

с такой же точностью, как и опыт Майкельсона, дает нулевой результат. Конечно, этот нуль установлен не с абсолютной достоверностью, но на такую 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».

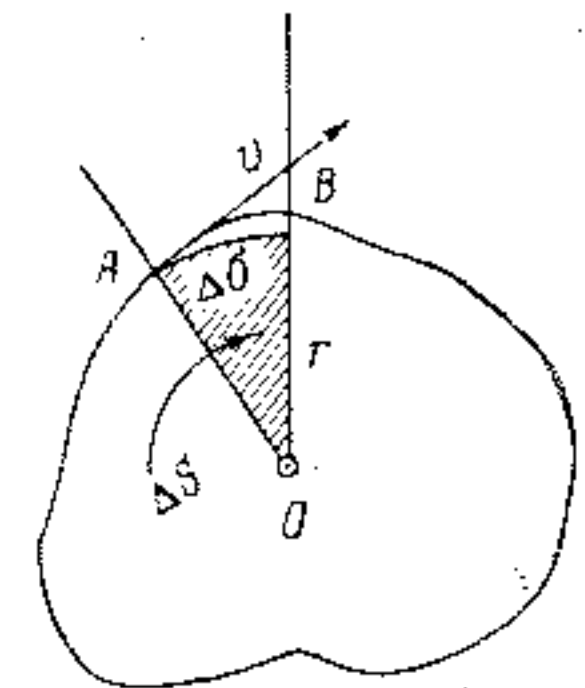
И. Ньютон

Отсутствие эффектов второго порядка было понято сначала как *experimentum crucis* для представления об эфире, как доказательство увлечения эфира Землей 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 передний случай в истории науки — опыт, считавшийся *experimentum crucis*, таковым не оказался, вопрос остался нерешенным, нужны были новые опыты, другого характера.

Запрет 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, различны, 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  $\omega$  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.  
 $AB = \Delta l$ .

будет равно  $\frac{\Delta s}{c}$  для случая эфира, вовлекаемого в движение, и  $\frac{\Delta s}{c \pm v}$  для отстающего неподвижного эфира. Здесь  $v$  — слагающая скорости материи в направлении луча  $\Delta s$ , а тот или другой знак относится к движению против или по часовой стрелке. Если  $v$  очень мало в сравнении с  $c$ , то можно написать, отбрасывая члены высших порядков, что  $\Delta t = \frac{\Delta s}{c} \left(1 \mp \frac{v}{c}\right)$ . Из рассмотрения фиг. 26, где через  $\Delta \sigma$  обозначена соответствующая дуга круга, нетрудно найти, что:

$$v = \omega \cdot r \cdot \sin \psi,$$

$$\Delta s = \frac{\Delta \sigma}{\sin \psi},$$

и, следовательно,

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c} \pm \frac{\omega \cdot r \cdot \Delta \sigma}{c^2};$$

но  $r \Delta \sigma = 2 \Delta S$ , где  $S$  — площадь сектора, указанного на рисунке. С другой стороны,

$$\omega = 2\pi n,$$

где  $n$  — число оборотов в секунду; следовательно,

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c} \pm \frac{4\pi n \cdot \Delta S}{c^2}.$$

Вернувшись в исходную точку, луч замкнет некоторую площадь  $S$ , и полное время его прохождения

$$t_1 = \sum \frac{\Delta s}{c} = \frac{4\pi \cdot n S}{c^2}.$$

Если бы эфир вовлекался полностью в движение, то соответствующее время было бы равным

$$t_2 = \sum \frac{\Delta s}{c}.$$

Разность времен

$$t_1 - t_2 = \frac{4\pi \cdot n S}{c^2}.$$

Пусть один луч по часовой стрелке, другой — против, мы должны обнаружить абсолютную разность времен возвращения:

$$\frac{8\pi \cdot n S}{c^2}.$$

На опыте измеряется не разность времен, а разность хода, поэтому написанное выражение надо еще умножить на  $c$ . Следовательно, разность хода, которую можно заменить, равна

