

эфире. Опыт прост, но он не может дать ни на что никакого ответа<sup>1</sup>.

После Бухерера было и еще одно предложение опыта первого порядка [5], но столь, очевидно, ошибочное, что излагать его здесь нет надобности.

Тщетность всех попыток указать уловимый эффект первого порядка относительно  $v/c$  в области оптических или электромагнитных явлений позволяет высказать своего рода **принцип относительности и первого порядка**. Он замечателен тем, что не противоречит ни одному из существующих в озрении на природу физической «пустоты». Она может быть геометрической пустотой, и тогда указанный принцип будет механическим принципом относительности Галилея — Ньютона. Она может быть заполнена каким угодно эфиром, движущимся или неподвижным, — относительность первого порядка сохранится. Наконец, в теории Эйнштейна принцип относительности первого порядка есть только частный случай относительности какого угодно порядка.

<sup>1</sup> Полное правильное рассмотрение этого вопроса, показывающее бесплодность предложения Бухерера, было дано О. Френелем еще в 1818 г. (см. О. Френель, Избранные труды по оптике ГТТИ, Москва, 1955, Мемуар XI).

## II. ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА, ЕГО ПОВТОРЕНИЯ И АНАЛОГИ

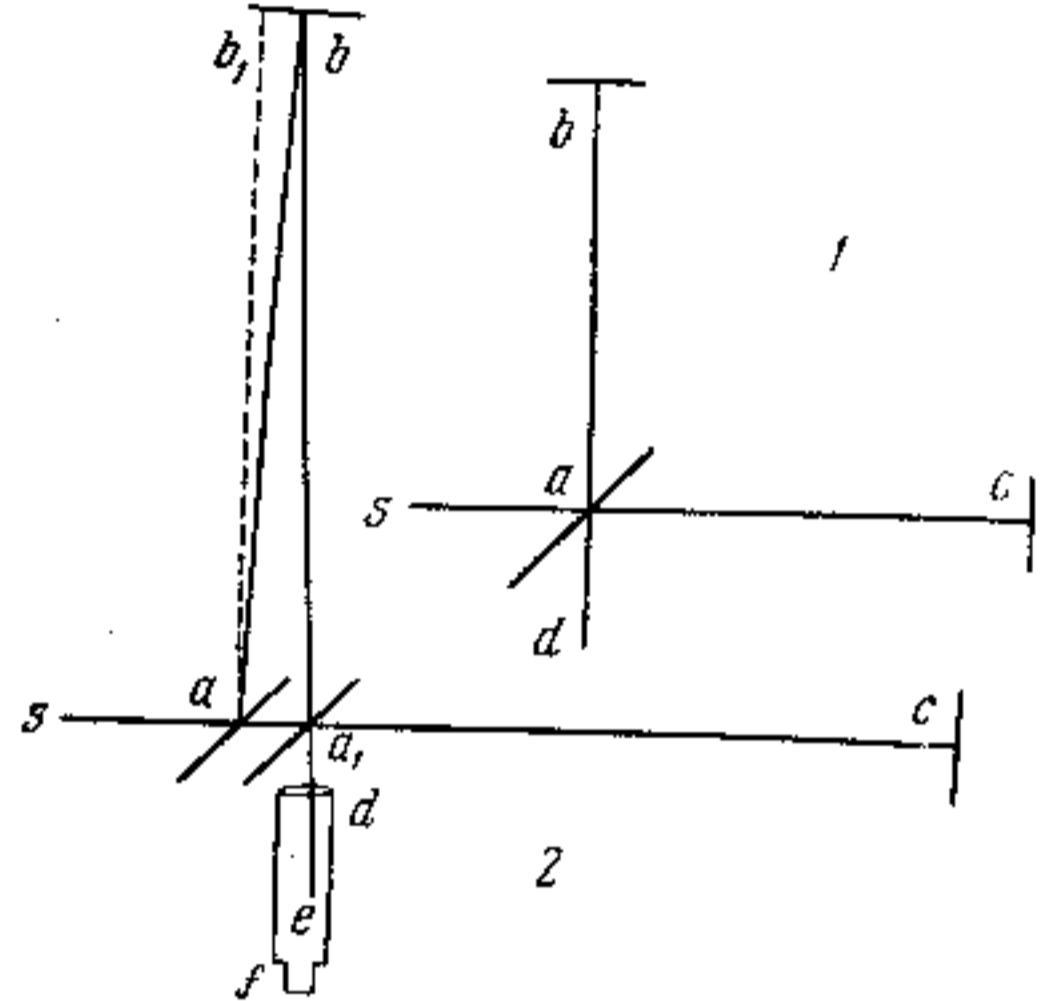
«Может оказаться, что в действительности не существует покоящегося тела, к которому можно было бы отнести места и движения прочих тел».

И. Ньютон

Вопрос о покое или движении эфира в данном месте, около земной поверхности, как следует из предшествующей главы, может быть решен только опытами, позволяющими заметить оптические или электромагнитные явления, зависящие от величины второго порядка относительно  $v/c$ . Очень многие оптические процессы теоретически должны протекать в отношении величины второго порядка различно в подвижном и неподвижном эфире, причем это различие принципиально доступно наблюдению. Для этой цели применимы интерференционные, дифракционные, поляризационные явления, отражение, преломление и пр. Первым осуществленным «опытом второго порядка» был интерференционный опыт Альберта Майкельсона, произведенный в начальном варианте в 1881 г. в Берлине [16]. Опыт непрерывно повторяется и совершенствуется в течение почти 50 лет до последних дней; история его излагается здесь довольно подробно, ибо фактически на его основе и формулированы основные постулаты специальной теории относительности.

Идея опыта следующая. Пусть  $sa$  (фиг. 7,1) — луч света, частью отражающийся к  $b$ , частью проходящий к  $c$ . Зеркала  $b$  и  $c$  отражают лучи обратно. Возвращающийся луч  $ba$  проходит через полупрозрачную пластинку по направлению  $ad$ ; по тому же направлению отражается от той же пластиинки возвращающийся луч  $ca$ . Оба луча, которые идут теперь вдоль  $ad$ , возникли из одного луча  $sa$ , поэтому когерентны и могут интерферировать. Если прибор вместе с Землею движется по направлению  $sc$  в эфире, то направления и расстояния, пробегаемые лучами, изменяются. Луч  $sa$  отразится вдоль  $ab$  (фиг. 7,2), причем угол  $b_1ab$  будет равен  $v/c$ ; возвращающийся луч пойдет вдоль  $ba_1$  (угол  $aba_1 = 2v/c$ ) в фокус телескопа. Луч  $ac$  вернется по прежнему направлению, но, отразившись от движущегося, в эфире зеркала в  $a_1$ , пойдет по  $a_1e$

(угол  $\angle a_1 e = \frac{\pi}{2} - \frac{v}{c}$ ), совпадая с первым лучом. Найдем разность оптических путей  $aba_1$  и  $aca_1$ , если длина плеч интерферометра точно одна и та же и равна  $D$ . Время  $t_1$ , нужное для прохождения от  $a$  к  $c$ , равно  $\frac{D}{c-v}$ ; время  $t_2$ , затрачиваемое на пути от  $c$  к  $a$ , равно  $\frac{D}{c+v}$ . Общее время, требующееся для прохождения света туда и обратно,  $t_1 + t_2 = 2D \frac{c}{c^2 - v^2}$ , с точностью до величин четвертого порядка; длина, пробегаемая за это время:  $2D \frac{c^2}{c^2 - v^2} = 2D \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)$ . Длина другого пути, как легко видеть, равна



Фиг. 7. Схема опыта Майкельсона

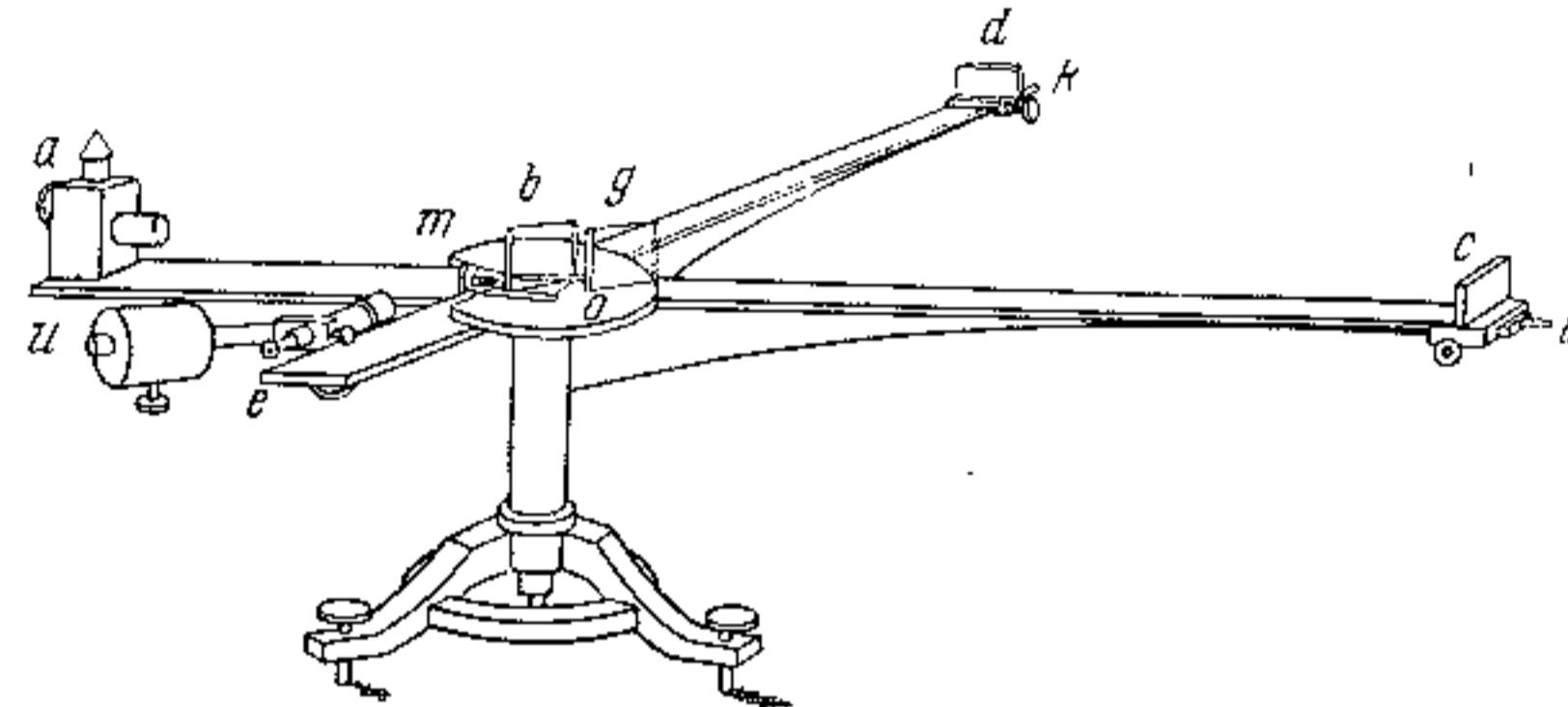
$2D \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}$ , или, с той же точностью,  $2D \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right)$ . Разность путей, существующая вследствие движения в эфире, будет  $D \frac{v^2}{c^3}$ . Если весь прибор повернуть на  $90^\circ$ , то разница будет с обратным знаком, следовательно, смещение интерференционных полос при таком повороте должно соответствовать разности хода  $2D \frac{v^2}{c^2}$ .

В действительности теория опыта Майкельсона (особенно в его позднейших формах) в предположении неувяляемого эфира не так проста. Законы отражения и преломления от движущихся зеркал и пластинок и конечность применяемых пучков света значительно усложняют точный расчет интерференционной картины, которая должна наблюдаться. Неоднократно до последнего времени высказывались сомнения в правильности теории. Эти сомнения, однако, всегда на поверку оказывались ошибочными, и точный расчет опыта приводит практически к такому же результату, как и элементарная теория [17].

Первый интерферометр, с которым Майкельсон работал в Берлине и Потсдаме, изображен в перспективе на фиг. 8. Полупрозрачная, слегка посеребренная стеклянная пластина  $b$  отражает половину света, падающего из фонаря  $a$  к зеркалу  $d$ , а половину пропускает к зеркалу  $c$ . Возвращающиеся лучи встречаются в телескопе  $e$ . Пластина  $g$  выре-

<sup>1</sup> В первом сообщении Майкельсон дал неправильный расчет, не обратив внимания на aberrационный эффект у зеркала  $b$ , вследствие чего ожидалось вдвое большее смещение полос. Ошибка была исправлена в работе 1887 г.

