

## 1. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

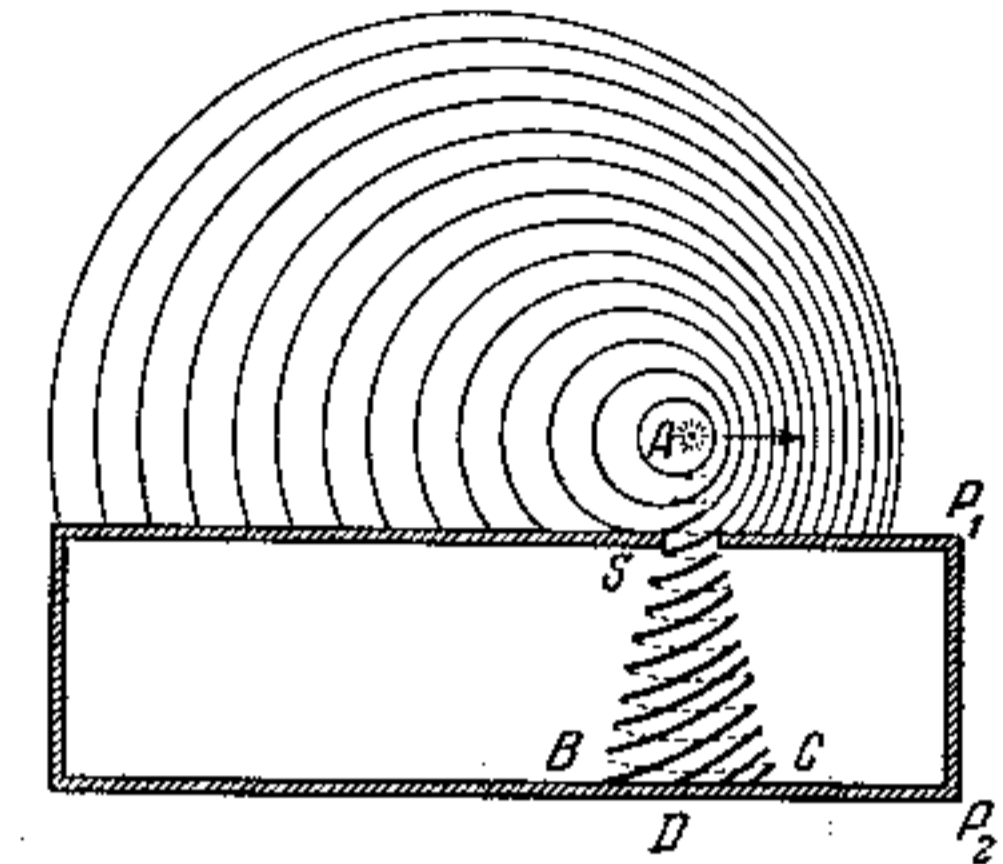
«Распознавание истинных движений отдельных тел и точное разграничение их от кажущихся очень трудно, ибо части неподвижного пространства, в котором совершаются истинные движения тел, не ощущаются нашими чувствами».

И. Ньютон

Всякий физический опыт, если он тщателен, имеет самостоятельную ценность. Но к опыту редко обращаются внаудачу, в поисках новых, неожиданных явлений. В большинстве случаев опыт ставят для суждения о правильности или ошибочности определенных теоретических построений. Результат опыта может окончательно опровергнуть некоторое предположение с большей или меньшей точностью. Наоборот, экспериментальное подтверждение той или иной теории, строго говоря, никогда не должно почитаться безапелляционным по той причине, что один и тот же результат может следовать из различных теорий. В этом смысле бесспорный *experimentum crucis* едва ли возможен. Ответ, даваемый опытом, иногда может быть неожиданным, и тогда опыт становится первоисточником новой теории (так, например, возникло учение о радиоактивности). В этом самое ценное, эвристическое значение опыта. Но результаты такого рода очень редки, поэтому экспериментатор всегда, прежде чем предпринять опыт, ставит вопрос его целесообразности.