$$\frac{8\pi n S}{c}, \quad (1)$$

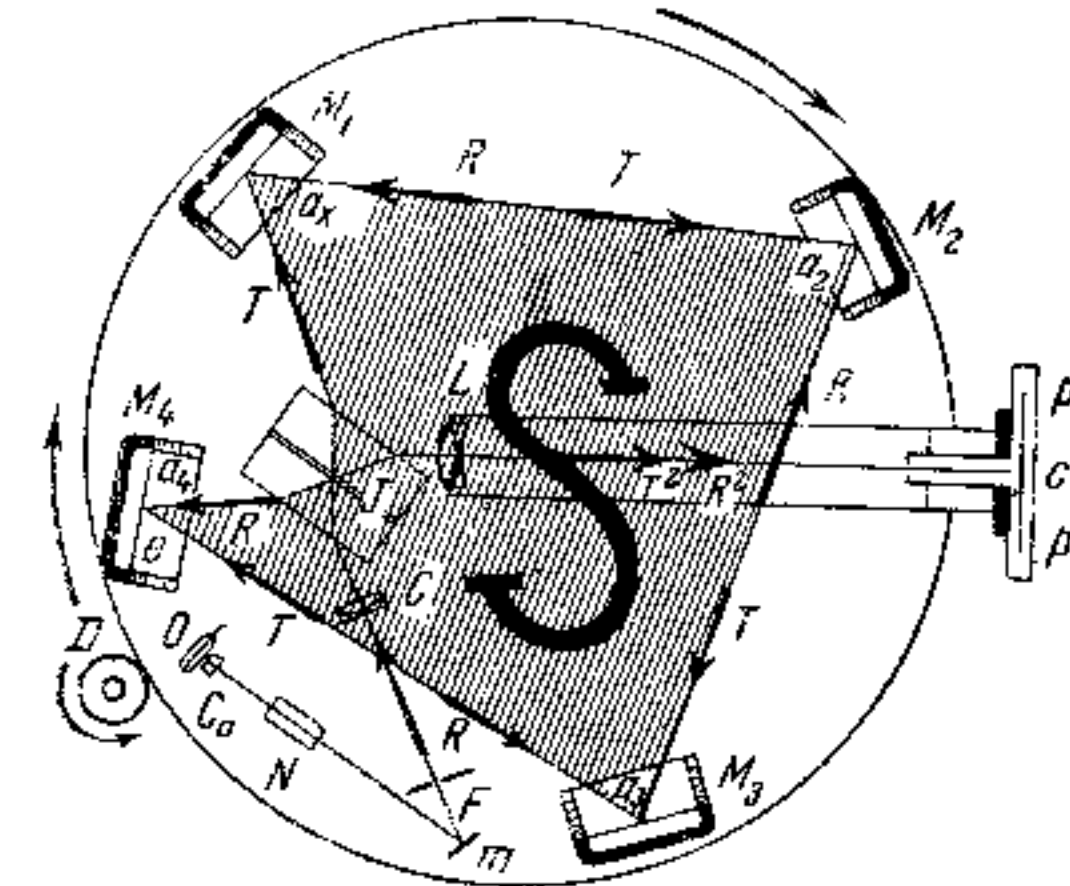
т. е. — величина первого порядка. Заметим, что в формулу входит  $S$ , т. е. площадь, охватываемая пучком света: если  $S=0$ , т. е. если, например,

свет идет по одному и тому же пути туда и обратно, то эффектов первого порядка не будет.

Идея опытов первого порядка впервые высказана Майкельсоном; осуществление этой идеи на основании приведенных рассуждений принадлежит Саньяку (1913) [37]<sup>1</sup>.

Интерферограф Саньяка изображен схематически на фиг. 27.