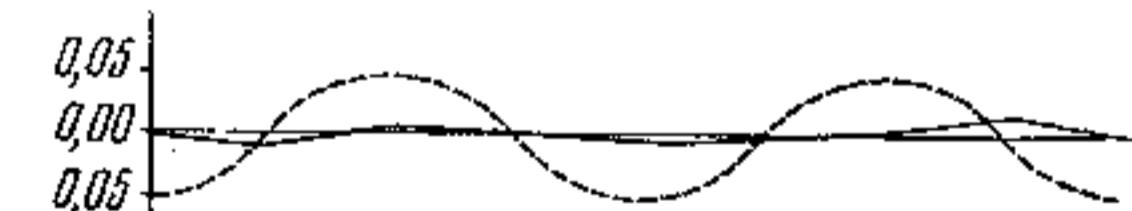
зана из того же куска стекла, что и  $b$ , назначение ее — компенсировать оптическую разность хода, создаваемую стеклом  $b$ , через которое дважды должен проходить луч  $bd$ . Длина плеч  $D = 120$  см, в ней укладываются 2 000 000 волн желтой линии циантра;  $v^2/c^2$  — величина порядка  $10^{-8}$ , поэтому  $2D \frac{v^2}{c^2}$ , выраженное в расстояниях между центрами интерференционных полос, будет  $2 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} = 0,04$ . Предстояло, следовательно,



Фиг. 8. Первый интерферометр Майкельсона

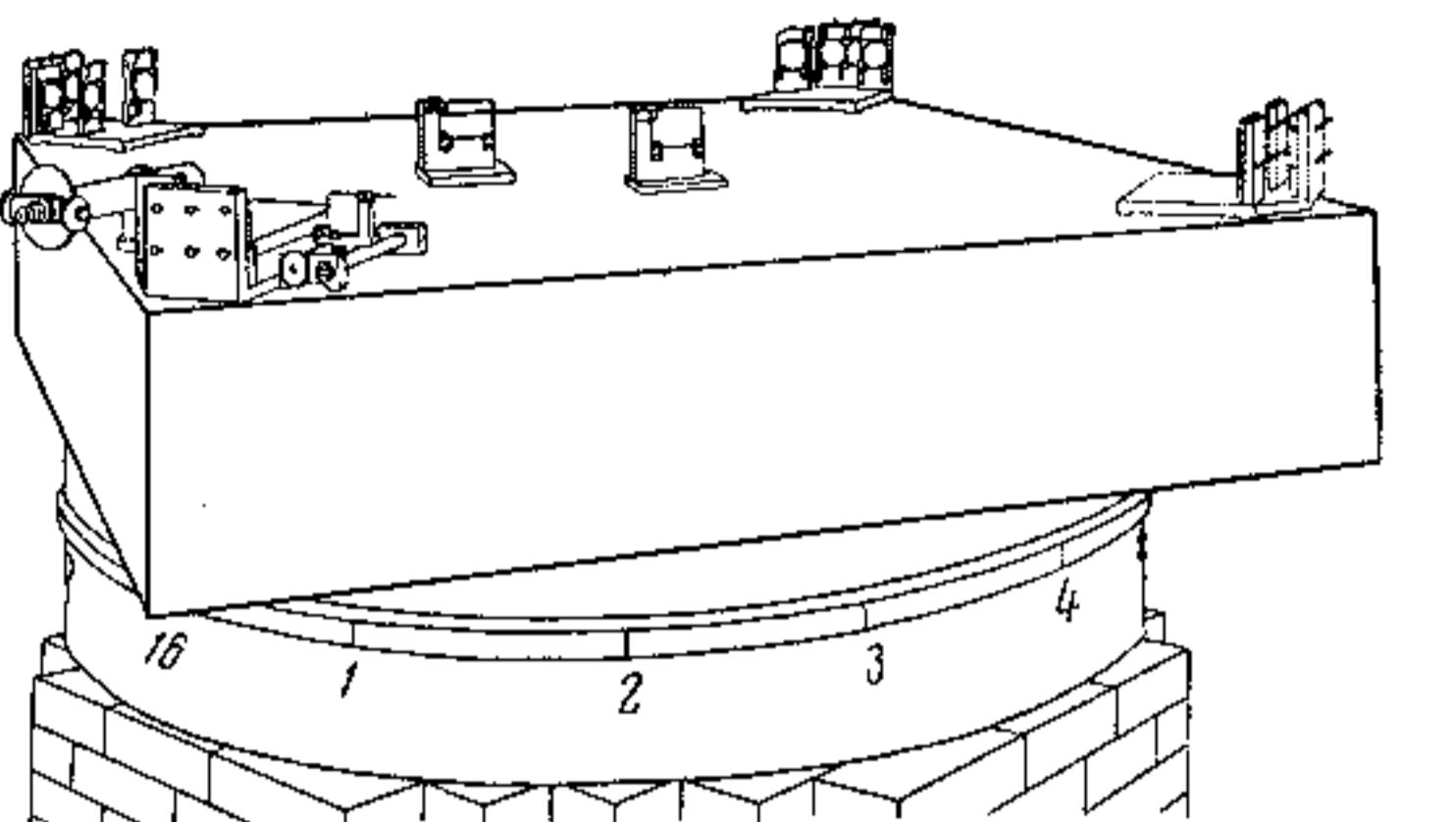
заметить при повороте интерферометра на  $90^\circ$  смещение полос на 0,04 ширины полосы. Расстояние между двумя соседними полосами занимало 3 деления шкалы, видимой глазом в телескоп. Положение центра темной полосы оценивалось до  $1/4$  деления шкалы, так что отдельное наблюдение производилось с точностью до  $1/12$  полосы.

Получить определенные результаты с таким интерферометром, весьма несовершенно установленным, почти нечувствительным к ожидаемому эффекту и в то же время резко отзывающимся на ничтожные механические толчки и температурные колебания, было почти безнадежно, во всяком случае требовалось большое число наблюдений при различных азимутах прибора. Наиболее точные измерения производились в апреле в подвале потсдамской астрофизической обсерватории. Статистически обработанные результаты представлены графически на фиг. 9, взятой из статьи Майкельсона. По оси абсцисс отложены азимуты, соответствующие полной окружности, по оси ординат — смещения полос, выраженные в сотых долях ширины полосы. Пунктирной линией представлена теоретическая кривая, ординаты которой вдвое увеличены, соответственно ошибке в расчете, сделанной в первом сообщении (см. примеч. на стр. 28); сплошной линией соединены средние наблюденные значения. Если



Фиг. 9. Результаты первого опыта Майкельсона

принять во внимание, что теоретические отклонения изображены в масштабе вдвое увеличенном, то станет ясным, что результаты довольно

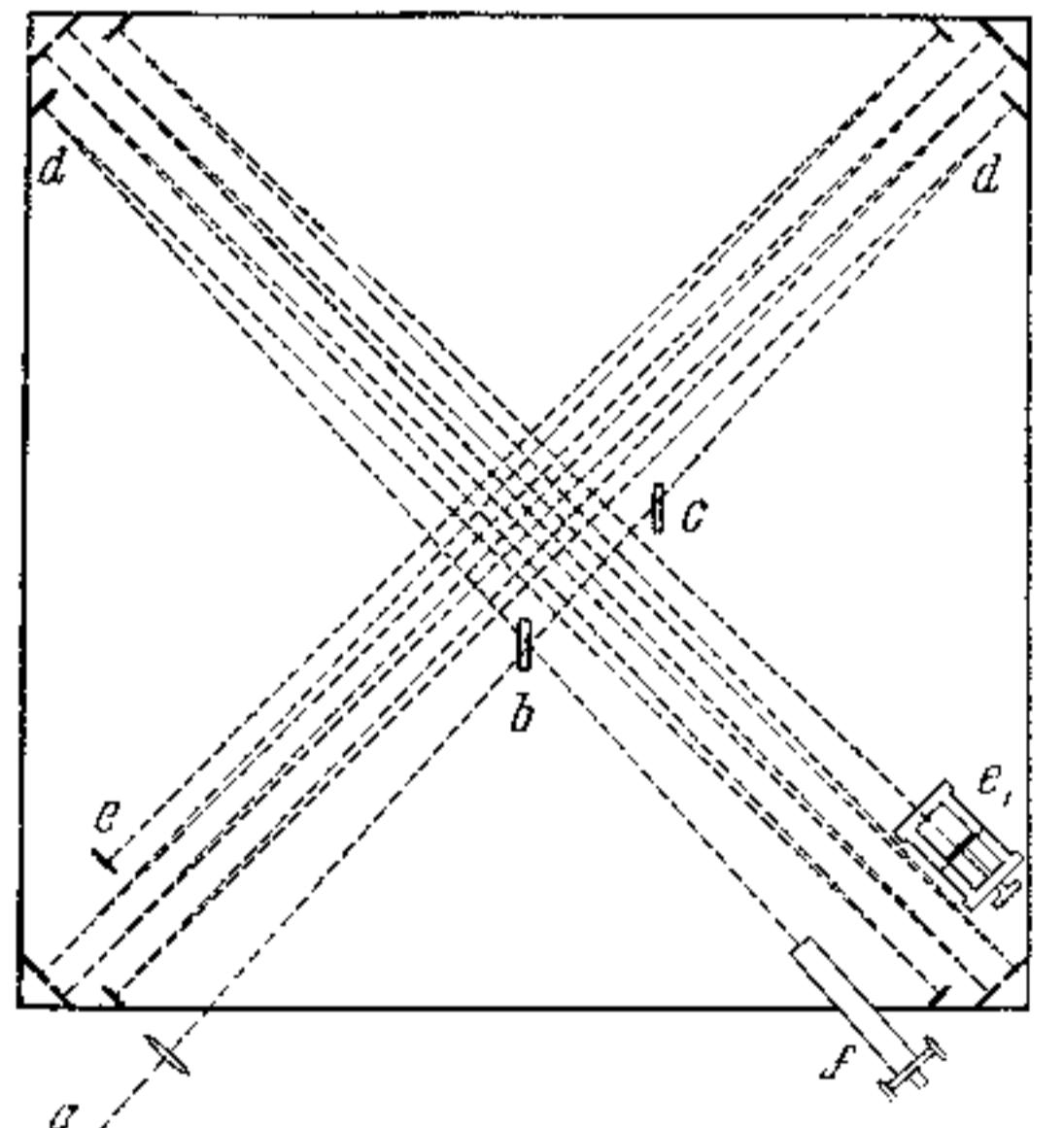


Фиг. 10. Интерферометр Майкельсона — Морлея

неопределенны. Правда, измеренные смещения не совпадают по фазе с теоретическими, но колебания этих смещений только немного меньше теоретических, т. е. ошибки наблюдений слишком велики.

Но уже на основании этого опыта [Майкельсон заключил об отсутствии смещения полос, помимо случайных смещений. «Поэтому,—говорит он,— гипотеза недвижного эфира оказывается неверной». Конечно, в то время этот вывод был скорее догадкой, чем экспериментально доказанным фактом<sup>1</sup>.

В 1887 г. Майкельсон совместно с Морлеем опубликовал результаты новых опытов [18]. Новый интерферометр изображен на фиг. 10. Оптическая установка сделана на каменной плите с квадратным основанием (сторона 1,5 м), толщина плиты

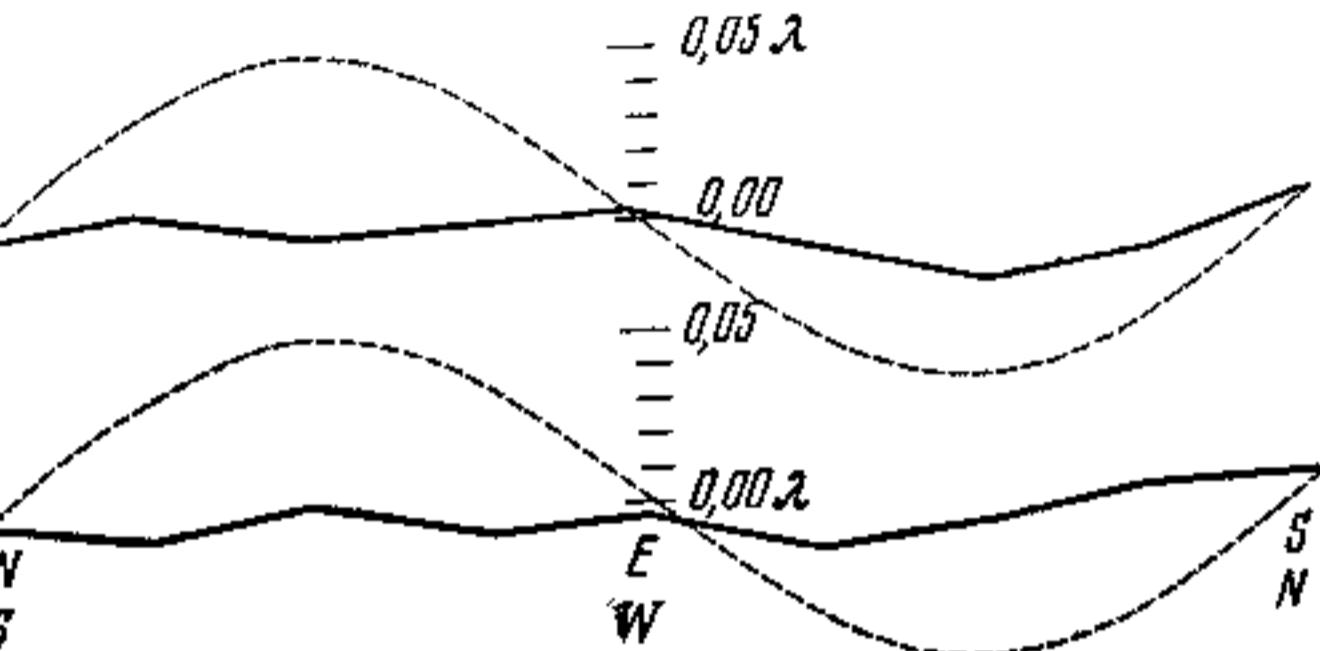


Фиг. 11. Ход лучей в интерферометре Майкельсона — Морлея

30 см. Плита опирается на деревянное толстое кольцо, погруженное в

<sup>1</sup> Максимальное наблюдавшееся смещение у Майкельсона не превосходило 0,015 полосы, что равносильно скорости  $v < 18$  км/сек.

кольцеобразный железный сосуд со ртутью. Этот сосуд с отмеченными азимутами виден на рисунке, он поставлен на прочном каменном основании. Интерферометр плавает в ртути и поэтому поворачивается очень легко, без заметных толчков. На каждом углу квадратного основания помещено по 4 круглых зеркала, почти посередине находится плоско-параллельная стеклянная пластина. Ход лучей в интерферометре ясен из фиг. 11. Общая длина оптического пути каждого из интерферирующих лучей была около 11 м, т. е. приблизительно в 10 раз больше, чем в первом интерферометре. В этой длине



Фиг. 12. Результаты опытов Майкельсона — Морлея

укладывается  $2 \cdot 10^7$  длин волн желтой линии натрия, и, следовательно, ожидаемый эффект смещения  $2D \frac{v^2}{c^2}$  эквивалентен 0,4 интерференционной полосы. Наблюдения производились следующим образом. Небольшим толчком аппарат приводился в медленное вращательное движение (один оборот в 6 минут). Во время вращения нить окулярного микрометра устанавливалась на наиболее отчетливую интерференционную полосу в тот момент, когда связанный с интерферометром труба проходила около одного из делений, нанесенных на сосуде со ртутью. Ширина одной полосы соответствовала приблизительно 50 делениям головки микрометрического винта, так что 1 деление эквивалентно 0,02 полосы, следовательно, отсчеты делались с точностью до 0,01 полосы. Такая же установка окулярного микрометра производилась при каждом азимуте. Обработанные<sup>1</sup> результаты представлены графически на фиг. 12.

<sup>1</sup> Способ обработки таков, что всякие непериодические смещения исключаются. Между тем эти непериодические смещения были значительны. Ввиду тех возражений, которые сделаны в последнее время Миллером по поводу такого рода обработки, приводим таблицу для полученных наблюдений из работы Майкельсона—Морлея (см. табл. 1 на стр. 32—33). Числа в первых трех строках указывают деления на головке винта окулярного микрометра. Приблизительно 50 таких делений соответствуют смещению на целую полосу. При повороте прибора на полную окружность, разделенную на 16 частей, полосы систематически смещаются почти на 0,5 полосы, как видно из таблицы. В четвертой строке взято арифметическое среднее всех отсчетов, в пятой строке эти цифры перечислены на ширину полос. Вторая половина

По оси абсцисс нацесены азимуты, по ординатам — смещения в сотых долях полосы. Верхняя кривая соответствует полуденным, нижняя ночных наблюдениям. Пунктирная кривая теоретическая, причем ее ординаты уменьшены в 8 раз; сплошная линия соединяет измеренные средние смещения. Из чертежа видно, что наблюдавшиеся смещения, если они не случайны, не превосходят 0,01 ширины полосы. Теоретически отклонение должно достигать 0,4 полосы, если учитывать только движение Земли вокруг Солнца.