Со времен Френеля появилась уверенность в существовании эфира, и нужно было решить вопрос, производим ли мы наши земные, главным образом оптические опыты в неподвижном (относительно Земли) эфире или же эфир отстаёт от Земли при её годовом движении вокруг Солнца. Какие экспериментальные возможности имеются для этого и какие опыты целесообразны? Схему значительной группы таких опытов легко понять из фиг. 1. Источник света  $A$  и ящик  $P_1P_2$  с отверстием  $S$  неподвижны относительно друг друга. Внутри ящика, например в  $D$ , может находиться наблюдатель или регистрирующий прибор. Вся установка несётся с Землёю вокруг Солнца. Если эфир вполне захватывается Землёю, то ясно, что никакого относительного движения между эфиром, источником и на-

блюдателем не будет и движение Земли вокруг Солнца оптически, в лабораторных опытах, не обнаружится. Но если эфир отстаёт от Земли (оставаясь, например, неподвижным относительно Солнца), то картина изменится. Световые волны, распространяющиеся в этом случае от источника, изображены на рисунке. Они будут искажены благодаря перемещению светящегося центра в эфире. Если эфир увлекается Землёю, то волны должны распространяться концентрически (отрезки их внутри ящика отмечены штриховыми линиями). В случае отставания эфира концентричность нарушается и фронт волн поворачивается относительно дна ящика на некоторый угол, как видно из рисунка. Легко показать, что тангенс этого угла будет  $v/c$  ( $v$  — скорость движения Земли,  $c$  — скорость света). Можно ли на опыте обнаружить этот поворот? Заметим, что средняя годовая скорость Земли относительно Солнца около 30 км/сек, скорость света около 300 000 км/сек, т. е. отношение  $v/c \sim 10^{-4}$ ; тангенс столь малого угла можно с большой точностью считать равным самому углу.



Фиг. 1. Схема распространения волн в эфире

Одно из физических следствий изображенного поворота фронта волны могло бы состоять в следующем. Как видно из рисунка, волны проходят в  $B$  и  $C$  в случае неувлекаемого эфира с некоторой разностью фаз: именно в  $C$  волна отстаёт на  $BC \sin \frac{v}{c} \sim BC \frac{v}{c}$ ; по времени она приходит в  $C$  на  $BC \frac{v}{c^2}$  секунд позже, чем в  $B$ . Нельзя ли заметить эту разность фаз? Единственный способ сравнить фазы двух волн — заставить их интерферировать в одной точке. Для этого придется волну в  $B$  повернуть, например зеркалом, в  $C$  и там произвести сравнение<sup>1</sup>.

В случае увлекаемого эфира на прохождение от  $B$  к  $C$  потребуется время  $\frac{BC}{c}$ , в случае же отстающего эфира по правилу сложения скоростей время будет больше, именно  $\frac{BC}{c-v}$ . Разница времен:

$$\frac{BC}{c-v} - \frac{BC}{c} = \frac{BC \cdot v}{c(c-v)}$$

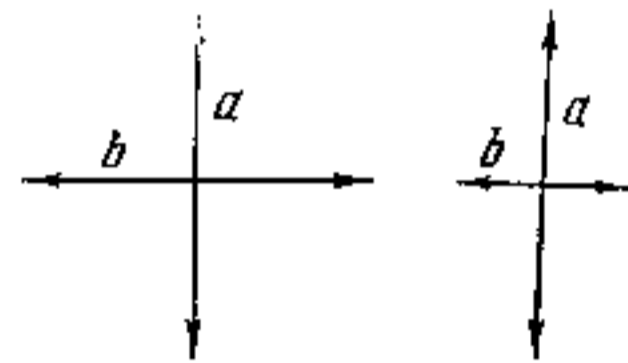
<sup>1</sup> Интерференция в  $C$  практически может наблюдаться только в том случае, если размеры источника  $A$  значительно меньше длины световой волны.