На горизонтально вращающемся круглом основании (диаметр 50 см) прочно закреплены оптические части: зеркала  $M_1, M_2, M_3, M_4$ , интерферометр с тонким воздушным слоем  $J$ , источник света  $O$  (маленькая лампа накаливания) и пр. Объектив микроскопа  $C_0$  отбрасывает изображение пяти лампы через николеву призму  $N$  посредством зеркала  $m$  на щель  $F$ . Через объектив  $C$  на воздушный слой интерферометра  $J$  падает пучок параллельных поляризованных лучей. Здесь свет разделяется на отраженный и проходящий. На рисунке ясен ход проходящего луча  $T$  и отраженного  $R$ . Пройдя указанные пути, они снова встречаются в интерферометре и идут по одному направлению через линзу  $L$ . На фотографической пластинке  $P$  получаются интерференционные полосы. Затрихованная площадь соответствует площади  $S$ , определяющей эффект, согласно изложенной выше теории. Вращение диска производилось посредством валика  $D$ , обтянутого кожей и сидящего на оси электрического мотора. Во избежание значительной центробежной силы и воздушных вихрей работать приходится при очень небольших скоростях. У Саньяка число оборотов не превосходило трех в секунду. Надежным контролем, исключавшим искажения, происходящие от центробежных сил, было изменение направления вращения. При вращении по часовой стрелке должно получиться, положим, смещение  $+\frac{8\pi n S}{c}$ , при вращении против часовой стрелки  $-\frac{8\pi n S}{c}$ . Один из методов измерений состоял в том, что сначала делался снимок при вращении по часовой стрелке,



Фиг. 27. Интерферометр Саньяка

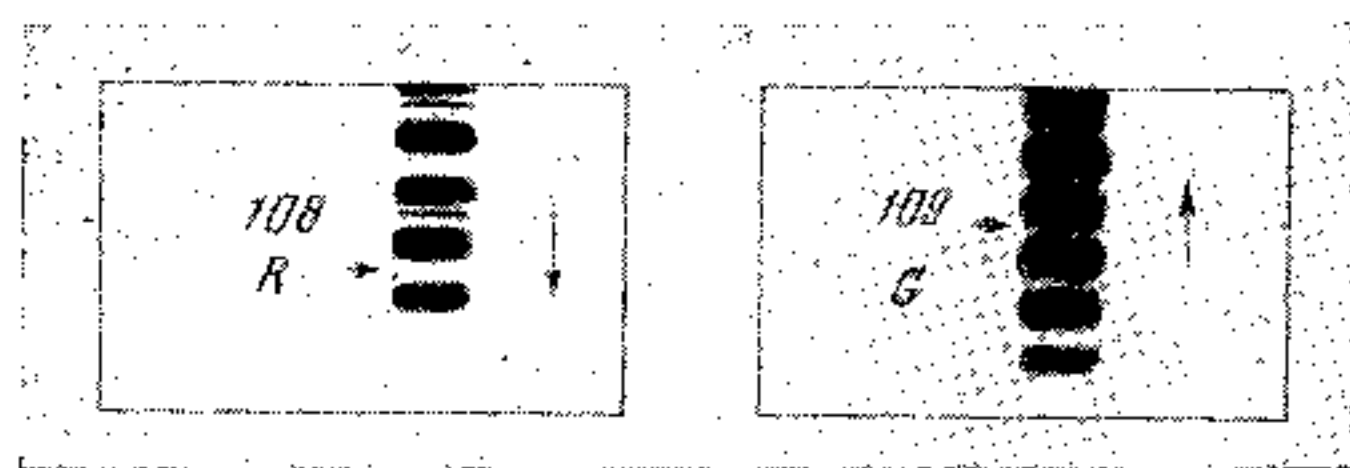
<sup>1</sup> В диссертации Ф. Гарреса (Иена, 1912), оставшейся в свое время почти неизвестной, излагается опыт, по существу совпадающий с опытом Саньяка. Различие было только в том, что свет проходит внутри кольца из стеклянных призм. Число оборотов было 12,5 в секунду. Гаррес получил с достаточной точностью положительный эффект [38].

затем пластинка несколько смещалась, лучам света открывался свежий участок пластинки, и производилась съемка при вращении интерферографа против часовой стрелки. Относительное смещение полос  $\Delta$  должно было достигать удвоенной величины  $\frac{16\pi n \cdot S}{c}$ . Пример результатов Саньяка дан в табл. 5.