Пятая строки далее снова повторяется и подписана под первой половиной (в предположении, что периодические смещения правильно повторяются во второй половине окружности). В последней строке взято среднее из предыдущих двух строк. В этой

Таблица 1

## Полуденные наблюдения

Азимут	16	1	2	3	4	5	6	7
Июль	44,7	44,0	43,5	39,7	35,2	34,7	34,3	32,5
	57,4	57,3	58,2	59,2	58,7	60,2	60,8	62,0
	27,3	23,5	22,0	19,3	19,2	19,3	18,7	18,8
Среднее . . . . .	43,1	41,6	41,2	39,4	37,7	38,1	37,9	37,5
Средн. в длине волн . . . .	0,862	0,832	0,824	0,788	0,754	0,762	0,758	0,766
	0,706	0,692	0,686	0,688	0,688	0,678	0,672	0,688
Оконч. среднее . . . . .	0,784	0,762	0,755	0,738	0,721	0,720	0,715	0,692

Азимут	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Июль	28,2	26,2	23,8	23,2	20,3	18,7	17,5	16,8	13,7
	61,5	69,3	65,8	67,2	69,7	70,7	73,0	70,2	72,2
	16,2	14,3	13,3	12,8	13,3	12,3	10,2	7,3	6,5
Среднее . . . . .	35,3	34,6	34,3	34,4	34,4	28,9	33,6	31,4	30,8
Средн. в длине волн . . . .	0,706	0,692	0,686	0,688	0,688	0,678	0,672	0,628	0,616
Оконч. среднее . . . . .	0,661								

строке вполне ясно систематическое смещение, достигающее около 0,1 полосы за половину окружности. Далее, через точки, соответствующие цифрам последней строки, проводилась наиболее вероятная прямая. Отклонения от этой прямой считаются за наблюденные смещения — они напечатаны на верхней фиг. 12. Систематический ход в открытом интерферометре за время одного оборота может вызываться различными причинами: изменениями атмосферного давления, температурными колебаниями и пр. Во всяком случае указанная обработка с таким интерферометром неизбежна. Воспользовавшись вместо окончательного среднего первым средним

таким образом, наблюдавшееся смещение, несомненно, меньше  $\frac{1}{20}$  теоретического и, вероятно, меньше  $\frac{1}{40}$ . В теории неувлекаемого эфира смещение должно быть пропорциональным квадрату скорости; поэтому приведенные результаты, с этой точки зрения, равносильны тому, что относительная скорость Земли в эфире, вероятно, меньше  $\frac{1}{6}$  орбитальной скорости Земли и, несомненно, меньше  $\frac{1}{4}$ . «Из всего сказанного, — заключают свою статью Майкельсон и Морлей, — явствует, что безнадежно пытаются решать вопрос о движении солнечной системы по наблюдениям оптических явлений на поверхности Земли. Но не исключена возможность, что даже на умеренной высоте над уровнем моря, на вершине какой-нибудь уединенной горы, например, относительное движение может быть замеченным при помощи аппарата вроде описанного в наших опытах».

Опыт Майкельсона и Морлея был произведен в Кливленде в США, в помещении школы прикладных знаний, 8, 9 и 11 июля 1887 г. Насколько велико было значение нулевого результата этого опыта для стройной системы теоретической физики конца XIX в., можно судить уже по тому, что до наших дней не прекращаются повторения опыта в надежде обнаружить какой-либо положительный эффект.

В 1905 г. Морлей и Д. Миллер [19] в том же Кливленде построили новый, еще более чувствительный интерферометр и повторили опыт Майкельсона. Прямым поводом опыта было предположение, высказанное Фитц-Джеральдом и Лорентцом, на основании которого можно было бы объяснить нулевой результат опыта, сохраняя в то же время гипотезу неувлекаемого эфира. Предположение заключалось в том, что

и проведя наиболее вероятную прямую через точки, мы получили такие цифры (см. табл. 2).

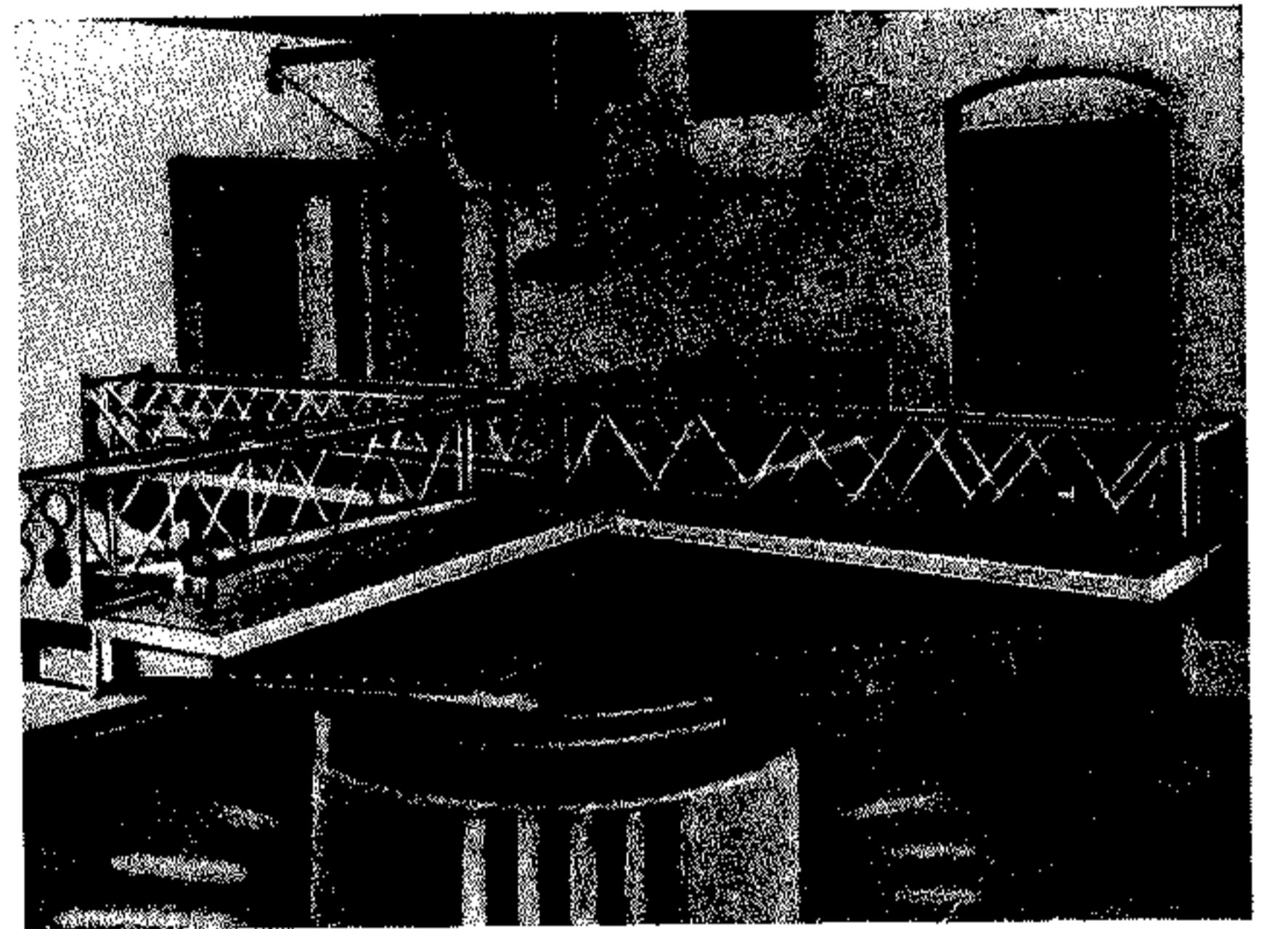
Таблица 2

Азимут	16	1	2	3	4	5	6	7
Смещения . . . . .	+0,02	+0,006	+0,01	-0,01	-0,03	-0,005	0,000	+0,015

Азимут	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Смещения . . . . .	0,02	-0,02	-0,015	0,000	+0,015	+0,020	+0,0300	0,000	0,000

Максимальное смещение в этом случае составляет около 0,05 полосы, т. е. почти в 10 раз меньше теоретического.

линейные размеры интерферометра при движении в эфире несколько сокращаются в направлении движения,— достаточно сокращения на  $10^{-8}$  от первоначальной длины, чтобы объяснить нулевой результат Майкельсона. Лорентц дал стройную математическую интерпретацию этой гипотезы, сведя ее к некоторым предположениям о свойствах электрона и



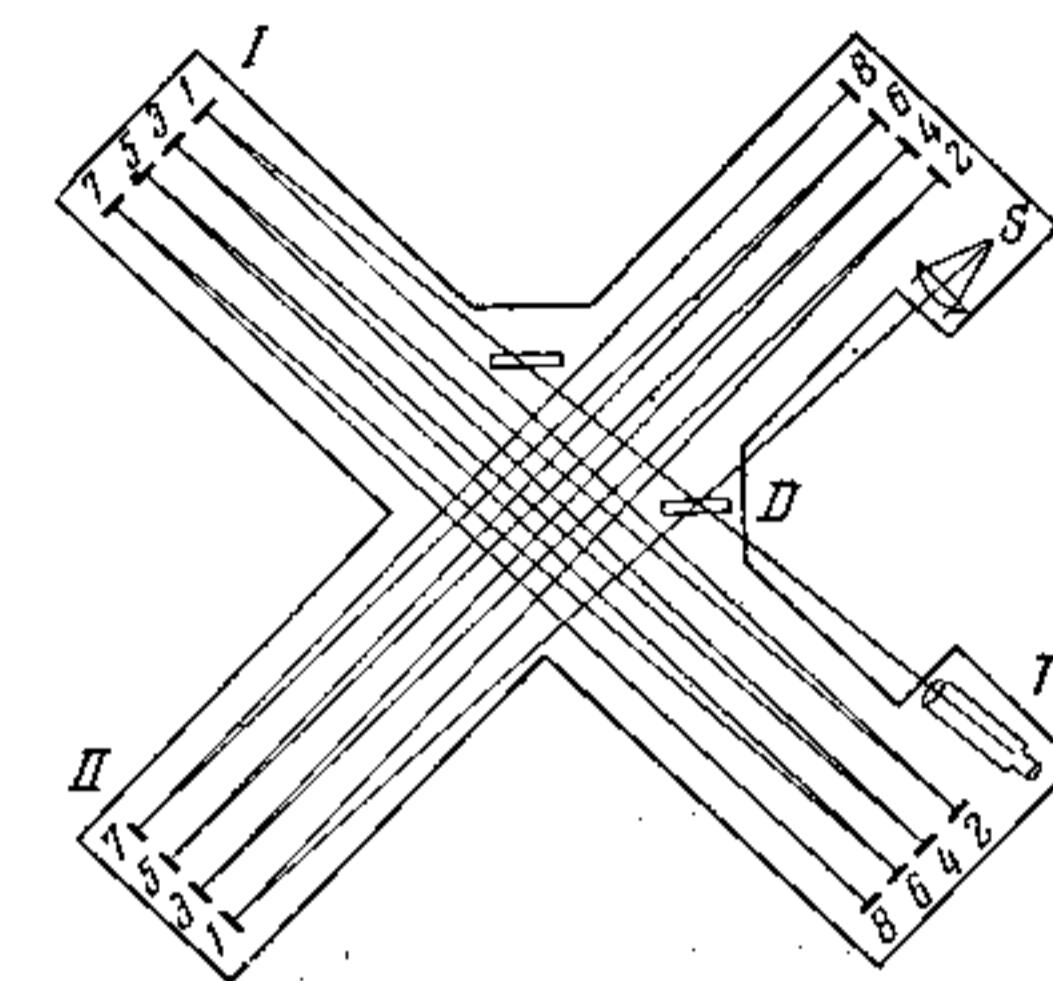
Фиг. 13. Интерферометр Морлея — Миллера

о природе сил между частицами вещества [20]. Уравнения Лоренца содержат в себе запрет возможности наблюдения оптических и электромагнитных явлений второго и высших порядков. Наряду с невозможностью наблюдения явлений первого порядка этот вывод составляет утверждение о носительности оптических и электромагнитных процессов при равномерном прямолинейном движении<sup>1</sup>. Теория Лоренца дала готовый математический остов теории относительности Эйнштейна.

В первое время гипотетическое сжатие, указанное Фитц-Джеральдом и Лорентцом, понималось как некоторое специфическое свойство вещества,

<sup>1</sup> Собственно говоря, теория Лоренца не утверждает относительности оптических и электромагнитных процессов при равномерном прямолинейном движении, но указывает ряд компенсирующих процессов («частичное» увлечение, сжатие вдоль направления движения), благодаря которым влияние движения ускользает от наблюдения.— Ред.

которое, может быть, зависит от его химической природы<sup>1</sup>. В связи с этим Морлей и Миллер заменили каменное (песчаник) основание интерферометра Майкельсона сначала деревянным (сосна), затем стальным. Общий вид крестообразного стального интерферометра Морлея — Миллера изображен на фиг. 13, ход лучей представлен на фиг. 14. Как и в предыдущем опыте, интерферометр плавает в ртути. Длина оптического пути каждого из интерферирующих лучей в стальном интерферометре была 3224 см, т. е. втрое больше, чем в приборе Майкельсона — Морлея. Ожидаемое максимальное смещение полос должно было достигать 1,5 полосы. Опыты с деревянным и стальным интерферометром дали нулевой результат. Наиболее тщательные наблюдения были сделаны со стальной установкой. Всего было сделано 260 наблюдений при 16 азимутах (по всей окружности) каждое. В табл. 3 даны обработанные<sup>2</sup> результаты для 8 азимутов (половинка окружности).



