого-либо сдвига с точки зрения теории относительности. Никакого эффекта не должно быть, когда Земля и аппарат находятся в покое. По Эйнштейну такое же отсутствие эффекта должно наблюдаться для движущейся Земли. Эффект полного периода, таким образом, находится в противоречии с теорией относительности и имеет большое значение. Если затем Миллер обнаружил систематические эффекты, существование которых нельзя отрицать, важно также узнать причину эффекта полного периода.

Рассмотрим эффект полупериода. Просмотрев различные диаграммы, я думаю, что вряд ли имеется сомнение в том, что существует *истинное* смещение полос в устройстве Миллера. Возникает вопрос о его возможной причине. Миллер предлагает несколько очень интересных вариантов. Его вывод заключается в том, что найденный эффект соответствует абсолютной скорости 10 км/с и для определенного звездного времени является постоянным в течение года. Он, конечно, не связан с орбитальным движением Земли, но означает движение Солнечной системы такого же типа, которое определено г-ном Штрембергом с совершенно другой точки зрения. Скорость этого движения оценивается по крайней мере в 200 км/с. По той или иной причине полная относительная скорость эфира и Земли не проявляется. Иначе нельзя объяснить отсутствие эффекта относительного орбитального движения Земли. Необходимо, однако, упомянуть следующее. Можно допустить, как это делает Миллер, что происходит лишь частичное увлечение, так как Земля не полностью непроницаема для эфира. Но тогда необходимо принять во внимание следующее. Предположим, w есть скорость Земли относительно эфира, который покоится на C (рис. 14.16). Если затем эфир ведет себя как идеальная жидкость, относительная скорость в нем на A с учетом B будет достигать w/z. Миллер объясняет дневные вариации в амплитуде способом, ясным из рис. 14.17. В соответствии с изложенным w не может рассматриваться как вектор постоянной длины, но будет сама изменяться в течение суток. Это, разумеется, делает интерпретацию дрейфа более сложной.

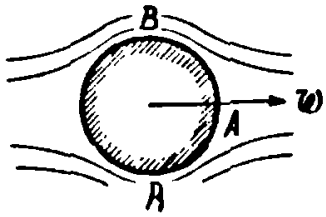


Рис. 14.16. Обтекание Земли потоком эфира

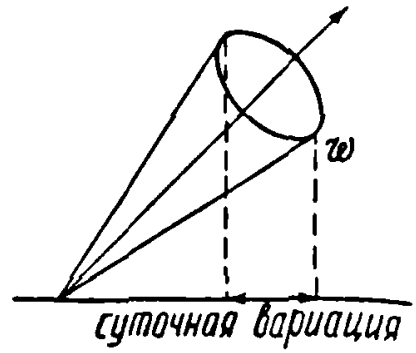


Рис. 14.17. Изменение проекции относительной скорости эфира и Земли в точке измерения под действием суточного вращения Земли

Что касается среднего смещения азимута к западу (50°), то это объяснить трудно. К счастью, однако, оно также периодически изменяется со звездным временем. Иначе трудно не заподозрить, что весь эффект вызван какими-либо лабораторными причинами.

Несколько слов об отчете Пиккара. Я видел полосы в его лаборатории, и они действительно великолепны. Между прочим, Пиккар рассматривает свой эксперимент как предварительный, который будет им усовершенствован в дальнейшем. Он работал в очень неблагоприятных условиях, так как ночь его первого подъема была необычно теплой. Должен отметить ради интереса, что такие наблюдения, какие выполнил Пиккар, очень изматывают. То же, конечно, относится к наблюдениям г-на Миллера. Пиккар сообщил мне, что не заметил каких-либо физиологических эффектов во вращающемся аэростате, связанных с центробежной силой, но движения в вертикальном направлении, раскачивающие голову, были очень болезненными вследствие эффектов силы Кориолиса.

Проф. А.А.Майкельсон: Я хочу задать несколько вопросов. Связывает ли г-н Миллер свои результаты с намерениями найти орбитальный эффект (эффект, связанный с движением Земли по своей орбите вокруг Солнца)?