На столько секунд позже придет волна в  $C$  в случае отставания эфира. Но мы видели, что и прямая волна приходит в  $C$  с запаздыванием по времени на  $\frac{BC \cdot v}{c^2}$ . Разница:

$$BC \frac{v}{c(c-v)} - BC \frac{v}{c^2} = BC \frac{v^2}{c^2(c-v)}$$

Помножив на  $(c-v)$ , находим, что разность хода, подлежащая измерению, будет только  $BC \frac{v^2}{c^2}$ , т. е. величина второго порядка относительно  $v/c$ , хотя само по себе явление, т. е. разность фаз в  $B$  и  $C$ , первого порядка.  $v^2/c^2 \sim 10^{-8}$ ; если  $BC$  равно 1 м, то надо измерить разность хода в  $10^{-6}$  см.

Такой же результат дает рассмотрение диффракционных явлений, отражения и преломления в неподвижном и движущемся эфире. Всюду наблюдению могут быть доступными только величины второго порядка относительно малой величины  $v/c$ .



Фиг. 2. Частичная поляризация света в неувлекаемом эфире

Посмотрим, какие перспективы имеются у поляризационных опытов. Пусть источник испускает естественный, неполяризованный свет, который мысленно можно разложить на слагающую, параллельную к  $BC$  и перпендикулярную к  $BC$  (фиг. 2,  $a$ ). В случае эфира, движущегося вместе с Землей, и концентриче-

ских волн обе амплитуды  $a$  и  $b$  равны между собою. При отставании эфира горизонтальная слагающая видна наблюдателю в  $D$  в проекции, равной  $a \cdot \cos v/c$ . Это скажется в частичной поляризации света от источника  $A$ . Но измерению доступны не амплитуды, а энергия колебаний, пропорциональная квадратам амплитуд; различными поляризационными приборами можно измерить отношение  $b^2/a^2$ ; в данном случае измерению подлежит величина

$$\frac{a^2 \cdot \cos^2 \frac{v}{c}}{a^2} = \cos^2 \frac{v}{c} = 1 - \sin^2 \frac{v}{c} \sim 1 - \frac{v^2}{c^2}$$

Нужно заметить отличие от единицы на  $v^2/c^2$ , т. е. слова на величину второго порядка. В действительности можно заметить частичную поляризацию во всяком случае не ниже  $10^{-3}$ , т. е. ожидаемый эффект в сотни раз меньше доступного измерению.

Резкая асимметрия волн, возникающая вследствие движения источника в эфире (ср. фиг. 1), совершенно недоступна наблюдателю, но отношению к которому источник неподвижен. В самом деле, по принципу Доплера, воспринимаемая частота колебаний  $n$  связана с частотой источника  $n_0$  известной формулой:

$$n = n_0 \left( \frac{c \pm v_1}{c \pm v_2} \right),$$

где  $v_1, v_2$  — скорости источника и наблюдателя относительно эфира. В нашем случае  $v_1 = v_2$ , т. е.  $n_1 = n_0$ , т. е. движение Земли в эфире не должно изменять частоты.

Мы упомянули явления интерференции, диффракции, поляризации; ни одно из них не может обнаружить движения Земли относительно эфира заметнее, чем в величинах второго порядка,  $v^2/c^2$ . Остается еще непосредственное измерение скорости света. Нет ли здесь более благоприятных возможностей? В последнее время Майкельсону удалось очень сильно повысить точность измерения скорости света по методу вращающегося зеркала [4]. Цифра, полученная им:

$$299\,796 \pm 1 \text{ км/сек}^1.$$

Следовательно, добавок или вычет 30 км/сек лежит вполне в пределах точности этих измерений. Достаточно измерить скорость света один раз по движению Земли, другой раз против, и в измерениях должна обнаружиться разница в 60 км/сек, в десятки раз превышающая точность измерений. На самом деле обстоятельства слагаются не менее затруднительно, чем в ранее рассмотренных явлениях. Во всех земных способах измерения скорости света неизбежно приходится, так сказать, замыкать пучок света, приводить его после длительного путешествия посредством зеркал к исходному пункту, где и обнаруживается запаздывание, т. е. время, затраченное на прохождение пути.