Фиг. 14. Ход лучей в интерферометре Морлея — Миллера

Таблица 3

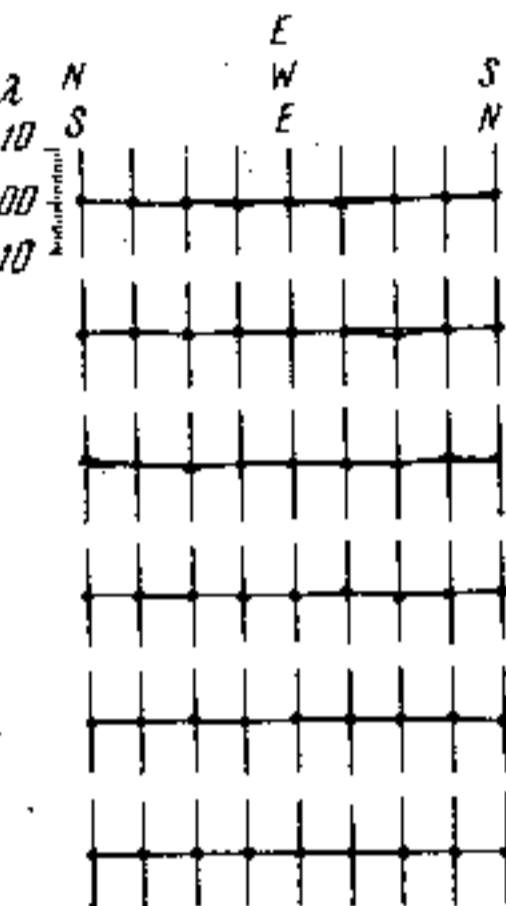
Азимуты	8	7	6	5	4	3	2	1
Смещения (в долях ширины полосы)	+0,0075	+0,0088	+0,0113	-0,0102	-0,0123	+0,0027	-0,0021	-0,0062

Таким образом, если и существует какой-либо положительный эффект, он не превосходит сотой доли ожидаемого, следовательно,

<sup>1</sup> Неспецифичность этого «сжатия», независимость его от каких-либо физико-химических причин, кроме кинематических, очень похожа на безразличие силы тяготения ко всем возможным свойствам в материи, кроме ее массы. Эта аналогия не внешняя, а органическая, как стало ясным после возникновения общей теории относительности. Роль опыта Майкельсона в этом смысле в частной теории относительности такая же, как роль опытов Галилея и Эйтвэза в общей теории относительности.

<sup>2</sup> При обработке комбинированы результаты, полученные для двух заранее вычисленных (в предположении периодического смещения) времен суток.

относительная скорость Земли и эфира не может превосходить 3,5 км/сек. Сообщение Морлея и Миллера заканчивалось следующими словами: «Некоторые думают, что приведенный опыт доказывает лишь увлечение эфира в подвальном помещении. Мы хотим поэтому поместить прибор на холме, закрыв его только прозрачными покрышками». В 1905/1906 г. Морлей и Миллер действительно перенесли прибор на открытое место на небольшую высоту, около 90 м над уровнем моря, причем, по словам Миллера, был обнаружен определенный положительный эффект — около  $\frac{1}{10}$  ожидаемого. Морлей затем передал интерферометр Миллеру, который начиная с 1921 г. произвел множество измерений с прибором, результаты которых полностью опубликованы в 1925 и 1926 гг. Эти результаты настолько неожиданы, странны и частью противоречивы, что нам придется иногда прибегать к цитированию собственных слов Миллера.



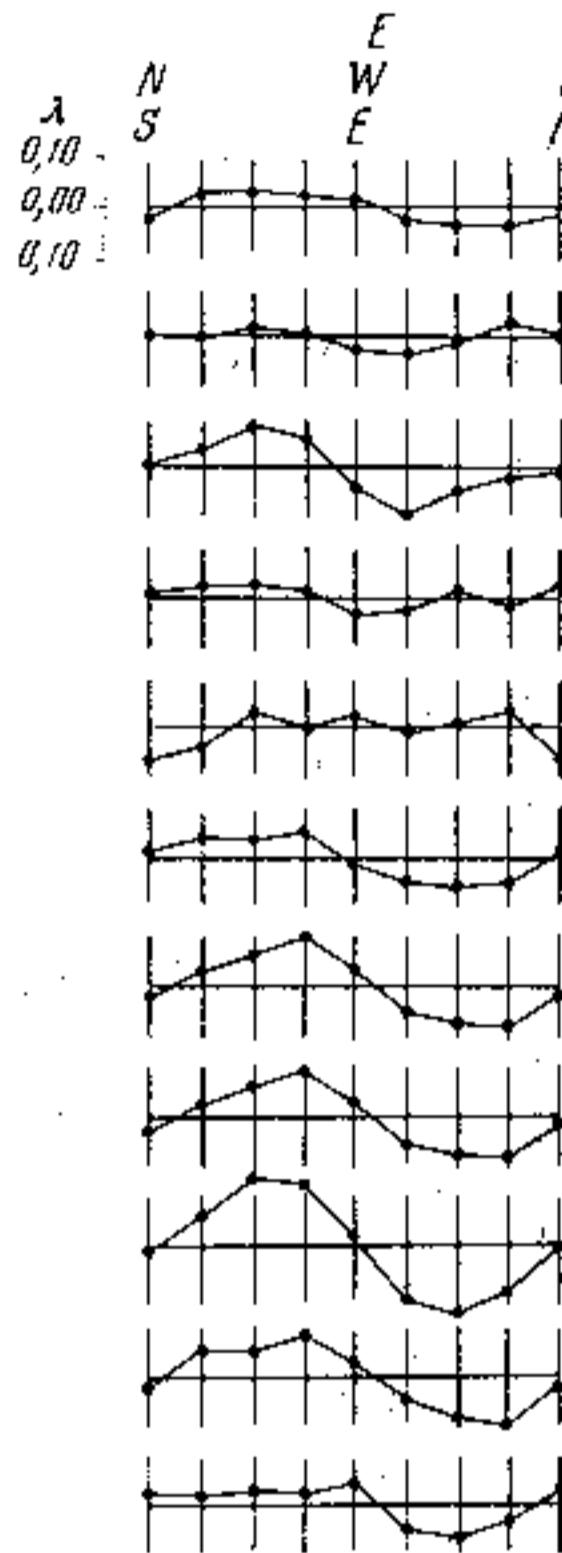
Фиг. 15. Опыты в Кливленде

смещение интерференционных полос, такое, какое было бы вызвано относительным движением Земли и эфира на Маунт Вильсон со скоростью примерно 10 км/сек, т. е. около одной трети орбитальной скорости Земли. При сравнении этого результата с прежними наблюдениями в Кливленде напрашивается мысль о частичном увлечении эфира, которое уменьшается с высотой. Думается, что пересмотр кливленских наблюдений с этой точки зрения должен показать, что они находятся в согласии с подобными предположениями, и привести к заключению, что опыт Майкельсона — Морлея не должен давать нулевого результата в точном смысле слова и, по всей вероятности, никогда такого результата не давал». Результаты первой серии (1925 г.) опытов Миллера поясняются следующими графиками (фиг. 15 и 16). На фиг. 15 представлены наблюдения в Кливленде; по оси абсцисс отложены азимуты интерферометра, по ординатам — смещения интерференционных полос в сотых долях ширины полосы. Как видно из рисунка, отклонений, превышающих 0,01 полосы, в согласии с прежними наблюдениями, не замечено. Наоборот, на высоте Маунт Вильсон полосы смещались иногда на очень заметную величину (около

0,2). В сообщении 1925 г. Миллер истолковал свои результаты как влияние частичного отставания эфира на высоте при движении Земли вокруг Солнца плюс движение всей солнечной системы к апексу.

В начале 1926 г. [22] Миллер опубликовал результаты новой большой серии наблюдений на Маунт Вильсон. В этой работе дается совсем иная интерпретация прежних наблюдений 1925 г. Прежде всего под сомнение ставится зависимость эффекта от высоты, столь ясно иллюстрированная раньше фиг. 15 и 16. Теперь Миллер пишет: «Новые данные показывают, что эфирный ветер на Маунт Вильсон не отличается значительно по величине от ветра в Кливленде и что на уровне моря он будет, вероятно, иметь примерно ту же величину». Объяснения резкого различия диаграмм на фиг. 15 и 16 Миллер не дает. Далее, оказывается, что годичное движение Земли вокруг Солнца в наблюдениях не обнаруживается в согласии со старыми опытами. Вместо этого наблюдался новый неожиданный эффект.

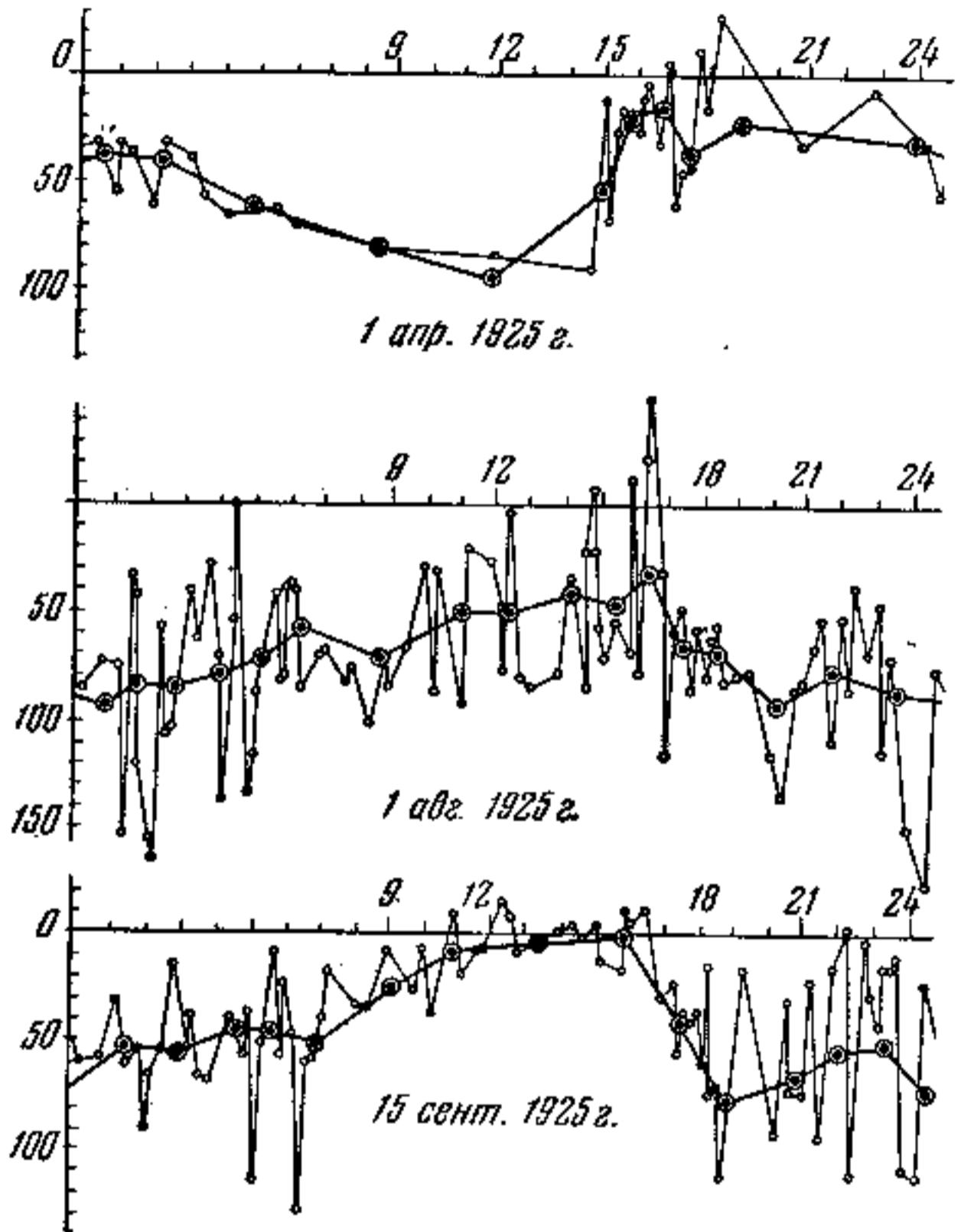
Обстановку и процедуру наблюдений Миллер описывает так: «Наблюдения должны производиться в темноте, в дневное время помещение с интерферометром затемняется экранами из черной бумаги. Наблюдения должны выполняться при температуре в точности такой же, как наружная. Наблюдателю приходится ходить по кругу диаметром около 3 м, направляя глаз на движущийся окуляр телескопа, соединенного с интерферометром, который плавает в ртути и постоянно вращается вокруг своей оси, делая приблизительно один оборот в минуту. Наблюдатель никоим образом не должен терять из виду интерференционных полос, видимых через маленькие отверстия окуляра. Наблюдатель делает 16 отсчетов полос за 1 оборот в моменты, отмечаемые электрическим звонком. Эта процедура должна непрерывно продолжаться в ряде наблюдений, для которых обычновенно 15—20 минут. Наблюдения затем повторяются одно за другим в течение нескольких часов во время рабочего периода<sup>1</sup>. В 1925 г. было сделано три серии наблюдений — в апреле, августе и сентябре. Общее число использованных оборотов интерферометра 4400, число отдельных отсчетов превышает 100 000.



Фиг. 16. Опыты на Маунт Вильсон

<sup>1</sup> Та же обстановка опытов, почти теми же словами, описана и в работе Морлея — Миллера 1905 г.

Во всех наблюдениях, по Миллеру, происходило вполне заметное смещение полос при вращении интерферометра. К сожалению, Миллер не дает ни одной кривой, показывающей, как изменяется для данной эпохи и времени дня смещение в зависимости от азимута. Вместо этого все наблюдения, сделанные за данную эпоху (например, в апреле), обрабатываются следующим образом. Находятся максимальные смещения, соответствующие каждому часу, и из всей серии наблюдений одновременно отмечается азимут, при котором происходит максимальное смещение. Температурные и прочие влияния, если таковые имеются, могут влиять на абсолютную величину наблюдаемого смещения, но мало могут изменить направление максимального смещения.



