

У. И. Франкфурт

ОПТИКА ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД
И СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Введение

Появлению специальной теории относительности (СТО) способствовало развитие двух областей физики — электродинамики и оптики движущихся сред. В них рассматривался один и тот же вопрос: влияет ли движение системы отсчета на характер наблюдаемых электромагнитных и оптических явлений? Для каждой из этих областей были характерны особые экспериментальные и теоретические методы, в каждой были свои традиционные проблемы, и представляется возможным рассмотреть отдельно их вклад в зарождение и развитие СТО ^{1,2}.

Изучение работ XVIII—XIX вв. приводит к следующим выводам.

1. Основной целью оптики движущихся сред (ОДС) были поиски способа обнаружения абсолютного движения Земли, т. е. ее движения относительно эфира.

2. Вопрос о влиянии движения источника на скорость испускаемого им света решался чисто теоретически в зависимости от принятой теории света: положительно — в эмиссионной (корпускулярной) теории и отрицательно — в волновой. Проверить эти гипотезы экспериментально было невозможно.

3. Для решения проблем оптики и электродинамики движущихся сред Эйнштейн ³ предложил теорию, отличающуюся внутренней стройностью и логической непротиворечивостью и опирающуюся на принципиально новые для этой эпохи постулаты. Для устранения кажущегося противоречия между постулатами своей теории Эйнштейн

¹ Франкфурт У. И. Очерки по истории специальной теории относительности. М.: Изд-во АН СССР, 1961.

² Франкфурт У. И., Френк А. М. Оптика движущихся тел. М.: Наука, 1972.

³ Einstein A. Zur Elektrodynamik der bewegter Körper. — Ann. Physik, 1905, 17, S. 891—921. Рус. пер. в кн.: Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. Т. 1. М.: Наука, 1965, с. 7—35.

тщательно проанализировал считавшиеся ранее очевидными понятия одновременности, длины тел, длительности событий и другие и показал, что новые пространственно-временные представления не противоречат, а расширяют пределы классической физики.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИКИ ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД В XVIII—XIX ВВ.

1. Открытие аберрации и ее объяснение в эмиссионной и волновой теориях света

Вопрос о том, влияет ли движение источника или наблюдателя на характер воспринимаемых явлений, мог быть поставлен только после открытия конечности скорости света. Хотя это открытие было сделано Рёмером на основе наблюдений затмений спутников Юпитера в 1675 г., но большой разброс результатов наблюдений вызывал немало сомнений даже в начале XVIII в. Только открытие аберрации звезд, сделанное Брэдли в 1728 г., убедило всех в конечности скорости света и положило начало оптике движущихся сред.

Первоначальной целью наблюдений Брэдли⁴, начатых им совместно с Молине, было открытие годичного параллакса звезд, т. е. их видимого смещения на небесной сфере, обусловленного движением Земли вокруг Солнца. Он действительно обнаружил годичное движение ряда звезд вблизи полюса эклиптики по кругу или эллипсу. Однако искомое параллактическое смещение в период наблюдения должно было происходить в направлении, противоположном наблюдаемому. Кроме того, оно должно было отличаться для звезд, удаленных на разные расстояния от Земли, в то время как Брэдли получил, что угловая величина большой полуоси эллипса для всех наблюдавшихся звезд лежит в пределах от 20 до 20,5". Отсюда Брэдли сделал вывод, что новое явление не связано с годичным параллаксом и величина последнего должна быть менее 1". Проверив возможность влияния атмосферной рефракции, нутации земной оси и других при-

⁴ *Bradley J. A new apparent motion discovered in the fixed stars; its cause assigned; the velocity and equable motion of light deduced.*— *Phil. Trans.*, 1728, 35, p. 637—653.

чин, Брэдли в конце концов пришел к выводу, что единственно возможное объяснение видимого годовичного движения звезд состоит в сочетании конечной скорости света и движения наблюдателя. Суть его объяснения такова.

Пусть свет распространяется от звезды C к наблюдателю A со скоростью c . Если наблюдатель неподвижен, его телескоп направлен по AC . Если наблюдатель движется по направлению AB со скоростью v , он увидит звезду только при условии, что направит телескоп по направлению AB , образуя с AC угол аберрации φ такой, что

$$\sin \varphi = v/c. \quad (1)$$

Максимальный угол аберрации получил название «постоянной аберрации».

Из своих наблюдений Брэдли сделал важный вывод о равенстве скорости света от различных звезд. Сопоставив найденную им скорость света со скоростью, измеренной по методу Рёмера, где наблюдался свет Солнца, отраженный от спутника, Брэдли пришел к заключению о том, что при отражении света его скорость не меняется (он допустил, что скорость прямого света от Солнца такая же, как от звезд). Последний вывод был обоснован плохо из-за большой неточности измерений в ту эпоху по методу Рёмера.