Проф. Д.К.Миллер: Конечно. Именно для этой цели наблюдения выполнялись в четыре этапа, приблизительно с интервалами в три месяца. Таким образом, направление орбитальной компоненты движе-

ния изменяется от этапа к этапу на 90°. Наблюдения для каждого этапа были сокращены для отнесения истинного результирующего движения к определенной дате. Апекс движения, показанный всеми наблюдениями, находится возле полюса эклиптики и, следовательно, орбитальное движение может проявить себя в изменении положения этого апекса для различных дат. То есть будет происходить определенная годичная аберрация апекса.

Сравнение результатов по четырем датам не показывает очевидности этого эффекта. Я, однако, надеюсь, что при наличии нескольких серий наблюдений для каждой даты влияние орбитального движения может быть доказано. Полученный в действительности положительный эффект соответствует скорости относительного движения Земли и эфира приблизительно 10 км/с при вероятной погрешности 0,5 км/с.

Отсюда следует, что под влиянием орбитального движения наблюдаемая результирующая скорость изменится менее чем на 0,5 км/с.

Майкельсон: Какова возможная погрешность для значения 0,5 км/с?

Миллер: Это значение 0,5 км/с есть сама по себе вероятная погрешность измерения эффекта, как это определяется из вычислений. Поскольку никакого эффекта, который может быть положительно отнесен к орбитальному движению, определено не было, можно сказать, что такой эффект при условии его существования должен быть менее 0,5 км/с.

Майкельсон: Извините за настойчивость. Такая оценка вероятной погрешности основана на эксперименте, который не предназначен для определения эффекта движения Земли вовсе. Вы не могли найти вероятную погрешность, рассматривая наблюдения с точки зрения определения орбитального движения?

Миллер: Я не вычислял погрешность с такой точки зрения.

Майкельсон: Однако это можно было сделать. Я искренне хотел бы видеть такие вычисления. Если бы я ранее знал о великолепном устройстве Кеннеди, я, вероятно, не проводил бы свои эксперименты в такой форме. В любом случае рассматриваемая проблема должна быть исследована в дальнейшем. Даже более точное повторение экспериментов с помощью старых устройств будет иметь большое значение для надежности результатов. Нам необходимо определенно выяснить, что есть истина без предубеждений.

Относительно эксперимента Кеннеди. Я рад выразить ему свое уважение, потому что имел подобную идею построения прибора. Я собирался использовать фотометрическое сравнение поля, образованного светом, отраженного от разделенного зеркала, обе поверхности которого нахо-

дятся на расстоянии доли длины волны. Но мне не пришло в голову, что разделение можно осуществить напылением так удачно. Я собирался использовать для этой цели кислоты. Прибор Кеннеди так великолепен, что я хотел бы работать с подобным устройством, если господин Кеннеди не будет возражать.

По поводу замечаний об отчете г-на Пиккара (см. выступление Лоренца). Я должен сказать, что всякий новичок считает себя счастливым, если он способен наблюдать сдвиг полос в 1/20 полосы. Необходимо заметить, однако, что при некоторой практике можно измерять сдвиги в 1/100, а в очень удачных случаях и в 1/1000 полосы. Для этой цели полосы должны быть очень черными. С помощью нашего нового аппарата мы значительно продвинулись в представлении таких полос; аппарат был выставлен в лаборатории. Главное заключается, конечно, в исключении всякого рассеянного света, исходящего особенно от пластины с серебрянным покрытием. Обычная пластина вызывает отражение на обеих поверхностях. Мне удалось избавиться от рассеянного света с помощью простого устройства, показанного на рис. 14.18, состоящего из двух призм с полупрозрачной поверхностью, по которой они находятся в контакте, ориентированных так, что падающий свет не совсем перпендикулярен поверхности первой призмы. С помощью комбинации этих призм могут быть получены очень черные полосы. Существуют некоторые трудности, касающиеся разделения поверхностей, которые я надеюсь вскоре преодолеть, а возможно, что будет достигнута точность порядка 1/1000 полосы.

Я хотел бы сделать некоторые замечания по поводу интерпретации экспериментов Миллера. Мне кажется, что их трудно объяснить. Действительно, почему эфир должен испытывать сопротивление вдоль Земли до степени 19/20, а не какой-либо другой? Если это так, то нужно предположить, что существует большая разница между сопротивлением на поверхности Земли и на высоте тысяча миль.