Рассмотрим простейший случай. Пучок света идет от  $A$  к  $B$  в том же направлении, как движется Земля. В  $B$  пучок поворачивается зеркалом обратно и снова приходит в  $A$ . Пусть расстояние  $AB = l$ . Если эфир увлекается Землею, то время, потраченное светом на всем пути,  $T_1$ , будет  $\frac{2l}{c}$ . Если эфир отстает от Земли, то путь  $A \rightarrow B$ , по правилу сложения скоростей, будет пройден за время  $\frac{l}{c+v}$ , путь же  $B \rightarrow A$  за время  $\frac{l}{c-v}$ . На весь путь будет затрачено время  $T_2 = \frac{2lc}{c^2 - v^2}$ . Разность времен

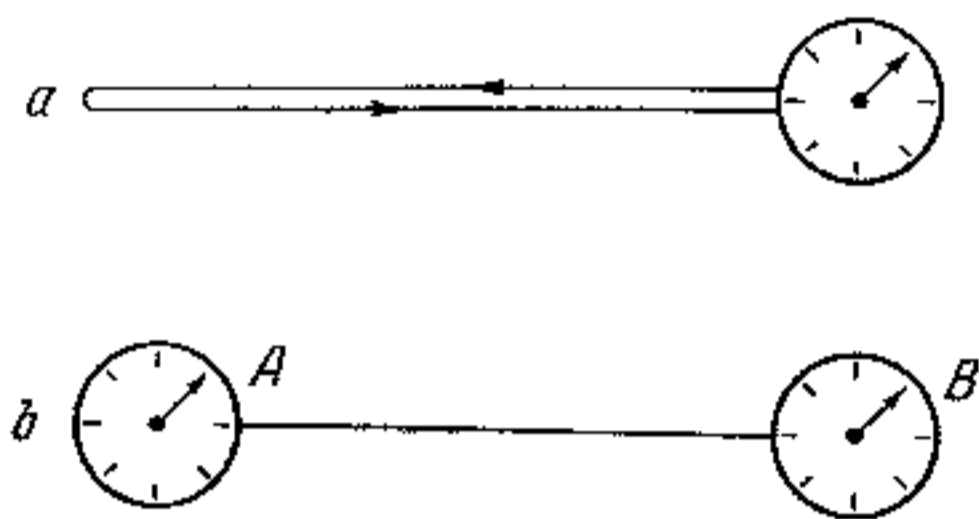
$$T_2 - T_1 = \frac{2cl}{c^2 - v^2} - \frac{2l}{c} = \frac{2l}{c} \left\{ \frac{\frac{v^2}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right\}.$$

Для получения разности хода написанную величину нужно умножить

<sup>1</sup> За последние годы достигнуто дальнейшее повышение точности в определении скорости света, и притом разнообразными методами. Принятое в настоящее время значение скорости света в вакууме есть:  $c = 299\,792 \pm 0,25$  км/сек. — *Ред.*

на  $c$ ;  $v^2/c^2$  очень мало в сравнении с единицей, а потому доступный измерению эффект  $2l \frac{v^2}{c^2}$  снова оказывается величиной второго порядка.

Предлагалось несколько проектов, как, по крайней мере принципиально, измерить разность скоростей света в двух противоположных направлениях. Для определения скорости необходимо измерить путь и время, надо знать момент начала распространения света и момент прихода к конечной точке. Простейшее решение задачи измерения скорости света — совместить начальную и конечную точки, замкнуть световой путь (фиг. 3, а)



Фиг. 3. Схема определения скорости света

и воспользоваться только одним часами; но при этом, как мы видели, только в членах второго порядка может обнаружиться разница времени прохождения в прямом и обратном направлении. Другой способ (фиг. 3, б) — воспользоваться двумя часами, пространственно разъединенными. Если часы

идут одинаково, задача решается просто. Часы  $A$  отметят начало распространения,  $B$  — конец, и разница показаний даст искомое время.