Таблица 5

S	n	$\Delta\lambda_{\text{набл.}}$	$\Delta\lambda_{\text{вычисл.}}$
863 см <sup>2</sup>	0,86	0,0264	0,0297
866 см <sup>2</sup>	2,35	0,077	0,079

Смещения выражены в долях длины волны (измерения относились к длине волны 436 м $\mu$ ), определялись они фотограмметрически (точность таких измерений много выше точности визуальных интерференционных наблюдений).



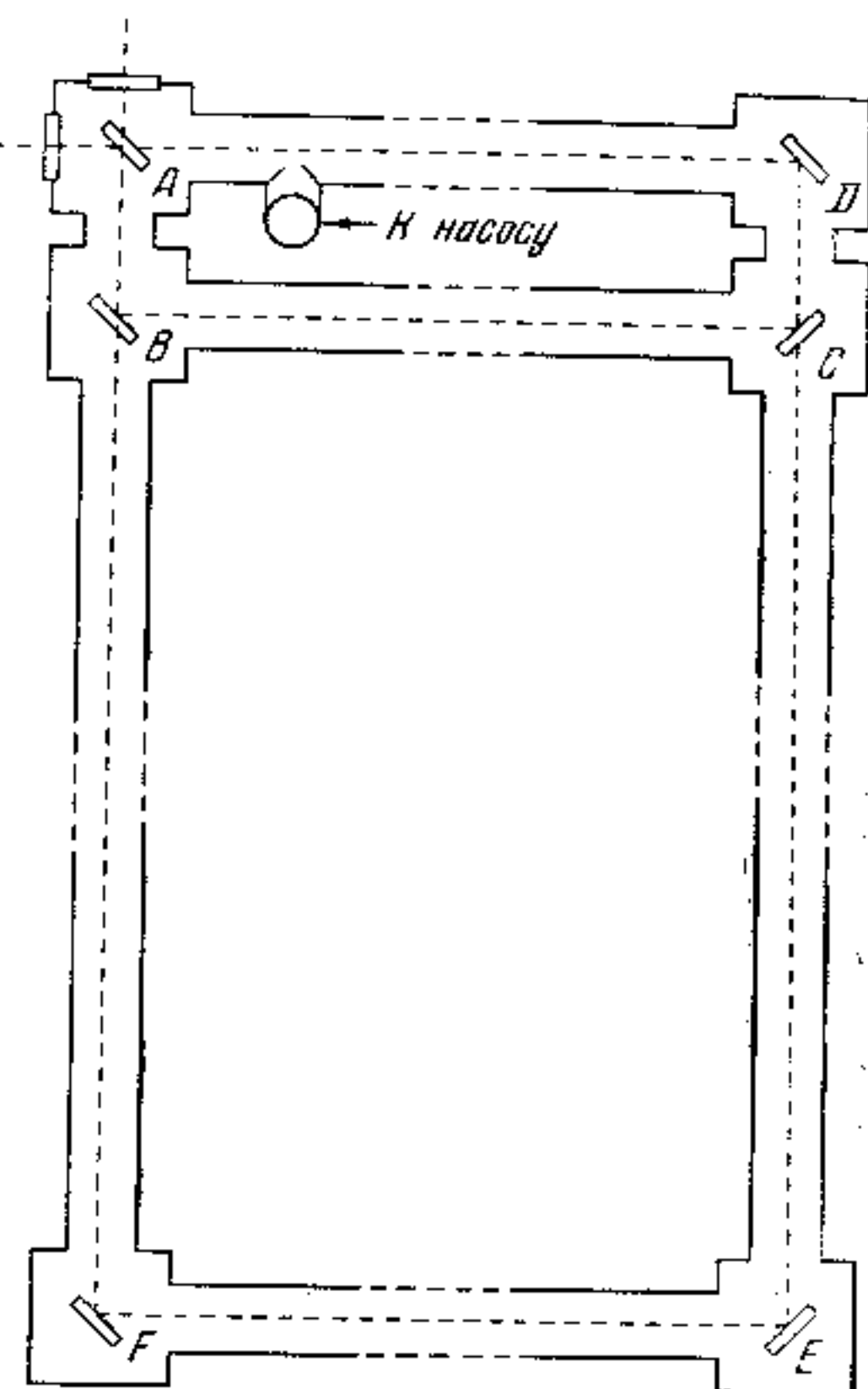
Фиг. 28. Смещение интерференционных полос в опытах Погани

Саньяк назвал открытый им положительный эффект «вихревым эллиптическим эффектом» и высказал надежду, что явление может найти практическое применение для регистрации медленных вращательных движений, например корабля. Достаточно расположить большую оптическую «цепь», охватывающую несколько десятков квадратных метров, чтобы вполне заметить визуально или фотографически ничтожные ускорения движения корабля.