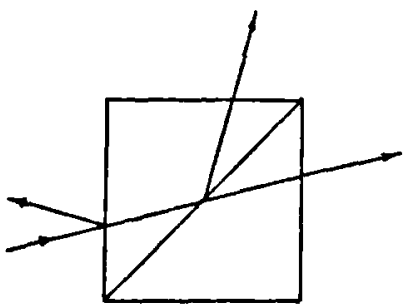


Рис. 14.18. Устройство из двух призм для повышения четкости интерференционной картины

Вероятно, там лобовое сопротивление будет равно нулю. Предположив для примера некоторую зависимость уменьшения лобового сопротивления от высоты, можно ожидать большой разницы между сдвигом на уровне моря и на Маунт Вилсон. В этом случае для наблюдения эффекта можно было бы использовать другой тип аппарата. Два луча света могут посылаться вокруг вертикально установленного прямоугольника (рис. 14.19). Можно ожидать сдвига в несколько сотен полос. Однако в экспериментах, выполненных в лаборатории Райерсон такого сдвига не обнаружено.

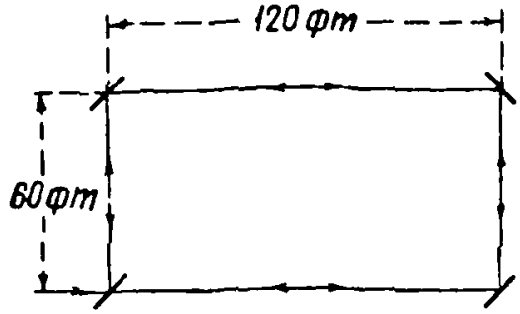


Рис. 14.19. Схема аппарата с расположением лучей в вертикальной плоскости

Завершая, я должен упомянуть о некоторых достоинствах нового аппарата: полосы исключительно черны; рама будет выполнена из инвара, что сделает ее крайне нечувствительной к изменениям температуры; будет использоваться фоторегистрация для того, чтобы обеспечить непрерывность отсчетов. Записанные результаты будут сохраняться и могут быть рассмотрены позже независимо от наблюдателя. Таковы три момента, представляющие собой значительные усовершенствования более ранних аппаратов.

Было бы интересно заметить, что вначале планировался другой аппарат, но он был отклонен, а принят данный интерферометр. Плечи имели длину 100 м, аппарат не мог поворачиваться, но движущаяся Земля должна была поворачивать его в различные положения относительно эфира. Мы намереваемся испытать его, эксперимент готовится в Чикаго.

Лоренц: Относительно деталей теории, затронутых д-ром Майкельсоном, я предлагаю следующие замечания. Если эфир движется свободно через вещество, относительно увлечения частиц никаких трудностей не возникает. Если, с другой стороны, факты обязывают нас

вновь ввести реально эфир, было бы очень трудно сказать, каковы его свойства. Что случится, например, если вещество окажется только частично проницаемым для эфира? С этой точки зрения вопрос о коэффициенте 19/20 не может подниматься до тех пор, пока не будут лучше исследованы его свойства.Мы можем даже оставить возможность того, что движение эфира может быть безвихревым. В этом случае эфирный ветер будет, конечно, иметь компонент, перпендикулярный к поверхности Земли, и он будет очень велик. В этом случае эффект, упомянутый Майкельсоном, должен быть нулевым. Относительная скорость эфирного ветра должна возрастать с увеличением расстояния от поверхности Земли и течение должно быть безвихревым. Это случай модификации Планком теории Стокса. Еще одной возможностью был бы несжимаемый эфир. Это исключило бы даже необходимость безвихревого движения эфира. Но в данный момент достаточно указать, что движение эфира с $\mathrm{rot}\, w = 0$ было бы достаточным для получения количественного объяснения явления аберрации и результата Майкельсона. Я говорю это только для того, чтобы показать огромное множество вероятностей для теории, если мы будем вынуждены новыми экспериментами вернуться назад к представлениям о реальной эфире.

Вопрос к д-ру Кеннеди: Ваш аппарат обладает такой чувствительностью, что способен определить изменения оптического пути $\delta l = 2 \cdot 10^{-3} \lambda$. Теоретически Вы вычислили нечувствительность. Я спрашиваю это не для себя, так как знаю, каким образом Вы это сделали. Я спрашиваю ради публики, так как метод, использованный Вами, исключительно хорош. Я предлагаю также рассказать о том, смогли ли Вы определить орбитальный эффект на основе предположения лобового сопротивления в 19/20?