Убеждение Брэдли в постоянстве скорости света от различных источников было для XVIII в. скорее исключением, чем правилом. В господствовавшей в тот период в оптике эмиссионной теории свет уподоблялся поступательному движению твердых тел, и на него переносились законы механики. Явно или неявно все объяснения аберрации включают в себя сложение скорости света и скорости источника относительно наблюдателя.

Возможность подобного сложения скоростей неизбежно должна была привести к мысли о неравенстве скоростей света от различных источников. Для проверки этой гипотезы Блэйр предлагал измерить скорость света от противоположных краев Юпитера, быстро вращающегося вокруг своей оси. Подобную идею высказывал и Робинсон ⁵.

⁵ *Robinson J.* On the motion of light, as affected by refracting and reflecting substances, which are also in motion.— *Trans. Roy. Soc. Edinb.*, 1790, 2, p. 83—111.

Мичелл ⁶ полагал, что возможны и физические причины, изменяющие скорость света. Допуская, что световые частицы подчиняются закону всемирного тяготения, он вывел, что звезды, более массивные, чем Солнце, могут заметно уменьшить скорость испускаемого ими света, а если звезда в 500 раз больше Солнца, то свет ее будет возвращаться назад — звезда будет невидимой. Полагая очень важным измерение скорости света звезд для возможного определения массы звезд и их расстояния от Солнца, Мичелл предложил для сравнения скорости света от разных источников измерять его преломление в призме, поскольку показатель преломления n зависит от скорости света ($n = c/v$).

Наряду с практическим применением в астрономии явление аберрации нашло неожиданное применение при разрешении спора между эмиссионной и волновой теориями света. С точки зрения эмиссионной теории при переходе света из оптически менее плотной среды в более плотную его скорость должна увеличиваться, а согласно волновой теории — уменьшаться.

В 1766 г. Боскович ⁷ и несколько позднее независимо от него П. Вильсон ⁸ предложили для экспериментального решения этого спора наблюдать аберрацию звезд или земных источников с помощью телескопов, заполненных водой. Боскович рассуждал так: если в воде скорость света больше, чем в воздухе, то наблюдаемая аберрация должна быть меньше, чем в обычном телескопе. В противоположность Босковичу Вильсон доказывал, что, если аберрация в водяном телескопе будет такой же, как в воздушном, именно это будет свидетельством увеличения скорости света в воде. Робинсон полагал, что водяной телескоп дает ту же аберрацию, что и воздушный, он отрицал су-

⁶ *Michell J.* On the means of discovering the distance, magnitude of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their Light, in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be further necessary for that purpose.— *Phil. Trans.*, 1784, 74, p. 35—49.

⁷ *Lalande J.* *Astronomie*, v. 4. Paris, 1784, p. 687.

⁸ *Wilson P.* An experiment proposed for determining, by the aberration of the fixed stars, whether the rays of light, in pervading different media, change their velocity according to the Law which results from Sir Isaac Newton's ideas concerning the cause of refraction; and for ascertaining their velocity in every medium whose refractive density is known.— *Phil. Trans.*, 1872, 72, p. 58—68.

ществование суточной аберрации земных объектов. В своих рассуждениях Робинсон исходил из исследований влияния движения источника света на распространение света, в частности он рассмотрел отражение и преломление света на движущейся поверхности.

Первым опытом, специально поставленным для сравнения скоростей света от разных источников (звезд, планет), был опыт Араго 1810 г. Для этой цели Араго использовал идею Мичелла: в телескоп, снабженный призмой, наблюдались звезды, расположенные в направлении движения Земли вокруг Солнца и в противоположном направлении. Араго ожидал, что в самом худшем случае, когда звезды испускают свет с одинаковой скоростью (Араго верил в зависимость скорости света от массы звезды и ее скорости), различие преломления позволит обнаружить изменение скорости от $c - v$ до $c + v$ (c — скорость света, v — скорость движения Земли вокруг Солнца).

Опыт дал отрицательный результат, и Араго был так удивлен этим, что даже не опубликовал отчет о нем, ограничившись кратким сообщением в Академии наук⁹. Полное описание опыта было опубликовано только в 1853 г.¹⁰ Чтобы примирить полученный результат с эмиссионной теорией, Араго предложил следующую гипотезу: звезды испускают свет с различными скоростями, но глаз способен воспринимать свет только в очень узком диапазоне скоростей. Впоследствии, перейдя на сторону волновой теории, Араго предложил в 1818 г. Френелю дать волновое объяснение своего опыта.