Опыт Саньяка повторен в 1925—1926 гг. Погани [39] в лаборатории фирмы Цейсса. Цель повторения — достижение возможно большей точности. Много труда пришлось положить для получения прочной механической системы, выдерживающей без заметных деформаций центробежные силы, развивавшиеся при большом числе оборотов. Вращение в опытах Погани производилось водяной турбиной, число оборотов доходило от 20

до 33 в секунду. Лучи обегали между четырьмя зеркалами площади в 1250 см<sup>2</sup>. Монохроматический свет получался от ртутной лампы, причем источник света не принимал участия во вращении и свет посредством призм проходил в прибор сверху вниз вдоль оси вращения. На фиг. 28 приведены две фотографии, показывающие смещения интерференционных полос, получающихся при 20 оборотах в секунду. Один снимок соответствует полосам при вращении по часовой стрелке, другой — против. Маленькие горизонтальные стрелки на обоих снимках показывают положение одной и той же полосы, смещение стрелок соответствует смещению полос. Удвоенное смещение, вычисляемое по формуле (1), должно достигать 0,906; на опыте из ряда наблюдений найдено 0,920, причем отклонения в отдельных измерениях не превосходят 2—3%. Эта точность настолько велика, что возникает вопрос о причине небольшого расхождения чисел 0,906 и 0,920, требующий дальнейшего экспериментального исследования.

Если бы явление Саньяка было открыто раньше, чем выяснились нулевые результаты опытов второго порядка, оно, конечно, рассматривалось бы как блестящее экспериментальное доказательство наличия эфира. Но в ситуации, создавшейся в теоретической физике после опыта Майкельсона, опыт Саньяка разъяснял немного. Маленький интерферограф Саньяка обнаруживает «оптический вихрь», следовательно он не увлекает за собою эфира. Таково единственное возможное толкование этого опыта на основе представления об эфире. Но вопроса о том, увлекается ли эфир Землею в целом или нет, опыт Саньяка не разрешает. Легко видеть, что в том и в другом случае результат будет одним и тем же. Следовательно, опыт Саньяка, вообще говоря, не противоречит опыту Майкельсона, но и не разъясняет его. Желателен был еще один опыт первого порядка — с Землею в целом в качестве вращающегося тела. Такой опыт осуществлен в 1925 г. Майкельсоном и Гэлем [40].



Фиг. 29. Схема опыта Майкельсона — Гэли

У Клиринга в Иллинойсе на земле были уложены водопроводные трубы в виде прямоугольника (фиг. 29). Трубы  $AF$  и  $DE$  направлены точно с запада на восток, трубы  $EF$ ,  $DA$  и  $CB$  — с севера на юг. Длина  $DE$  и  $AF$  613 м, длина  $EF$ ,  $DA$  и  $CB$  339,5 м. Диаметр труб 30 см. Трубы тщательно, непроницаемо для воздуха соединены вместе. Одним общим насосом, работающим от 50-сильного мотора, в течение трех часов можно было откачать воздух из труб (объем внутреннего замкнутого пространства около  $160 \text{ м}^3$ ) до 1 см ртутного столба. Плоско-параллельные пластинки  $A$  и  $B$  были слегка позолочены, пластинка у  $C$  немного посеребрена до такой степени, чтобы отражать и пропускать свет в нужных пропорциях. Остальные пластинки были покрыты густым слоем серебра. Наблюдатель у зеркала  $A$  переговаривался с помощниками, стоявшими при установке зеркал на удаленных углах  $E$  и  $F$ , при помощи телефона. Пучок света от вольтовой дуги раздваивался у зеркала  $A$ , причем далее один пучок шел по контуру по часовой стрелке, другой — против. Интерференционные полосы от двух возвращающихся пучков наблюдались в телескоп.