Д-р Кеннеди: Отвечаю сначала на второй вопрос. Я думаю, что эффект, связанный с орбитальным движением Земли, должен наблюдаться с помощью моего аппарата.

Что касается первого вопроса, то я думал, что метод определения *был достаточно грубым. Масса 5-6 кг на плите, на которой был смон*тирован аппарат, давала сдвиг в одну полосу. Я определил минимальную массу (около 10 г), которая давала вполне наблюдаемый эффект. Отношение двух масс и дает затем $\delta l / \lambda$.

Я должен также объяснить, что я избавился от излишнего рассеянного света, используя метод, отличающийся от предложенного Майкельсоном для его нового устройства. Я использовал поляризованный свет, падающий под нужным углом на стеклянную пла-

стину (угол Брюстера), так что не отражалось никакого света вообще [см. доклад Кеннеди. Майкельсон воскликнул: "Поистине великолепно!"] Этот метод не является моим собственным изобретением. Он был предложен в 1911 г. в "Comptes Rendus", если я правильно запомнил.

Сдвиг азимута (50° к западу) в эксперименте Миллера означает, что присутствует некоторый ложный эффект, зависимый только от положения прибора относительно меридиана, который сдвигает азимут всего эффекта к западу. Результат должен быть воспринят как предположение о наличии ложного эффекта и эфирного дрейфа. Это объяснение, вероятно, потребовало бы, чтобы смещение полос, связанное с эфирным ветром, было меньше, чем можно наблюдать использованными устройствами. Это также объясняет различие в результатах, полученных мной и Миллером.

Эксперимент Пиккара не имеет большого значения. Насколько я понимаю, он работал как раз в такое время суток, когда едва ли можно было ожидать эффекта.

Лоренц: Я не считаю, что последнее замечание Кеннеди справедливо, Пикккар поднимался как раз в то время суток, когда над горизонтом вставало созвездие Геркулеса.

Кеннеди: Пиккар поднимался дважды. Один раз, когда звездное время было правильным, но его наблюдения были испорчены влиянием температуры. Его ошибки в 30 раз превышали искомый эффект. Во второй раз он избавился от ошибок, но эффекта нельзя было ожидать в звездное время, выбранное им для наблюдений.

Миллер: Я согласен с Хедриком, что теория аппарата, используемого для эксперимента, должна быть тщательно разработана. Теория Лоренца точна, но она является обобщением и не принимает во внимание специальные условия использования аппаратов. Что в действительности происходит с полосами, зависит от регулировки зеркал. Когда я заинтересовался экспериментом в 1900 г., адекватной теории инструмента не существовало. Теоретическое исследование аппарата было предпринято Хиксом, опубликовавшим его в "Philosophical Magazine" в январе 1902 г. Мы, Миллер и Морли, считали необходимым вновь вернуться к вопросу, так как Хикс предположил, что существует дополнительный член в выражении для исследуемого явления, который не был ранее принят во внимание. Этот член представляет собой заметную величину, периодическую для каждого полного оборота интерферометра, в то время как влияние эфирного ветра периодично в каждом полуобороте. В "Philosophical Magazine" в мае 1905 г. мы дали обзор теории, показывающий, что вычисления Хикса не оказывают

влияния на сделанные ранее выводы. Явление полнопериодического *смещения полос фактически присутствует* в экспериментах 1887 г., а также во всех последующих. В "Comptes Rendus", 1919. Т. 168, с .837 Риги начал серию статей, разрабатывая теорию в деталях. Он считал, что наши выводы не подкреплены теорией. Мне кажется, что теория Риги правильна абстрактно, но она не имеет дела с истинными явлениями, возникающими в *интерферометре*, как это делает теория Хикса. Вопрос требует дальнейшего исследования, как предложено проф. Хедриком. Теория Хикса принимает во внимание тот факт, что на практике изображение *c* (рис. 14.20) зеркала *a* учитывает то, что *a* слегка наклонено к *b*. Это совершенно необходимо для получения прямых лучей *полос конечной ширины*. Таким образом, его критика не применима к реальному случаю. Когда *b* и *c* наклонены друг к другу, истинный эфирный ветер даст дополнительный эффект, предсказанный Хиксом, являющийся периодическим в полном обороте аппарата. Хикс вычислил смещение полос, показав, что оно зависит от угла между *b* и *c*. Эффект *возрастает с возрастанием* угла и уменьшением ширины полос. Если искомое нами смещение за счет эфирного ветра должно быть периодическим в каждом полуобороте, то мы правильно исключили полнопериодическое смещение полос. Это выполнено графическим представлением одиночных наблюдений, оборот за оборотом интерферометра; *эти кривые проанализированы механическим* гармоническим анализатором и вторая гармоника (эффект полуоборота) представлена как следствие эфирного ветра. При наличии влияния эфирного ветра необходимо присутствует эффект полного оборота по Хиксу, и его присутствие может считаться еще одним сви-