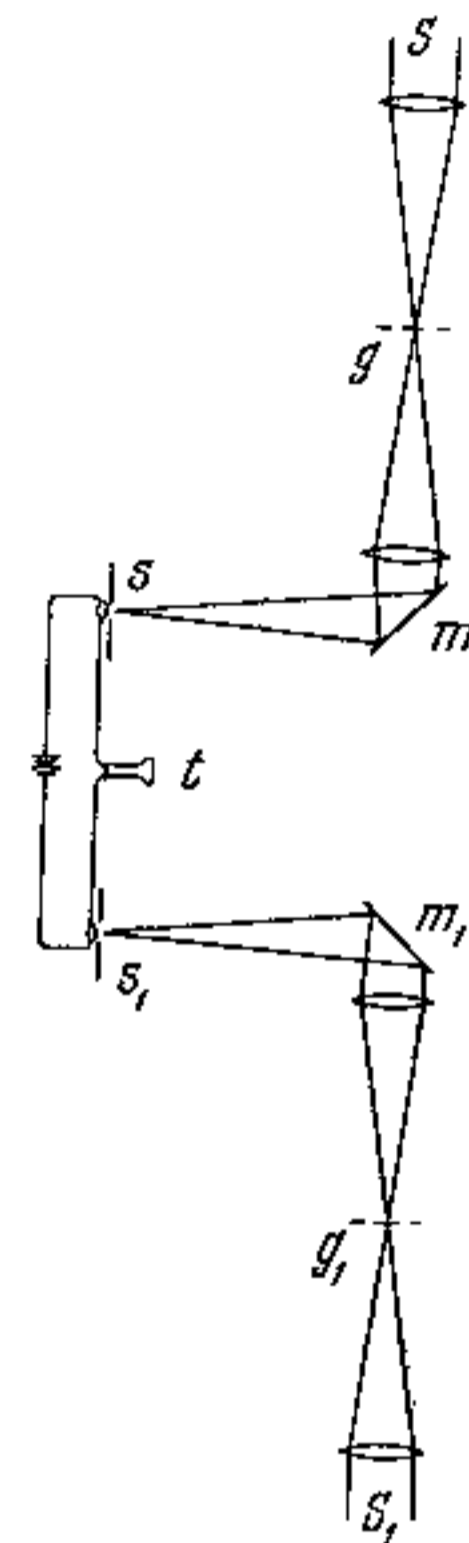
Максвелл незадолго до смерти в письме к Тодду [5] указал, что известный способ определения скорости света по затмениям спутников Юпитера как раз соответствует схеме фиг. 3, б. Часами  $A$  служат регулярные затмения спутников, часами  $B$  — земные часы астронома. Солнечная система в целом движется к апексу — созвездию Геркулеса. Когда Юпитер и апекс расположены в одну сторону от Земли, измеряемая скорость равна  $c - v$  (где  $v$  — скорость движения к апексу); когда же Юпитер и апекс расположатся по разные стороны от Земли, измеряемая скорость в неувлекаемом эфире должна равняться  $c + v$ . Бэртон [6] рассмотрел реальные условия возможности определения разности этих скоростей и пришел, по различным, частью практическим, соображениям, к неутешительному результату. Возможная разность лежит далеко за пределами различных погрешностей астрономических наблюдений<sup>1</sup>.