Прежде чем перейти к дальнейшему описанию опыта, рассмотрим его теорию с точки зрения предположения о неувлекаемом эфире. Плечи  $AF$  и  $DE$  находятся на мало отличающихся, но все же разных широтах  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , на которых скорость, вызываемая вращением Земли, различная:

$$v_1 = R \cdot \omega \cdot \cos \varphi_1,$$

$$v_2 = R \cdot \omega \cdot \cos \varphi_2$$

( $R$  — радиус Земли,  $\omega$  — угловая скорость). Для упрощения расчета<sup>1</sup> предположим, что длины плеч  $AF$  и  $DE$  несколько различны, именно:

$$AF = l_0 \cos \varphi_1,$$

$$DE = l_0 \cos \varphi_2.$$

Нетрудно вывести, что пучки, обходящие контур против и по часовой стрелке, придут обратно (в предположении неувлекаемого эфира) не одновременно. Разность времени возвращения будет:

$$T = 2R\omega \cdot l_0 \left\{ \frac{\cos^2 \varphi_1}{c^2 - R^2 \omega^2 \cos^2 \varphi_1} - \frac{\cos^2 \varphi_2}{c^2 - R^2 \omega^2 \cos^2 \varphi_2} \right\};$$

$c^2$  очень велико в сравнении с  $R^2 \omega^2$  (т. е. экваториальной скоростью вращения Земли); поэтому с достаточной для данного опыта точностью можно написать:

$$T = \frac{2R\omega \cdot l_0}{c^2} \left\{ \cos^2 \varphi_1 - \cos^2 \varphi_2 \right\}; \quad (2)$$

<sup>1</sup> При этом условии стороны  $EF$  и  $AD$  будут направлены по меридиану, перпендикулярно  $v$ , поэтому скорость света вдоль этих сторон будет в точности равна  $c$ .

$$\begin{aligned} \cos^2 \varphi_1 - \cos^2 \varphi_2 &= (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2)(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) = \\ &= -\sin(\varphi_1 + \varphi_2) \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_2); \\ \sin(\varphi_1 + \varphi_2) &\sim 2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi. \end{aligned}$$

Последнее преобразование допустимо, потому что  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  мало отличаются, и мы заменяем их средним значением  $\varphi$ . По той же причине

$$\sin(\varphi_1 - \varphi_2) \sim (\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{h}{R},$$

где  $h$  — расстояние  $AD$  (фиг. 29). Пользуясь этими преобразованиями и вставляя в (2), находим:

$$T = \frac{4\omega \cdot l_0 \cdot h}{c^2} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi.$$

Но, согласно вышесказанному,  $l = l_0 \cos \varphi$ , где  $l$  — средняя длина  $AF$  и  $DE$ . Следовательно,

$$T = \frac{4lh \cdot \omega}{c^2} \sin \varphi.$$

Соответствующая разность хода, выраженная в длинах волн, будет

$$\Delta = \frac{4lh\omega}{c\lambda} \sin \varphi. \quad (3)$$

Произведение  $lh$  в этой формуле есть площадь, охватываемая пучком света [равносильно площади  $S$  в опыте Саньяка, уравнение (1)]. Величину (3) и требуется определить в излагаемом опыте. Теоретически она должна оставаться постоянной в любое время суток и года, так как  $\omega$  неизменна.

Чтобы обнаружить смещение  $\Delta$ , Майкельсон сравнивает в поле зрительной трубы интерференционные полосы, получаемые при обегании большого контура  $ADEFA$  и малого  $ADCBA$  (фиг. 29); в последнем площадь  $h \cdot l$  настолько мала, что смещением, вызываемым вращением Земли, согласно формуле (3), можно пренебречь. Разумеется, если изображения источника света, получаемые от большого и малого контуров, не совпадают, то полосы будут относительно смещены независимо от вращения Земли. Поэтому прежде всего при всяком измерении требуется добиться полного совпадения обоих изображений или внести соответствующую поправку.