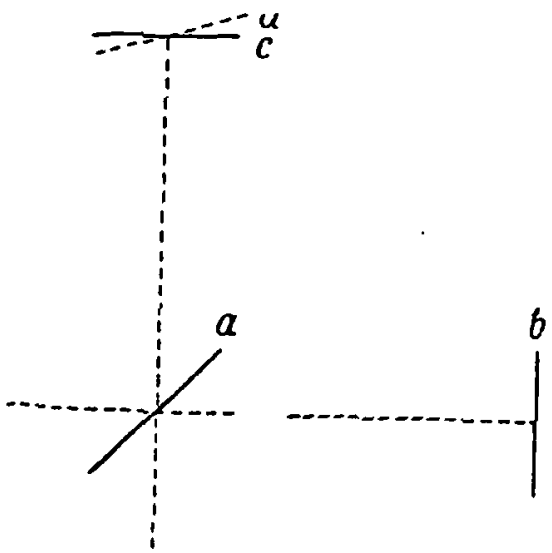


Рис. 14.20. Схема интерферометра со слегка наклоненным зеркалом

детельством наличия эфирного ветра. Величина и фаза эффекта полнопериодических смещений изменяются, так как зависят от регулировки зеркал наряду с эфирным ветром. Были показаны слайды, представляющие эффект полного периода. Очевидно, что смещение полос различно для разных серий наблюдений. Эффект полупериода с другой стороны характеризуется постоянным значением. Полнопериодическое смещение невелико, когда ширина полос такова, что пять из них покрывают зеркало, имеющее диаметр 10 см. При других условиях, однако, смещение может быть очень большим. Эффект полного периода не нов, он всегда присутствовал во всех экспериментах. Он присутствует и в первичных наблюдениях Майкельсона.

Кеннеди: Одинаков ли эффект при использовании металлической и бетонной рам?

Миллер: Да. Бетонный прибор показал меньшие температурные эффекты, чем прибор со стальной рамой, но его механическая прочность также была меньше. Я всегда использовал, как и Кеннеди, метод сдвига полос помещением грузов на конец рамы. Для получения сдвига в одну полосу требовалось приблизительно 325 г. Это меньше, чем соответствующий груз в приборе Кеннеди, так как плечи рамы в моем аппарате длиннее, чем в его. Я хотел бы заметить, что мой эксперимент проводился в различных условиях. Мой ассистент перемещался вокруг прибора для того, чтобы посмотреть, влияет ли его позиция на распределение температуры или стабильность или уровень прибора. Свет помещался в различные положения внутри и вне помещения. На Маунт Вилсон аппарат устанавливался в зданиях с различной ориентацией. Эффект везде наблюдался. После учета всех возможных источников погрешности всегда оставался положительный эффект.

Проф. Е.Р.Хедрик: С точки зрения математики не может быть вопросов относительно правильности вычислений, представленных проф. Лоренцем. Результат для членов второго порядка вопросов не вызывает. Возможно, однако, появление погрешности из-за изменения пути луча света из-за движения аппарата. Инструмент не мог быть всегда в идеальном положении, принятом для вычислений.

Я хотел бы привлечь ваше внимание ко второму пункту. Мы начали с определенного количества допущений. Сейчас наша цель в области математики – уменьшить необходимое количество допущений до минимума. Мы используем в данном специальном случае два принципа Гюйгенса и Ферма. Можем ли мы доверять им там, где дело касается членов третьего порядка, мы не знаем. Не может ли комбинация эффектов третьего порядка оказывать влияние на величину эффекта

второго порядка? Если мы могли бы уменьшить количество физических принципов, используемых в наших вычислениях, до одного, это было бы очень желательно. Это то, что мы пытались сделать с Риги.