Фиг. 17. Изменения азимута максимального смещения полос в различные часы

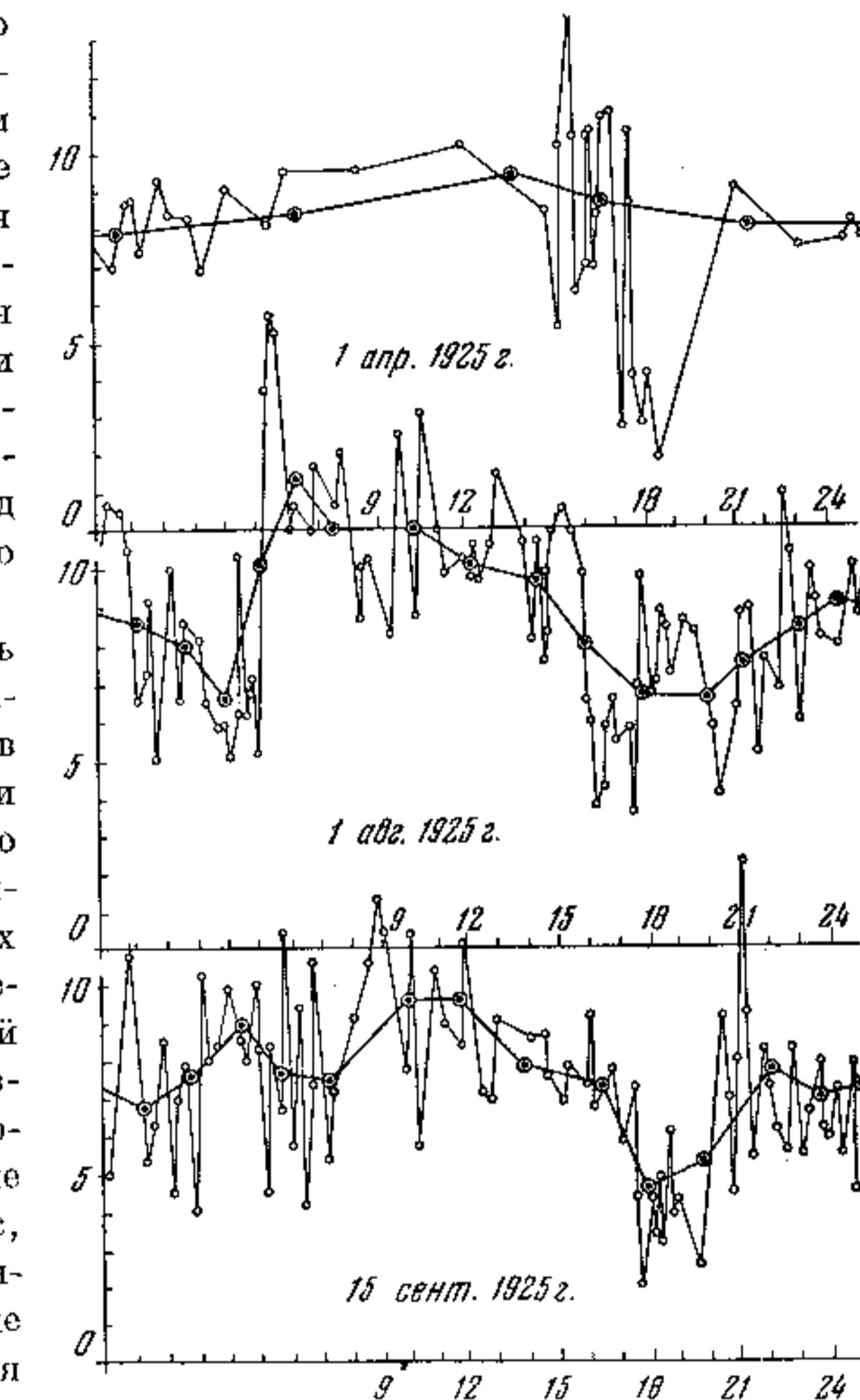
По оси абсцисс — местное время в часах, по оси ординат — азимут в градусах

Миллер называет среднее из 20 данных, полученных из 20 оборотов интерферометра в течение 15 минут. Жирная линия, соединяющая точки, обрамленные кружком, представляет изменение средней величины азимутов, полученной из всех отдельных измерений данной эпохи. Нуль оси ординат соответствует северу, выше оси откладываются восточные направления, ниже — западные. Из рисунка совершенно ясно, что эффект всегда, в любые часы и месяцы, наблюдается в северо-западном направлении. На фиг. 18 по оси абсцисс отложено местное время, ординаты представляют смещения полос, перечисленные на пред-

полагаемую скорость «эфирного ветра» в км/сек. Значение тонкой и жирной линий то же, что и на предыдущем чертеже. Максимальные смещения равносильны приблизительно 10 км/сек.

Результаты Миллера в отношении качественной стороны явления, систематического смещения полос в северо-западном направлении сами по себе вполне убедительны, но колебания отсчетов в «отдельных наблюдениях» (являющихся на самом деле средними из 20 наблюдений) настолько велики, что качественный ход явления едва ли можно считать установленным<sup>1</sup>.

Как же согласовать результаты опытов Миллера и прежних опытов Майкельсона — Морлея и Морлея — Миллера? По этому поводу Миллер пишет: «Во всех прежних наблюдениях был определенный положительный результат, обнаруживавшийся как непериодическое смещение интерференционных полос, но для двух предвычисленных времен дня (в которые производились измерения Морлея — Миллера) фазы положительных периодов различались таким образом, что при сложении двух рядов отсчетов они



Фиг. 18. Изменение величины максимального смещения в различные часы

По оси абсцисс — местное время в часах, по оси ординат — скорость «эфирного ветра» в км/сек

<sup>1</sup> Ошибки «отдельных» измерений Миллера иногда превышают величину наблюденного эффекта. Отсюда некоторые авторы заключают, что, может быть, весь эффект — результат ошибок наблюдения. Мы думаем, что огромное число наблюдений в достаточной степени исключает эту возможность. Судя по опубликованным данным, «эффект» может быть объяснен только систематически действующей причиной (может быть, и систематической ошибкой наблюдения).

нейтрализовали друг друга; остаточный очень малый эффект и относился совершенно правильно к орбитальной компоненте существующего эфирного ветра. Вот этот положительный эффект, исключавшийся тогда, теперь исследуется». Миллер предполагал опубликовать в подтверждение этого анализ журналов прежних опытов, однако пока (через 2 года) этот анализ еще не появился. Следует заметить также, что в опытах Майкельсона — Морлея полуденные иочные данные приведены отдельно (ср. фиг. 12), между тем эффекта, аналогичного миллеровскому, не заметно.

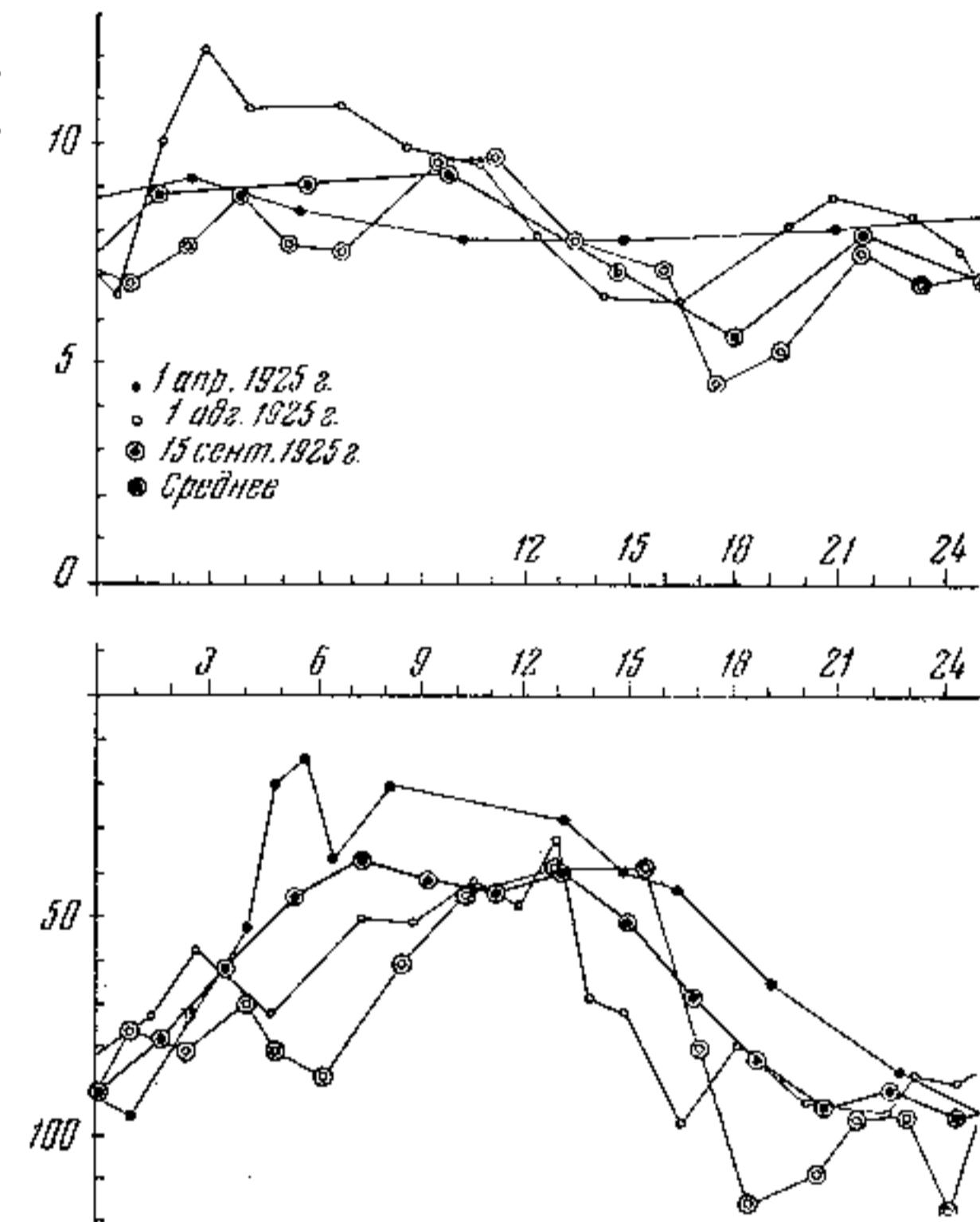
По словам Миллера, в его опытах были приняты все меры предосторожности: «Каждая возмущающая причина, которую можно было заподозрить, была исчерпывающе изучена. Между прочими обстоятельствами изучались суточные и годичные вариации температуры, метеорологические условия, лучистая теплота, магнетизм, магнетострикция, гравитационные аномалии, гидростатическое действие, влияние методов освещения, влияние прозрачных или темных покрышек оптического пути, скорость и направление вращения, недостатки равновесия во вращающихся частях, положение наблюдателя и другие условия. Оказалось, что ни одно из этих обстоятельств не производило наблюдавшихся эффектов».

Эффект Миллера совсем на похож на то, чего можно было ожидать, если бы обнаруживалось годичное движение Земли вокруг Солнца. В этом случае кривая изменения азимута максимального смещения в различные часы дня должна быть правильно периодической, колеблющейся одинаково как к северо-западу, так и к северо-востоку; величина же максимального эффекта должна быть постоянной (для данной эпохи). Миллер находит, что наблюдавшееся явление может быть объяснено, если предположить, что солнечная система движется к некоторой точке в созвездии Дракона (прямое восхождение  $262^\circ$  и склонение  $+65^\circ$ ) почти перпендикулярно плоскости эклиптики. Интерферометр отмечает смещение полос, эквивалентное примерно 10 км/сек, но, с другой стороны, не обнаруживается движение Земли в 30 км/сек. Приходится предположить, что гипотетическое движение солнечной системы в целом превосходит 200 км/сек<sup>1</sup>, причем только приблизительно  $\frac{1}{20}$  часть этого движения оказывается на оптических явлениях в виде «эфирного ветра». В подтверждение своего толкования Миллер сравнивает средние кривые фиг. 17 и 18 с «теоретическими», т. е. вычисленными на основании указанной гипоте-

<sup>1</sup> Обширные определения апекса солнечной системы производил Р. Вильсон. Он нашел для прямого восхождения  $270,8^\circ$ , для склонения  $27,1^\circ$  и для скорости 19,0 км/сек. Недавно Нассау и Мора [23], по инициативе Миллера, методами гармонического анализа обработали кажущиеся движения 476 звезд и получили для прямого восхождения апекса  $272^\circ 00'$ , для склонения  $33^\circ 40'$  и для скорости 24,8 км/сек. По данным Миллера, обработанным указанными авторами, прямое восхождение гипотетического апекса движения Земли —  $252^\circ$ , склонение  $71^\circ$ , а скорость больше 200 км/сек. Несогласие получается полное, и если стать на точку зрения Миллера, придется говорить уже не об апексе солнечной системы, но об апексе всей нашей вселенной.

зы. Он получает хорошее совпадение в отношении форм кривых для азимута и величины эффекта. Но это совпадение сдвоено и имеет какое-либо значение, потому что теоретическую кривую для азимута, периодически колеблющуюся к востоку и западу, приходится совершение произвольно смещать очень сильно в северо-западном направлении, и никакого объяснения правомерности такого смещения не дается. Мы уже указывали выше, что колебания в «отдельных наблюдениях» Миллера настолько велики, что форму средних кривых нельзя считать точно установленной; поэтому совпадение «теоретических» кривых с наблюденными никак нельзя рассматривать как существенный аргумент. С другой стороны, резкое противоречие несомненно установленного качественного северо-западного эффекта с теорией окончательно обесценивает интерпретацию Миллера. Один из критиков Миллера, Тиринг [24] пишет по этому поводу следующее: «Если вообще эффект реален, он должен доказывать наличие северо-западного эфирного ветра, сопровождающего вращение Земли. Скорость этого ветра должна быть по меньшей мере равной 10 км/сек, в то время как скорость суточного движения на экваторе составляет только около 5% этой величины. Защитникам эфира будет трудно согласиться с вихревым движением эфира вокруг Земли со скоростью, превосходящей скорость суточного движения Земли приблизительно в 20 раз».

В качестве одного из доводов в пользу своей гипотезы Миллер указывает, что кривые фиг. 17 для азимутов, отнесенные к местному времени для трех эпох, довольно хорошо совпадают, если их отнести к звездному времени (фиг. 19, нижняя кривая; жирной линией соединены точки, соответствующие средним значениям, полученным из трех). Но совпаде-



Фиг. 19. Данные Миллера, отнесенные к звездному времени

По оси абсцисс — звездное время, по оси ординат: вверху — рассчитанная скорость «эфирного ветра» в км/сек, внизу — азимут в градусах

ние это едва ли можно признать удовлетворительным; кроме того, ход азимутальных кривых вообще противоречит всему толкованию Миллера. В верхнем графике фиг. 19 сопоставлены значения величин эффекта, отнесенные к звездному времени. На этот раз совпадение получается едва ли лучшее, чем при наложении кривых, отнесенных к гражданскому времени, как может убедиться читатель, накладывая кривые фиг. 17 друг на друга.