Когда в трубах находился воздух при атмосферном давлении, интерференционные полосы были весьма неустойчивы; когда же давление понижалось почти до 1 см, они становились совершенно устойчивыми и резкими. Смещение полос, вызываемое вращением Земли, измерялось в различные дни при полной перестановке зеркал, причем иногда проходящий пучок направлялся по часовой стрелке, иногда против. Наблюдения производились также разными лицами. Всего было сделано 269 измерений, результаты которых даны в табл. 6; каждый номер соответствует среднему приблизительно из 20 наблюдений.

Таблица 6

№	$\Delta$	Отклонение от среднего
1	0,250	0,022
2	0,255	0,025
3	0,193	0,037
4	0,246	0,016
5	0,235	0,005
6	0,207	0,023
7	0,232	0,002
8	0,230	0,000
9	0,217	0,013
10	0,198	0,032
11	0,252	0,022
12	0,237	0,007
13	0,230	0,000
	Ср. 0,230	Ср. 0,016

Если подставить в формулу (3) значения входящих величин, то теоретически, предполагая эфир неподвижным, следует ожидать смещения

$$0,236 \pm 0,002.$$

Неточность теоретической величины вызывается неточностью величин, входящих в формулу (3). Обработка данных таблицы дает для наблюдаемого смещения

$$0,230 \pm 0,005.$$

Таким образом, перед нами снова положительный эффект, сам по себе с поразительной точностью подтверждающий предположение о неувлекаемом эфире, отстающем при суточном вращении Земли. Нулевой результат опытов второго порядка требует, с другой стороны, полного увлечения эфира Землей при ее годичном движении. Одновременная неподвижность и движение эфира механически, однако, мыслимы. Например Луна, конечно, увлекается Землей в ее движении вокруг Солнца, но совершенно безучастна к суточному вращению Земли.

Идею эфира, увлекаемого движущимся телом и одновременно «протационного» или безвихревого, развивал в половине прошлого века Стокс. Разумеется, в движение при этом могут вовлекаться только соседние слои эфира, Земля не может захватить с собою всего эфира вселенной. Поэтому должны существовать переходные области, где движущийся эфир постепенно переходит в неподвижный. Наличие таких переходных областей создает значительные затруднения для понимания явления астрономической аберрации, которое в этой книге не рассматривается. Для

устранения этих трудностей и необходимо условие протационности эфира. Однако увлекаемый и одновременно безвихревой эфир гидродинамически приемлем только в том случае, как показали Планк и Лоренц [41], если он в чрезвычайно сильной степени сгущен у поверхности Земли; эфир должен быть здесь в десятки тысяч раз плотнее, чем в межзвездном пространстве. Если стоять на чисто гидродинамической точке зрения, то и скорость света в сгущенной эфирной оболочке Земли должна во много раз превосходить скорость, измеряемую астрономическими методами, в противоречие с опытом. Только что описанный опыт Майкельсона показывает, с другой стороны, что эфир, если таковой существует, не может быть протационным, — в нем имеются «вихри».

Опровергнуть окончательно представление об эфирной оболочке, окружающей Землю, но, в отличие от воздушной атмосферы, не принимающей участия во вращении Земли, — трудно, однако и для детальной разработки этой идеи нет никакой точки опоры.

Под натиском опытных данных концепция эфира стала столь громоздкой и неопределенной, что в пользу ее трудно аргументировать даже тем, что она дает довольно наглядный образ явлений. Как и во времена Ньютона, мы так же мало знаем, «что такое этот эфир», а пожалуй даже меньше, чем тогда. Правильнее было бы вообще излагать теорию относительности, ее экспериментальные основы без всякого отношения, как мирного, так и враждебного, к гипотезе эфира. Учение Эйнштейна не содержит гипотез (в ньютоновском смысле). Всякая гипотеза включает предположение о ненаблюдаемой (или даже принципиально ненаблюдаемой) вещи. В теорию относительности входят только наблюдаемые факты и логические следствия из них.

Ротационные опыты Саньяка и Майкельсона — Гэля в теории относительности (частной и общей) объясняются почти так же, как возможность обнаружения вращательного движения по проявлениям центробежных сил в механике [42]. Это — естественное следствие теории относительности, не добавляющее ничего нового.