Лоренц: Я хотел бы защитить свою теорию. Хедрик говорит, что необходимо пытаться сократить число допущений. Два принципа Гюйгенса и Ферма не являются независимыми. Второй может быть выведен из первого. Легко доказать, что это так. Таким образом, вопроса о наличии двух допущений нет.

Хедрик: Действительно ли это так?

Лоренц: Да, отношения между принципом Гюйгенса и принципом Ферма абсолютно общие. Я мог более точно привести некоторые доводы, изложенные мной вчера.

Предположим, P (см.рис. 14.5) есть *световая точка (здесь должны* начаться трудности, если мы должны точно пояснить, что мы имеем в виду). Предположим далее, что $\mathrm{rot}\, w = 0$, что отражает идею Френеля. *Используя френелевские коэффициент и увлечение,* находим влияние движения аппарата на эффекты первого порядка, одинаковые для каждого пути l_1 и l_2.

Существует еще один пункт, о котором необходимо упомянуть. Если мы примем во внимание эффекты второго порядка, путь лучей будет изменяться вследствие движения аппарата, так что необходимо будет использовать в один момент l, а в следующий l'. Я все же думаю, что для рассматриваемых эффектов не имеет значения, что именно мы возьмем. [Хедрик замечает: "Да, верно".] Понятно, что разность между l_1 и l' дает только эффект второго порядка. В тех случаях, где мы связаны только с распространением в эфире, эта величина вытекает из выражения для v (скорости света в движущейся системе):

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{c}\left[1 - \frac{w}{c}\cos\theta + \frac{w^2}{c^2}\left(\cos^2\theta + \frac{1}{2}\sin^2\theta\right)\right]$$

[см. выражение (3) в Докладе II]. Но возникает вопрос, какова будет форма уравнения, когда мы имеем дело со светом, проходящим *через* подвижные стеклянные пластины. В этом случае w^2/c^2, будет заменено на k^2w^2/c^2, где $1-k = (n^2-1)/n^2$ – коэффициент Френеля. Теперь эта величина для k не является столь строгой в данной связи. Это выражение $wkdt$ вследствие увлечения материей может быть подвергнуто сомнению, если необходимо учесть члены второго порядка. Это могло бы сделать необходимым изменение величины этих эффектов второго порядка. Нужно отметить, однако, что расстояния, через

которые свет проходит в стекле в эксперименте Майкельсона, сравнительно столь малы, что практически не могут вызвать каких-либо затруднений. Исходя из этого, теория, представляемая мной, есть общая, но в то же время точно применимая к реальному прибору. Во всяком случае, я намереваюсь изучить все недавние работы, такие, как работа Хедрика.

Д-р Г.Штремберг: Часто говорят, что Солнце движется "в пространстве" со скоростью 20 км/с к точке $\alpha = 270°$, $\delta = +30°$. Это выражение абсолютно неадекватно и означает лишь движение Солнца относительно ярких звезд с такой скоростью и направлением. Относительно удаленных объектов эта скорость значительно больше. Скорость Солнца относительно шаровидных звездных скоплений приблизительно равна 300 км/с в направлении $\alpha = 320°$ и $\beta = +65°$, а относительно спиральной туманности она может быть даже больше, хотя и в том же направлении. По-видимому, чем больше система отсчета, чем она более фундаментальна, тем более высока скорость, которая может носить фундаментальный характер.

Это как раз и происходит в данном случае. Движение Солнца относительно объектов разных классов совершенно различно, и было установлено общее правило: чем выше внутренняя дисперсия скорости в группе, тем больше скорость движения Солнца относительно этой группы. Практически все звездные объекты могут быть представлены в виде ряда с возрастающей дисперсией скорости и движением с различной скоростью вдоль определенной оси. Эта последовательность заканчивается шаровидными звездными скоплениями, и существует квадратичное отношение между движением группы вдоль определенной оси и дисперсией скорости по этой же оси. Это явление может быть объяснено как эффект ограничения скорости в фундаментальной системе отсчета, в которой шаровидные скопления находятся в статическом покое.