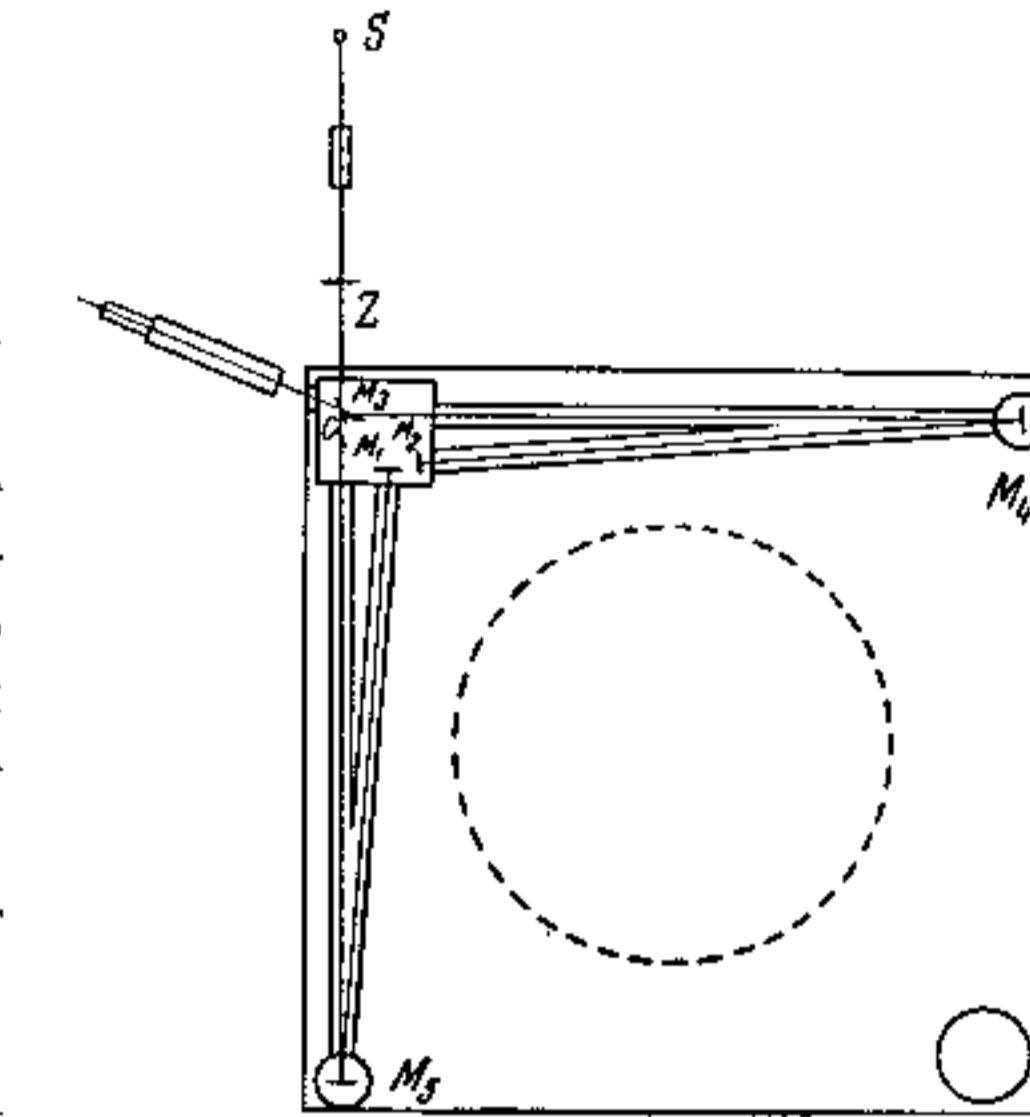
Таким образом, толкование Миллера не согласуется с его наблюдениями, которые остаются голым фактом, требующим объяснения. Независимость направления эффекта от времени суток указывает, что причину надо искать в местных влияниях; связать его с движением Земли, какого бы рода это движение ни было, нельзя, иначе пришлось бы усомниться в суточном вращении Земли. Вследствие этого вращения азимут максимального эффекта должен колебаться к востоку и к западу, чего на опыте нет. Поскольку эффект Миллера, на основании сказанного, совсем не связан с движением Земли, постольку он едва ли имеет какое-либо отношение к вопросу об увлечении эфира. Чем в действительности объясняется непериодическое смещение полос в опытах Майкельсона — Морлея (ср. примеч. на стр. 31) и систематическое северо-западное смещение у Миллера, сказать трудно,— на это может быть немало причин в таком чувствительном открытом приборе, каков описанный интерферометр; определенно ответить на вопрос может только сам экспериментатор<sup>1</sup>.

Опыты Миллера показали во всяком случае, что годичное движение Земли вокруг Солнца не обнаруживается по крайней мере до  $1/_{20}$  истинной величины, т. е. до  $1\frac{1}{2}$  км/сек. Вероятно, обработка огромного материала Миллера тем же приемом, как это делали Майкельсон и Морлей (ср. примеч. на стр. 31), позволит еще понизить этот предел; сам Миллер анализировал свой материал совсем иначе и с другой целью. Исследования Миллера ясно обнаружили гипертрофию интерферометра Морлея — Миллера. Этот прибор слишком чувствителен ко всяким ничтожным внешним причинам, и для получения точных результатов приходится производить тысячи отдельных измерений и «сглаживать» результаты.

В связи с опытами Миллера в Пасадене (около Маунт Вильсон, где работает Миллер), в лаборатории Милликена, опыт Майкельсона был повторен в 1926 г. Кеннеди [26]. В его приборе введено несколько очень важных изменений в сравнении с прежними интерферометрами. Большая чувствительность прибора Морлея — Миллера определяется длинным оптическим путем (65 м для обоих интерферирующих лучей). Ничтожное

неравномерное изменение температуры воздуха в тысячные доли градуса может сопровождаться изменением показателя преломления воздуха, способным при такой длине пути вызвать заметное смещение полос. Кеннеди избавляется от этого недостатка двумя приспособлениями. Длина светового пути обоих лучей у него только 8 м, т. е. меньше, чем в приборе Майкельсона — Морлея. Интерферометр Кеннеди помещен на мраморной квадратной доске со сторонами в 122 см и толщиною в 10,5 см. Расположение оптических частей и ход лучей видны из фиг. 20. Интерферометр плавает в резервуаре со ртутью, отмеченном на рисунке пунктирным кружком. Вся оптическая система закрывается воздушонепроницаемым металлическим ящиком, и пространство наполняется гелием при атмосферном давлении. Гелий выбран потому, что для него  $\mu = 1$  ( $\mu$  — показатель преломления) приблизительно в 10 раз меньше, чем для воздуха при том же давлении, и, следовательно, вариации плотности и температуры будут сказываться значительно меньше, чем в воздухе. При таких условиях всякие дрожания и неperiодические смещения полос прекращались, как только устанавливалась температура. Свет применялся монохроматический (зеленая линия маленькой ртутной лампы) и поляризованный. С поляризованным светом устраивались неинтерферирующие лучи, поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях; такие лучи в обыкновенном интерферометре дают общий светлый фон и ослабляют резкость полос. Кроме того, меняя отражательную способность зеркал, с поляризованным светом можно достичь равенства интенсивностей интерферирующих пучков, что снова способствует резкости полос; этому же помогает и монохроматичность света.

Замкнутый интерферометр в атмосфере гелия, конечно, много лучше защищен от внешних влияний, чем прибор Миллера, но чем компенсировано у Кеннеди понижение чувствительности в 8 раз, связанное с сокращением длины оптического пути? Для такой компенсации Кеннеди чрезвычайно повышает точность оценки смещения полос следующим осторожным приемом. Половина поверхности одного из зеркал  $M_2$  (фиг. 21) выступает на небольшую долю длины волны над другой половиной, что



Фиг. 20. Схема интерферометра Кеннеди

<sup>1</sup> Недавно появилось короткое, в несколько строк, сообщение [25], в котором говорится, что интерферометр Миллера снова перенесен в Кливленд. Результаты, полученные для одной эпохи, — того же порядка величины, что и на Маунт Вильсон, и в общем согласуются с прежними.

достигается соответствующим осаждением на ней платины (катодным распылением). При рассматривании в трубу интерферометра, при равной длине плеч, изображения зеркал  $M_1$  и  $M_2$  (фиг. 20) будут казаться совпадающими. Пусть существует некоторая разность оптических путей  $x$  (фиг. 21), на которую отходит изображение  $M_1$  от средней линии зеркала  $M_2$ , обе половины  $M_2$  удалены от средней линии на расстояние  $\pm \alpha$ . На зеркало слева направо падает волна:

$$\xi = a \cdot \cos \frac{2\pi c}{\lambda} \left( t + \epsilon - \frac{x}{c} \right).$$

Волна, отразившаяся от  $M_1$ , будет:

$$\xi_1 = a \cdot \cos \frac{2\pi c}{\lambda} (t + \epsilon).$$

Волна, отразившаяся от верхней ступеньки зеркала  $M_2$ , выразится так:

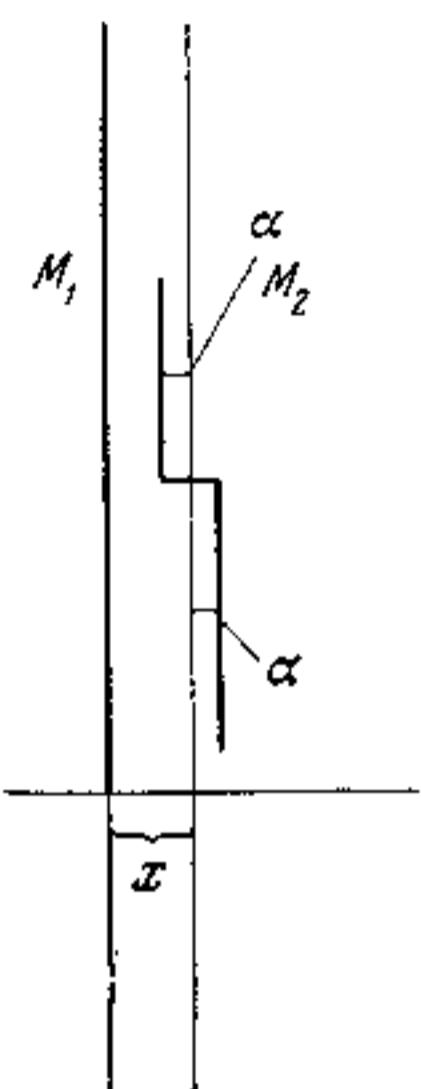
$$\xi_2 = a \cdot \cos \frac{2\pi c}{\lambda} \left[ t + \epsilon - \frac{2(x - \alpha)}{c} \right].$$

Фиг. 21. Ступенчатое зеркало интерферометра Кеннеди

Интенсивность интерференционной картины в верхней половине поля зрения в трубе можно найти обычным в теории интерференции способом:  $J_1 = ka^2 \left[ 1 + \cos \frac{4\pi}{\lambda} (x - \alpha) \right]$ , а для нижней  $J_2 = ka^2 \left[ 1 + \cos \frac{4\pi}{\lambda} (x + \alpha) \right]$ .

Таким образом, в трубу интерферометра Кеннеди видно поле, разделенное на две половины, вообще говоря, различной интенсивности; иными словами, видны две системы полос, в общем случае несколько сдвинутые относительно друг друга. О сдвиге можно судить по различию интенсивности в верхней и нижней части вдоль какой-нибудь линии, выделяемой диафрагмой в поле зрения трубы. Легко видеть, что для  $x = \frac{n \cdot \lambda}{4}$  ( $n$  — целое число)  $J_1 = J_2$  и обе половины поля освещены одинаково; если  $x$  отлично от  $\frac{n \cdot \lambda}{4}$ , равенство яркостей нарушится. Различие интенсивности  $\Delta J$  становится заметным, если  $\Delta J/J > 8 \cdot 10^{-3}$ . Величина  $\alpha$  равнялась  $0,025\lambda$ . При этих условиях наименьшее изменение  $\Delta x$ , которое можно надеяться заметить, равно  $5 \cdot 10^{-6}\lambda$ . Благодаря несовершенству зеркал и неодинаковой интенсивности интерферирующих пучков эта предельная чувствительность на практике не достигается. Кеннеди определяет реальную (исprobованную) чувствительность установки в  $10^{-3}\lambda^2$ .

<sup>1</sup> Если на один из углов платформы прибора накладывался груз в 7,5 кг, то вследствие деформаций происходило смещение на одну полосу, но появление разницы освещений в двух полях зрительной трубы замечалось уже при нагрузке платформы в 5—8 г, т. е. можно было заметить смещение на тысячную долю полосы.



По его словам, такие изменения открываются совершенно ясно. «Эффект Миллера», т. е. скорость  $v$  относительно эфира в 10 км/сек, должен соответствовать в приборе Кеннеди  $4 \cdot 10^{-3}$ , т. е. по крайней мере в 4 раза превосходить те изменения интенсивности, которые вполне заметны в установке Кеннеди.

Заменив несовершенный способ оценки смещения полос на глаз окулярным микрометром фотометрическим «полутеневым» приемом, Кеннеди сделал свой прибор не менее чувствительным, чем интерферометр Миллера. В то же время, благодаря вышеуказанным мерам, интерферометр очень мало отзывался на внешние возмущающие факторы.

Опыты производились в помещении с постоянной температурой в сентябре 1926 г. в различные времена дня, но чаще всего в те часы, когда, по Миллеру, наблюдался наибольший эффект. Результат был совершенно определенный. Не было никакого следа смещений в зависимости от ориентировки прибора. При вращении не замечалось никаких колебаний интенсивности в поле зрения и не было никакой необходимости поэтому делать много опытов. Опыты повторялись и на высоте Маунт Вильсон — и также без всякого эффекта<sup>1</sup>.

Таким образом, никакого эффекта, периодического или непериодического, превышающего эфирный ветер около 2 км/сек, Кеннеди не нашел<sup>2</sup>.