Майкельсон и Морлей [7] предлагали схему следующего земного опыта для определения разности  $c + v$  и  $c - v$  (фиг. 4). Пучки света  $S$  и  $S_1$  идут параллельно движению Земли и падают на вращающиеся зеркала  $m$  и  $m_1$ . В  $g$  и  $g_1$  помещаются решетки с перемежающимися темными и прозрачными полосами. Посредством линз и зеркал изображения ре-

<sup>1</sup> Следует отметить, что с точки зрения теории относительности этот метод и принципиально не может дать ожидаемого результата. — *Ред.*

шеток проектируются на селеновые элементы  $s$  и  $s_1$ . Если на оба элемента одновременно падают изображения прозрачных частей решеток, то сопротивление селена уменьшится и в телефон будет слышен сильный звук. Зеркала  $m$  и  $m_1$  вращаются; поэтому изображения решеток бегут по селену и вызывают непрерывное звучание телефона. За 12 часов, вследствие вращения Земли, установка повернется на  $180^\circ$ . Пучки  $S$  и  $S_1$  переменятся ролями. К скорости света в одном пучке ранее прибавлялась скорость движения Земли, в другом вычиталась; теперь произойдет обратное. Майкельсон и Морлей полагали, что при достаточной тщательности установки такое изменение может обнаружиться в том, что пучки света станут приходить к селеновым элементам несколько смещенными: на один элемент будет, например, падать темная полоса решетки, на другой светлая, и в результате звук в телефоне ослабнет.

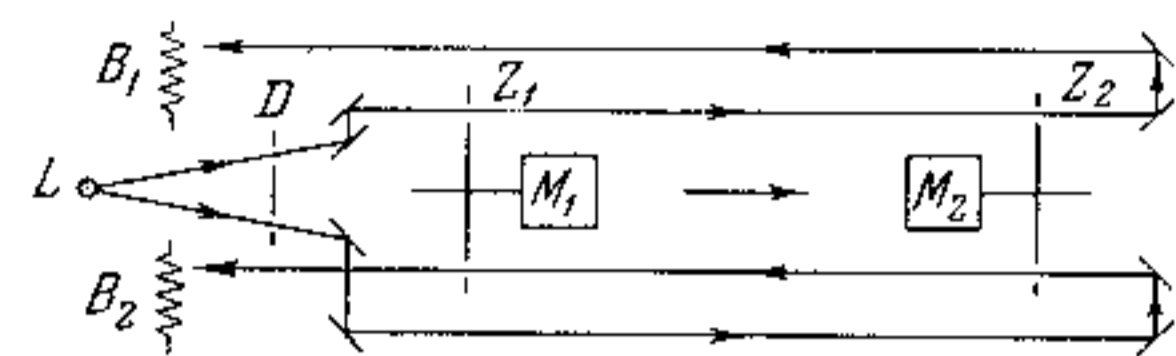
17 лет спустя с таким же предложением выступил В. Вин [8]. Швейцер [9], очевидно, не зная о проекте Майкельсона и Морлей, указал, что он уже давно, до Вина, разрабатывал такого же рода проекты и привел схему предполагаемого опыта с двумя колесами Физо (фиг. 5). На рисунке  $Z_1$  и  $Z_2$  — два совершенно одинаковых зубчатых колеса Физо, вращающиеся двумя синхронными моторами  $M_1$  и  $M_2$ , питаемыми одним и тем же переменным током. Свет от вольтовой дуги  $L$  через отверстия диафрагмы  $D$  разделяется на два пучка, причем, как легко понять из рисунка, посредством зеркал один из пучков проходит через отверстия обоих колес в прямом направлении, другой в обратном. В конце концов пучки попадают на болометры  $B_1$  и  $B_2$ , включенные в цепь мостика Уитстона. Положим, что оба колеса поставлены в одной фазе; прохождение от отверстия одного колеса до другого потребует некоторого времени, зависящего от скорости света. При надлежащей скорости оборотов и числе зубцов в колесах, луч, подойдя ко второму колесу, встретит вместо отверстия непрозрачное место и не попадет на болометр. В предположении неувлекаемого эфира скорость одного луча между колесами  $c + v$ , другого  $c - v$ ; поэтому в крайнем случае один луч совсем не достигнет своего болометра, а другой достигнет и нагреет его. Через 12 часов картина должна измениться, лучи поменяются ролями, и тот болометр, который ранее был холодным, станет теперь нагреваться.