Недавние исследования гигантских М-звезд полностью оправдали эту гипотезу. Фактически было признано возможным представить распределение скорости вдоль этой фундаментальной оси гораздо более удовлетворительным способом одной имеющейся в распоряжении постоянной в добавление к этому фундаментальному вектору скорости, чем четырьмя произвольными постоянными, как в распространенных методах.

В звездном движении нам необходимо ввести вектор фундаментальной скорости 300 км/с в упомянутом направлении для того, чтобы обеспечить порядок и регулярность. Это предполагает существование "фундаментальной системы отсчета" или "среды" или "эфира", можно

назвать как угодно. Введение такой концепции имеет большое значение для исследования звездного движения.

Проф. Х.Бейтман: Эксперимент Майкельсона–Морли можно рассматривать как проверку законов отражения подвижного зеркала. В общих случаях, когда источник света движется относительно Земли, вопрос распадается на два:

1. Является ли изображение подвижного точечного источника света единственным подвижным точечным источником света, как в классической электромагнитной теории?

2. Являются ли пространственно–временные координаты точечного источника и его изображения связанными соотношениями

$$x' = x - \frac{2c^2}{c^2 - u^2}(x - ut); \quad t' = t - \frac{2u}{c^2 - u^2}(x - ut);$$

$$y' = y; \quad z' = z,$$

где u – скорость зеркала, классической электромагнитной теории и теории относительности?

Допуская, что на первый вопрос ответ будет утвердительным, необходимо исследовать различные модификации уравнений, связывающих пространственно-временные координаты точечного источника и его изображения в приборах с зеркалами в опыте Майкельсона–Морли. Интерференционные полосы могут в каждом случае рассматриваться как полосы, образуемые светом, исходящим непосредственно от определенных источников изображения и проходящих в соответствии с определенными законами распространения, которые также исследуются. Проблема усложняется сокращением размеров аппарата. Первый вопрос относительно четкости изображения точечного источника света, движущегося относительно зеркала, трудно решить экспериментально в связи с отсутствием источников света, движущихся с большой скоростью и на некотором удалении от Земли. Скорость падающей звезды может составлять 45 миль/с (82 км/с), но этого, вероятно, *мало для восполнения отсутствия четкости в изображении.*

Директор Адамс закрыл конференцию, поблагодарив участников за их вклад.

Институт Карнеги, Вашингтон;
Обсерватория Маунт Вилсон.
Апрель 1928 г.

Список литературы

1.Physical Review. 1927. Vol. 30. P.692.

2. American Journal of Science. 1881. Vol. 22. P. 120.

3. Archives Neerlandaises. 1886. Vol. 31, 2me livre.

4. Philosophical Magazine (5). 1887. Vol. 24. P.449.

5. Мы упоминаем следующие: Sutherland, Ibid. (5)1898. Vol.46; Hicks, Ibid. (6). 1902. Vol 3, 9; Sutherland, Nature. 1900. Vol. 63. P. 205; Luroth, Ber. d. Bayr. Ak. d. W. 1909. Vol.7; Kohl, Annalen der Physick, 1909. Bd.28. S.259; Budde, Physikalische Zeitschrift. 1911. Bd.12. S.979 und 1912. Bd.13. S.825; Righi, Sessions of Royal Institute of Bologna. 1919 and 1920.

Ответы на некоторые из этих статей приведены в следующих работах: Lodge, Philisophical Magazine (5). 1898. Vol.46; Morley and Miller, ibid. (6). 1905. Vol. 9. P.669; Laue, Annalen d. Physik. 1910. Vol.33. P.186, and Physikalische Zeitschrift. 1912. Vol.13. P.501; Debye, Beiblatter zu den Annalen der Physik. 1910. Vol. 34.

6. Michelson's Experiment and its Interpretation according to Righi. Nemo ie della Societa Astronomica Italiana. 1920. Vol. 1. P.283.

7. Observatory. 1921. Vol. 44. P.340-341.

8. See, for example, Larmor. Aether and Matter. P. 53.

9. See Michelson and Morley, Loc. cit.; also Larmor. P.48.

10. Physical Review. 1927. Vol. 30. P.516.

11. Die Naturwissenschaften. 1928. Vol. 16. P. 25.

The Astrophysical Journal. December 1928.
Vol. LXVIII, No. 5. P. 341-402.