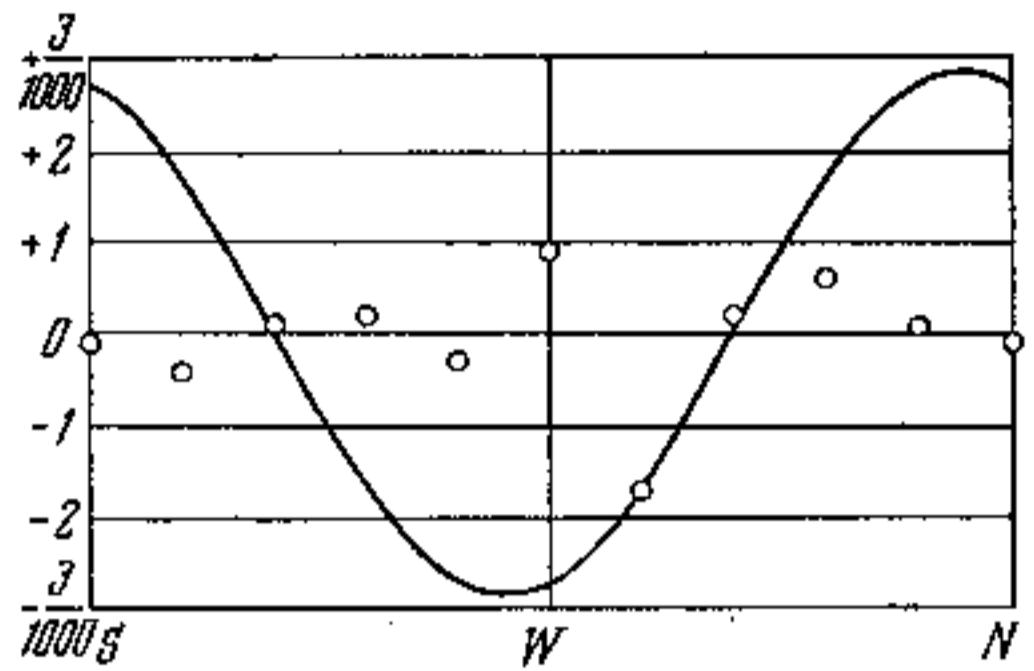
Бельгийские физики Пиккар и Стаэль [27] решили задачу о повышении чувствительности интерферометра при укороченном оптическом пути иным способом. Основываясь на первом сообщении Миллера, в котором указывалось, что эффект заметно обнаружился только на высоте Маунт Вильсон, они решили повторить опыт Майкельсона на воздушном шаре.

Маленький интерферометр Майкельсона с многократным отражением (9 зеркал), с оптическим путем в 280 см, помещался в термостат. Источником света служила ртутная лампа 435,8 мк. Интерференционные полосы и неподвижная точка отсчета непрерывно фотографировались на движущейся пленке. Азимуты отмечались световыми сигналами. Прибор был установлен в корзине шара «Гельвеция». Первый подъем состоялся ночью с 20 на 21 июня 1926 г. Весь шар при полете медленно (2—3 оборота в минуту) вращался при помощи двух электрических моторов.

<sup>1</sup> Сообщение Кеннеди в некоторых местах, к сожалению, слишком сжато. Как уже говорилось, прибор градуировался, т. е. искусственно вызывались смещения ожидаемого порядка, и при этом происходило вполне заметное относительное изменение яркости одной половины поля зрения.

<sup>2</sup> В ноябре 1927 г. Иллингворт опубликовал результаты повторения опыта Кеннеди с тем же прибором, но с некоторыми изменениями методики. Никакого «ветра», превышающего 1 км/сек, снова не нашлось.

Первые наблюдения производились на высоте в 2,5 км. Всего было фотографически зарегистрировано 96 оборотов интерферометра. «Эфирный ветер» в 30 км/сек должен был оказаться в приборе синусоидальным движением полос с полным периодом, соответствующим полуобороту баллона, и амплитудой в 0,064 полосы. Полученные снимки анализировались делильной машиной. Далее вычислялась по способу наименьших квадратов



Фиг. 22. Результаты Пиккара и Стэяля

синусоида, лучше всего подходящая к измеренным точкам. Амплитуда такой синусоиды не превышала 0,0034 ширины полосы, что соответствует эфирному ветру не более 7 км/сек. Эта величина лежит уже в пределах ошибок наблюдения.

В ноябре 1926 г. те же исследователи повторили опыт в лабораторных условиях в Брюсселе [28]. Результаты обработки фильм, соответствующих 60 оборотам,

представлены на фиг. 22. По абсциссе отмечены азимуты, по ординате — смещения полос в тысячных долях полосы. Сплошная кривая соответствует эфирному ветру с «миллеровской» амплитудой. Измеренные точки отмечены кружочками. Как видно, измеренные смещения распределены хаотически, по закону ошибок и значительно меньше миллеровских<sup>1</sup>.

Сами по себе результаты Пиккара и Стэяля уступают по точности опытам Кеннеди; эти исследования поучительны, однако, в том отношении, что они показывают, насколько повышается точность при применении автоматической фотографической регистрации. Здесь отсчитывались смещения в тысячные доли ширины полосы, в то время как визуально Майкельсон, Морлей и Миллер могли оценивать в лучшем случае только сотые доли.

На этом сейчас кончается история опыта Майкельсона. Ее итоги подведены в таблице 4.

В таблицу включены и опыты Миллера. По данным Миллера, следует, что на опыте обнаруживается не более  $\frac{1}{20}$  орбитальной скорости Земли. По этой цифре и вычислены величины таблицы, сопровождающиеся вопросительными знаками. По нашему мнению, это и есть результат опытов Миллера в отношении к разбираемому в этой главе вопросу. Что же ка-

<sup>1</sup> Пиккар и Стэль контролировали свой прибор, вызывая искусственно смещения зеркала на величину, соответствующую эффекту Миллера. Такие смещения на фильмах обнаруживались вполне отчетливо.

Таблица 4

Авторы	Год	Смещение полос	Предел постоянства скорости света	Минимальное смещение, ожидаемое в неподвижном эфире	«Эфирный ветер»
Майкельсон . . . . .	1881	<0,015	$\pm 200 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$	0,048	<18 $\frac{\text{км}}{\text{сек}}$
Майкельсон—Морлей . . . . .	1887	<0,02	$\pm 30$	0,4	<7
Морлей—Миллер . . . . .	1905	<0,01	$\pm 4$	1,5	<3,5
Миллер . . . . .	1925— 1927	<0,005(?)	$\pm 2(?)$	1,5	<1,5(?)
Пиккар и Стэль . . . . .	1926	<0,0007	$\pm 6$	0,064	<5
Кеннеди . . . . .	1926	<0,001	$\pm 3$	0,2	<2
Иллингворт . . . . .	1927	<0,0005	$\pm 1$	0,2	<1

сается «эффекта Миллера», то, как сказано выше, мы думаем, что он вообще не имеет отношения к движению Земли.

Из таблицы ясно, что по мере усовершенствования прибора принцип относительности оптических явлений и постоянство скорости света доказываются все с возрастающей точностью. Для настоящей оценки результатов лучше забыть об «эфирном ветре» и обратить внимание на 2-й и 3-й столбцы, в которых сопоставлены действительные результаты опыта, независимые от тех или иных гипотез. Идти дальше в поисках еще большей точности можно, как показали работы Кеннеди, Пиккара и Стэяля. Другой вопрос, нужно ли это? Пока теория не предъявляет запросов в этом смысле.

Мы говорили уже, что помимо интерференционных явлений многие другие оптические и электромагнитные процессы, согласно теории неувядающего эфира, должны обнаруживать различия в величинах второго порядка при различных азимутах прибора к направлению движения Земли<sup>1</sup>. Если не сомневаться в справедливости (хотя бы формальной) теории электромагнитных явлений, то нет нужды ставить другие опыты второго порядка, — их нулевой результат с этой точки зрения будет логическим следствием нулевого результата опыта Майкельсона. Но нет, кажется, ни одного даже общего положения в физике, в котором хотя бы временно не сомневались. Не так давно отрицалось существование атомов, совсем недавно в связи с затруднениями в теории квантов были высказаны сомнения в справедливости начала сохранения энергии в атомных процессах и т. д. В связи с якобы положительными результатами опытов

<sup>1</sup> В указанной выше работе 1887 г. Майкельсон и Миллер приводят схему возможного опыта второго порядка с отражением от зеркала, движущегося в эфире. Ничтожное уклонение от закона отражения света, следующее из теории, можно усилить посредством многократных отражений и сделать его доступным измерению. Насколько нам известно, опыт не осуществлен.

Миллера некоторые противники теории относительности заподозрили различное поведение и законы у электромагнитного светового поля и у поля, связанного с материей. Подозрения такого рода заставляют экспериментатора множить опыты по существу почти тождественного характера. За это от других антирелятивистов приходится выслушивать упреки вроде следующего: «У наших милых релятивистов опыты дефилируют, как статисты в театре, возвращаясь по 14 раз на сцену и изображая многочисленную армию» [29]. Оставив в стороне эту разноголосицу в одном и том же лагере, мы изложим один особенно тщательно и неоднократно осуществленный электромагнитный опыт второго порядка. Он основан на предположении, что пластинка, имеющая заряд  $e$  и движущаяся относительно эфира со скоростью  $v$ , должна производить магнитные действия, как ток величины  $e \cdot v$ . Обозначим через  $\sigma$  плотность заряда на пластинке; тогда пластинка, движущаяся в эфире со скоростью  $v$ , лежащей в ее плоскости, возбудит магнитное поле, перпендикулярное к скорости и параллельное пластинке, силы  $2\pi\sigma v$ . Две весьма близко расположенные пластинки конденсатора будут иметь во внутреннем пространстве поле  $H = 4\pi\sigma v$ <sup>1</sup>. Пусть  $S$  — поверхность каждой пластинки;  $d$  — расстояние между ними. Полная магнитная энергия будет в таком случае:

$$\mathcal{E}_m = \frac{H^2 \cdot Sd}{8\pi} = 2\pi\sigma^2 v^2 Sd$$

(магнитная проницаемость положена равной 1). Электростатическая энергия конденсатора:

$$\mathcal{E}_e = \frac{2\pi}{K} \sigma^2 Sd,$$

<sup>1</sup> Элемент тока  $J$  на длине провода  $dl$  в точке, отстоящей от  $dl$  на расстоянии  $r$ , создает, согласно закону Био-Савара, магнитное поле  $\vec{H} = \frac{J}{r^3} [\vec{dl} \cdot \vec{r}]$ . Заряд  $I$ , движущийся со скоростью  $v$ , эквивалентен элементу тока  $Jdl = ev$ . Таким образом, поле движущегося заряда в точке, отстоящей на  $r$  от местоположения заряда, есть  $\vec{H} = \frac{I}{r^3} [\vec{v} \vec{r}] = [\vec{v} \vec{E}]$ , где  $\vec{E} = \frac{er}{r^3}$  есть, согласно закону Кулона, напряженность электрического поля, создаваемого зарядом  $e$  на расстоянии  $r$ . В случае движущегося конденсатора поле  $E$  между пластинами есть  $E = 4\pi\sigma$ , где  $\sigma$  — плотность заряда конденсатора. Поэтому напряженность магнитного поля между пластинами конденсатора, движущегося со скоростью  $v$  так, что вектор  $\vec{v}$  совпадает с плоскостью пластин и, следовательно, перпендикулярен к  $E$ , численно равна  $H = v \cdot 4\pi\sigma$ .

В этих рассуждениях предполагается, что  $v$  мало по сравнению со скоростью света  $c$ . В приведенных формулах  $e$ ,  $\sigma$ ,  $E$  и  $H$  выражены в электромагнитных единицах. Поэтому в выражение электромагнитной энергии  $\mathcal{E}_m$  не входит переводной множитель, а в выражение электростатической энергии  $\mathcal{E}_e$  должен быть введен множитель

$$K = \frac{1}{c^2}, \text{ т. е. } \mathcal{E}_e = \frac{E_e^2}{8\pi} Sd = \frac{E_m^2 Sd}{c^2 8\pi} = \frac{(4\pi\sigma_m)^2 Sd}{\sigma^2 8\pi} = \frac{2\pi\sigma^2 Sd}{K}.$$

Ред.

где  $K$  связано со скоростью света с соотношением  $K = \frac{1}{c^2}$ . Общая энергия

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \mathcal{E}_m + \mathcal{E}_e = \mathcal{E}_e(1 + Kv^2) = \\ &= \mathcal{E}_e \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right). \end{aligned}$$

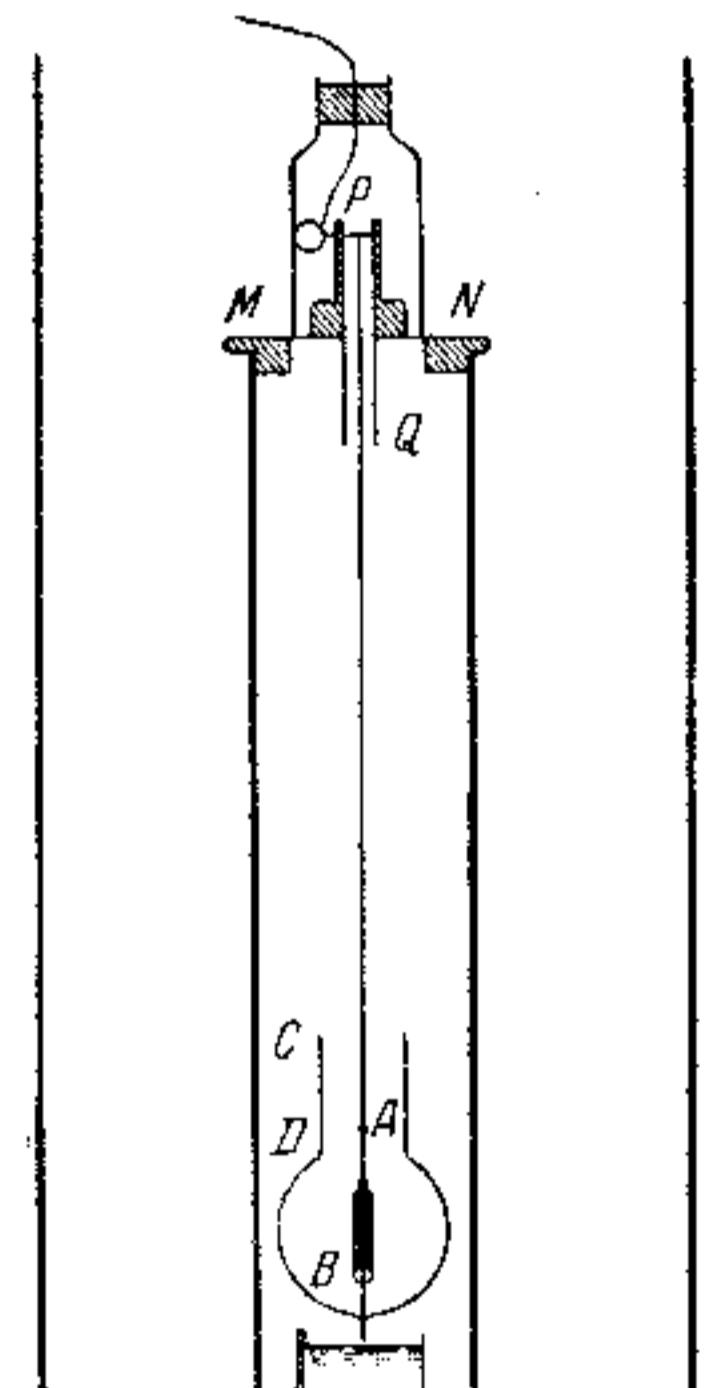
Если скорость  $v$  образует с обкладками угол  $\alpha$ , то вместо  $v$  придется взять только составляющую  $v \cdot \cos \alpha$ :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_e \left[1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 \cdot \cos^2 \alpha\right].$$