Фиг. 4. Проект Майкельсона — Морлей



В последнее время тот же опыт еще раз предложен Жакобом [10]. Единственное отличие в том, что вместо зеркал или зубчатых колес проектируются так называемые конденсаторы Керра. Если пространство между пластинами плоского конденсатора наполнить сероуглеродом или нитробензолом, то при наложении электрического поля эти жидкости становятся двойнопреломляющими; при этом чем сильнее поле, тем больше



Фиг. 5. Проект Швейцера

двойное преломление. В быстро переменном электрическом поле такая жидкость становится попеременно то прозрачной, то темной для поляризованного света, а следовательно вполне заменяет вращающееся зубчатое колесо Физо.

Ясно, что проекты Майкельсона — Морлея, Вина, Швейцера и Жакоба относятся к схеме фиг. 3, *b* с двумя часами. Ход часов заменяется периодическим вращением двух зеркал, или двух колес Физо, или двух конденсаторов Керра. Конец изобретению таких проектов был положен простым практическим замечанием Майкельсона [11]<sup>1</sup>. Для осуществления метода фиг. 3, *b* требуется полный синхронизм движения обоих часов. Как поддержать такой синхронизм? В проекте Швейцера для этой цели предполагается применить два синхронных мотора, питаемых одним током; у Жакоба синхронизм работы обоих конденсаторов Керра определяется применением одного и того же переменного тока. Но скорость распространения тока того же порядка, что и скорость света, и прямо зависит от последней. Соединение моторов и конденсаторов эквивалентно замыканию световой цепи, и от схемы фиг. 3, *b* мы переходим к схеме 3, *a*, в которой наблюдению доступны только эффекты второго порядка. Другого точного способа поддержания синхронизма, кроме электрического, мы не знаем. Таким образом, предполагаемые опыты первого порядка практически обращаются в обычные замкнутые опыты второго порядка.

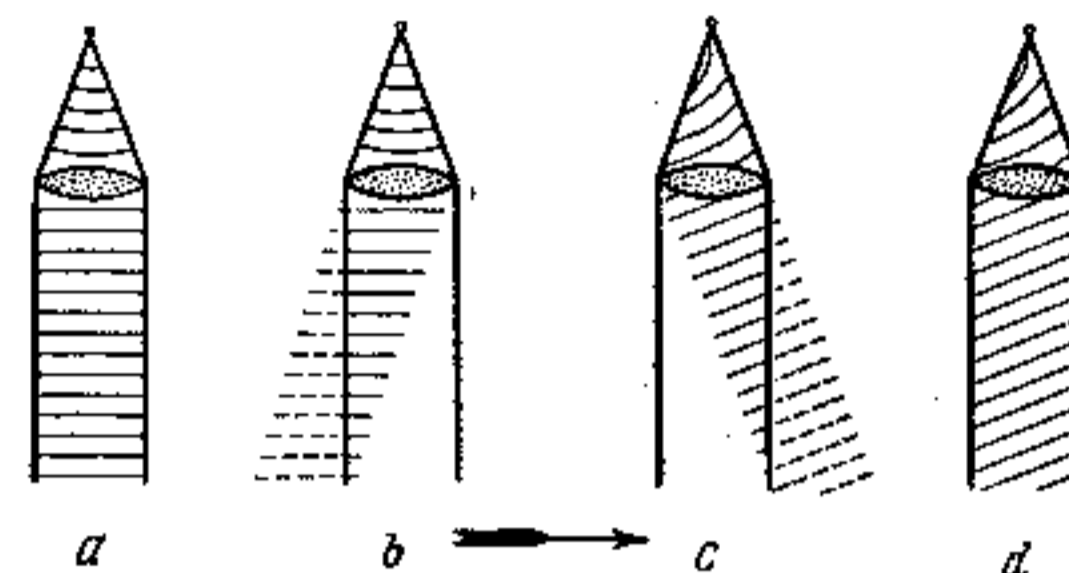
Создается довольно курьезное положение. В неувлекаемом эфире до л ж и ы существовать эффекты первого порядка, как это, например, ясно из фиг. 1, но и з м е р и т ь и х н е л ь з я. Изложенные проекты сами по себе верны и неосуществимы по условиям физических измерений. Значительно больше число выполненных или проектированных опытов первого порядка, ошибочных по своей идее. Можно бы написать длинную историю таких ошибок, или педелесообразных опытов. Они давали неизменный отрицательный результат, который, однако,

<sup>1</sup> Это замечание, вероятно, осталось неизвестным Жакобу.

т р и в и а л е н, потому что вытекает сразу из обеих конкурирующих гипотез — увлекаемого и неувлекаемого эфира; из таких опытов нельзя сделать никакого теоретического вывода. Историю этих опытов можно найти во многих старых курсах оптики [12]. Неуловимость большинства эффектов первого порядка на основании гипотезы неувлекаемого эфира доказана изящной общей теоремой Лоренца [13].

В виде примера ошибок, постоянно, до последнего времени встречающихся по этому поводу в литературе, рассмотрим один совсем свежий проект опыта первого порядка.

Недавно Бухерер [14] сообщил о том, что он собирается произвести очень простой «опыт первого порядка». Рассуждение его такое. Пусть от источника



Фиг. 6. Проект Бухерера

А, например, через линзу *L* распространяется параллельный пучок света. В случае эфира, увлекаемого Землей, волны пойдут так, как представлено на фиг. 6, *a*. Если эфир неподвижен, то получится абберационный эффект, изображенный на фиг. 6, *b*. Угол такой абберации равен  $v/c$ . Бухерер проектирует построить длинную трубу так, чтобы отношение внутреннего диаметра к длине трубы было меньше  $v/c$ . Если (по Бухереру) пропустить пучок лучей через такую трубу, поставленную вдоль движения Земли, то свет пройдет насквозь (фиг. 6, *a*); если же трубу с источником света повернуть на  $90^\circ$ , то произойдет изображенное на фиг. 6, *b* — волны застрянут в трубе и наружу не выйдут. Ошибочность такого рассуждения нетрудно обнаружить. Движение источника в эфире, как видно по фиг. 1, сопровождается искажением чередования волн; фронт их, подходящий к данному отверстию, поворачивается на угол  $v/c$ . Представим себе на мгновение, что поверх линзы эфир отстает, а ниже ее увлекается. Тогда волны, выходящие из отверстия, вследствие указанного поворота фронта будут распространяться не вертикально вниз, но повернутся на угол  $v/c$  вправо (фиг. 6, *c*). Но в действительности эфир остается неподвижным, и ниже линзы поэтому должен получиться добавочный абберационный эффект, как раз и учтенный Бухерером, т. е. поворот влево на угол  $v/c$ . Оба поворота вправо и влево компенсируются, и луч пойдет, как и в увлекаемом вертикально вниз (фиг. 6, *d*). Останется только поворот фронта волн на угол  $v/c$ , который, как уже изложено, практически может быть обнаружен только в величинах второго порядка. В трубу Бухерера свет будет несомненно виден в любых положениях на земной поверхности как в движущемся, так и в неподвижном

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 первого порядка. Он замечателен тем, что не противоречит ни одному из существующих воззрений 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 относить 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, диффракционные, 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 пластинки возвращающийся луч  $ca$ . Оба луча, которые идут теперь вдоль  $ad$ , возникли из одного луча  $sa$ , поэтому когерентны и могут интерферировать. Если прибор вместе с Землей 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  $a_1e$