Возникающее электромагнитное поле сопровождается силами, стремящимися повернуть конденсатор в нормальное к скорости положение, когда  $\mathcal{E}$  будет минимальной. Соответствующий момент пары сил равен:

$$-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \alpha} = \mathcal{E}_e \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin 2\alpha.$$

Обнаружить этот поворот конденсатора впервые пытались в 1904 г. Троутон и Нобль [31]. Конденсатор изображен на фиг. 23. Он состоял из оловянных листочек, проложенных слюдой, и был подвешен на тонкой длиной (37 см) проволоке из фосфорной бронзы. Вторая группа обкладок конденсатора посредством тонкой платиновой проволоки соединялась с раствором серной кислоты. Вся система защищалась цинковым цилиндром, соединенным с землей и раствором. Для защиты от электростатических действий цилиндра конденсатор окружался целлулоидовым позолоченным сосудом. Поворот конденсатора наблюдался посредством зеркальца, подвешенного на вити; труба находилась на расстоянии в 1 м. Зарядка до потенциала в 2000—3000 вольт производилась машиной Вимшерста. Опыт состоял в наблюдении положения равновесия конденсатора (совершившего колебания) в различные времена дня. Необходимо поворачивать прибор, как в опыте Майкельсона, здесь нет. Испытанием прибора было



Фиг. 23. Конденсатор Троутона — Нобля

<sup>1</sup> Эйнштейн [30] замечает, что в этой теории не учитывается возможность различия продольной и поперечной массы электронов и ядер вещества. Если, например, представить себе электрон, по Абрагаму, в виде твердой заряженной сферы, то при учете указанного обстоятельства  $\frac{4}{5}$  момента вращения должно компенсироваться, и ожидаемый эффект должен быть в 5 раз меньше.

выяснено, что для поворота зеркальца, сопровождающегося смещением зайчика на шкале (в 1 м расстояния) на 100 см, требуется пара в  $4,26 \cdot 10^{-2}$  эрга. Движение относительно эфира должно бы сопровождаться (в момент максимального эффекта) парой в  $7,4 \cdot 10^{-4}$  эрга, что соответствует перемещению зайчика на 3,4 см. Троутон и Нобль не заметили никаких систематических отклонений; случайные отклонения достигали приблизительно 5 мм, что соответствует скорости  $v < 12$  км/сек.

Опыты Миллера побудили повторить и опыты Троутона — Нобля. В 1925 и 1926 гг. Томашек [32] произвел опыты с конденсатором на вершине Юнгфрау (3457 м), ожидая какого-либо заметного «эфирного ветра» на этой значительной высоте. Установка Томашека в первой серии опытов в 1925 г., по его описанию, была в 20 раз чувствительнее, чем у Троутона и Нобля. Достигнуто это применением более тонкой проволоки для подвеса, конструкцией небольшого конденсатора значительной емкости, улучшением способов электростатической защиты и пр. В остальном установка повторяла опыт Троутона и Нобля.

Ход наблюдения был следующий. Сначала в течение получаса наблюдалась колебания незаряженного конденсатора (период 8 минут), причем отсчеты производились каждую минуту. Затем конденсатор заряжался, и снова в течение 20—30 минут наблюдалась его колебания, затем конденсатор разряжался и т. д. При зарядке конденсатор должен был отклониться на требуемый теорией угол, причем этот угол должен меняться в течение суток. Никаких отклонений (тем более периодических), превышающих отклонения, эквивалентные приблизительно скорости в 3 км/сек, Томашек в этой серии опытов не нашел.

В апреле 1926 г. Томашек [33] еще раз повторил свои опыты на вершине Юнгфрау, причем чувствительность установки была повышена почти в 30 раз. Достигнуто это повышением емкости конденсатора (0,21 микрофарады при весе в 85 г и напряжении 2100 вольт), новой системой подвеса и изменением электростатической защиты. Полный эффект орбитальной скорости Земли в 30 км/сек должен был вызывать отклонение зайчика в 132 см на шкале, удаленной на 1 м. Точность отсчетов достигала, по словам Томашека, 0,2 мм; таким образом, можно было открыть эффект скорости в  $1/2$  км/сек. Даже таких отклонений, однако, не оказалось.

Чэз [34] в Пасадене, в Америке, считал опыты Томашека неубедительными и заведомо обречеными на отрицательный результат по следующей причине.

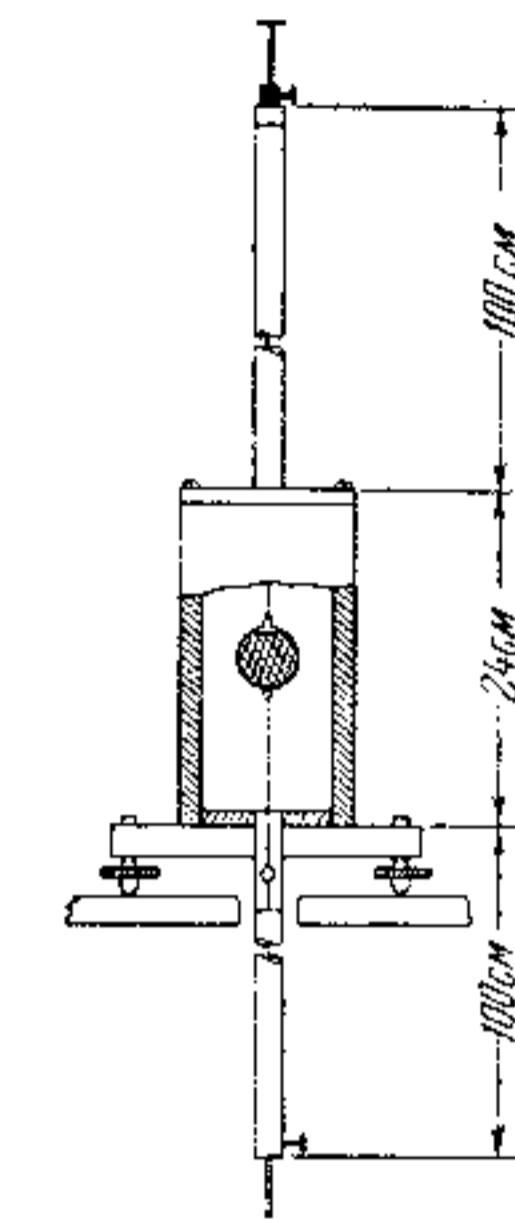
В первых опытах Томашека конденсатор подвешивался на проволоке длиной в 50 см и диаметром в 0,0015 см. Эта проволока служила подводкой к одной системе обкладок конденсатора. К другой половине заряд подводился по тонкой проволоке, присоединенной к нижнему концу конденсатора и опущенной в раствор серной кислоты. Чэз полагал, что поверхностное натяжение раствора должно оказывать такие

фрикционные силы на погруженную проволочку, которые превосходят ожидаемый эффект. Опыты с моделью показали, что можно было повернуть вершину проволоки на 2—3 полных оборота, причем конденсатор оставался неподвижным.

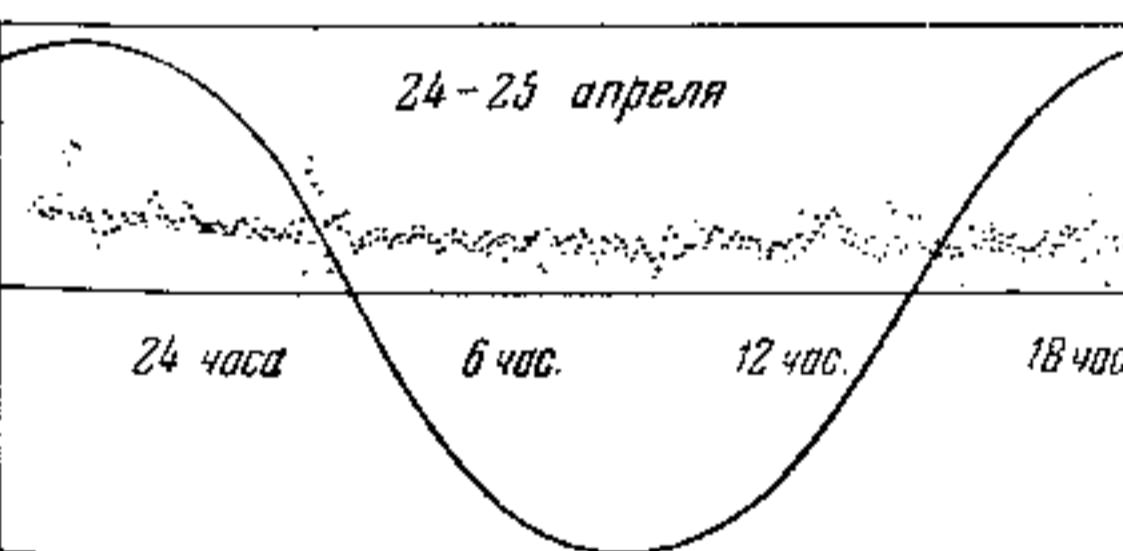
Недавно [35] Томашек ответил на это возражение<sup>1</sup>, считая его неосновательным. В загрязненных растворах серной кислоты действительно может появиться «твердая» пленка на поверхности, вызывающая заметное трение. В своих опытах, как дополнительно сообщает Томашек, он применял многократно дистиллированную воду, самую чистую кислоту и применял меры для защиты поверхности раствора от запыления. Для контроля на возможное влияние поверхности пленки производились сравнительные наблюдения качаний подвеса, у которого конец проволоки один раз погружался на  $1/4$  мм в раствор, другой раз висел в воздухе. Никакого добавочного затухания в первом случае сравнительно со вторым не замечалось. Эти и другие контрольные опыты позволяют считать опыты Томашека вполне доказательными.

Чэз в свою очередь повторил опыт Троутона — Нобля. В его приборе (фиг. 24) проволока натянута сверху и снизу симметрично; конденсатор емкостью в 0,04 микрофарады и весом в 10 г заряжался до 600 вольт. Результаты представлены на фиг. 25. Правильная кривая соответствует «эффекту Миллера» в 10 км/сек, точками нанесены отклонения от нулевой линии. Постоянные отклонения вызываются электростатическими силами и зависят от начальной юстировки прибора. Точки беспорядочно колеблются около прямой. Отклонения от этой прямой, за исключением случайных, не превышают эффекта в 12 км/сек.

Итак, опыт Троутона — Нобля по меньшей мере



Фиг. 24. Конденсатор Чэза



Фиг. 25. Результаты опытов Чэза. Конденсатор воссток—запад. По оси абсцисс — время, по оси ординат — отклонения

<sup>1</sup> К сожалению, ответ Томашека появился в печати с большим запозданием, во время печатания настоящей книги, и мы не могли изложить опыты Томашека с тою подробностью, которой, как выяснилось теперь, они заслуживают. Эти опыты с наибольшей точностью доказывают отсутствие «эфирного ветра».

с такой же точностью, как и опыт Майкельсона, дает нулевой результат. Конечно, этот нуль установлен не с абсолютной достоверностью, но на таковую вообще не может претендовать ни один опыт. По мере повышения чувствительности приборов никаких периодических колебаний не обнаруживается и точность нулевого результата возрастает. Это единственный критерий правильности заключения.

### III. ВИХРЕВОЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ САНЬЯКА И ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА С СУТОЧНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ЗЕМЛИ

«Я не знаю, что такое этот эфир».

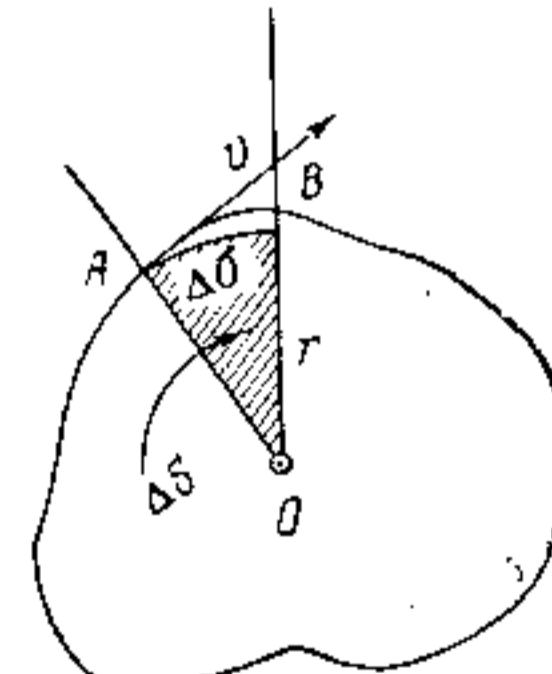
И. Ньютона

Отсутствие эффектов второго порядка было понято сперва как *experimentum crucis* для представления об эфире, как доказательство увлечения эфира Землею при орбитальном движении. Но Лоренцу удалось примирить гипотезу неподвижного эфира и отсутствие эффектов второго порядка. Для этого потребовалось, правда, сделать новые предположения о свойствах электронов и вещества. Повторился нередкий случай в истории науки — опыт, считавшийся *experimentum crucis*, таким не оказался, вопрос остался нерешенным, нужны были новые опыты, другого характера.

Заметив явлений первого порядка в гипотезе эфира простирается только на случаи переносного движения, когда все части пространства, на котором протекает опыт, движутся с одинаковой по величине и направлению скоростью. Представим себе, однако, что в каждой точке пространства опыта скорости, вообще говоря, различные, и пусть в таком «поле скоростей» световой пучок описывает замкнутую кривую, возвращаясь к исходной точке.

Можно доказать, что в таком случае, в предположении неподвижного эфира, необходимо должны наблюдаться эффекты первого порядка [36]. Мы рассмотрим два случая, примененных на опыте.

Пусть все приборы вращаются с одинаковой угловой скоростью  $\alpha$  вокруг общей оси и световой пучок описывает в таком поле скоростей замкнутую кривую или ломаную линию, плоскость которой перпендикулярна оси вращения (фиг. 26). Время  $\Delta t$ , нужное для прохождения участка  $\Delta l$ , образующего угол  $\psi$  с радиусом вращения в данном месте,



Фиг. 26. Распространение света относительно вращающейся системы.

$$AB = \Delta l.$$