Френель¹¹ рассмотрел проблему под совершенно иным углом зрения: влияние движения Земли на характер наблюдаемых на ней оптических явлений. В такой трактовке опыт Араго и вошел в историю. Работа Френеля положила начало новому этапу в развитии ОДС.

Объяснить аберрацию и другие оптические явления в движущихся телах оказалось гораздо труднее в волновой теории, чем в эмиссионной. Согласно волновой теории свет — это волны в особой среде, эфире. Эфир заполняет как пустоту, так и все тела, но с различной плот-

⁹ Mém. de l'Inst., 1811, p. 12.

¹⁰ Arago F. D. Mémoire sur la vitesse de la lumière.— Ann. Chim., (3), 1853, 37, p. 180—196.

¹¹ Френель О. Письмо к Ф. Араго относительно влияния движения Земли на некоторые оптические явления, 1818.— В кн.: Френель О. Избранные труды по оптике. М.: ГТТИ, 1955, с. 516—526.

ностью или упругостью (по гипотезе Френеля, изменялась только плотность эфира). Скорость света V в некоторой среде зависит от упругости эфира k и его плотности в этой среде ρ :

$$V = \sqrt{k/\rho}. \quad (2)$$

Межзвездный эфир считается неподвижным и образует систему отсчета для измерения скорости света. Скорость света в движущемся теле зависит от того, увлекает ли оно свой внутренний эфир, а явление аберрации от того, увлекает ли движущаяся Земля окружающий эфир.

Наиболее простой представлялась гипотеза полного увлечения: тела увлекают за собой эфир подобно тому, как Земля увлекает все находящиеся на ней тела и атмосферу. В этом случае все оптические явления при движении тел происходят точно так же, как в покое, и опыт Араго легко объясним. Однако аберрацию звезд объяснить нельзя.

Это обстоятельство послужило причиной того, что Юнг отверг гипотезу полного увлечения и допустил, что движущаяся Земля не влияет на состояние эфира, который проходит через нее так же легко, как ветер сквозь рощу¹².

Тогда аберрация объяснима. Пусть Земля покоится, а эфирный ветер дует в направлении MP со скоростью v . Он смещает световые волны в этом направлении, и для того, чтобы они попали в глаз наблюдателя, телескоп нужно наклонить на угол φ такой, что $\sin \varphi = v/c$. При этом нормаль к волновому фронту будет наклоняться к лучу и образует с ним угол, равный углу аберрации.

Объяснить одновременно опыт Араго и аберрацию на основе рассмотренных гипотез полностью увлекающегося или неподвижного эфира не представлялось возможным. Френель показал, что это можно сделать, если угол поворота фронта преломленной волны, вызванного движением призмы, равен углу аберрации. По мнению Френеля, это реализуется в случае, когда скорость света в движущейся прозрачной среде V определяется следующим образом:

$$V = V' + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right), \quad (3)$$

¹² Young T. Experiments and calculations relative to physical optics. — Phil. Trans., 1804, p. 1—16.

где V' — скорость света в неподвижной среде, v — скорость среды относительно неподвижного эфира, n — показатель преломления. Все происходит так, как будто эфир внутри тела движется относительно внешнего эфира со скоростью $v(1 - 1/n^2)$, т. е. медленнее, чем само тело. Гипотеза Френеля получила название «гипотезы частичного увлечения эфира», а множитель $1 - 1/n^2$ получил название «коэффициента увлечения».

Частичное увлечение эфира Френель понимал в том смысле, что движущееся тело увлекает с собой не весь содержащийся в нем эфир, а только ту часть, которая соответствует превышению плотности эфира в теле над его плотностью в окружающей среде. Эта трактовка частичного увлечения нередко подвергалась критике. Стокс ¹³, Беер ¹⁴, Буссинеск ¹⁵, Кеттелер ¹⁶, Фойгт ¹⁷ предлагали свои интерпретации, но все они не посягали на справедливость формулы Френеля (3).

В рассмотренной теории Френеля можно выделить следующие основные положения: 1) внешний эфир совершенно не увлекается неподвижными телами; 2) внутренний эфир почти не увлекается непрозрачными телами; 3) внутренний эфир частично увлекается прозрачными телами. Эта теория получила в истории название «теории неподвижного эфира». В 30—40-х годах XIX в. при изучении дисперсии света и других явлений накопилось немало фактов, которые свидетельствовали о наличии взаимодействия между частицами тел и эфира.

В связи с этим Коши ¹⁸ считал маловероятным отсутствие влияния движущихся тел на внешний эфир. Более перспективной он считал гипотезу полного увлечения эфира. Чтобы эта гипотеза не противоречила явлению абберации, Коши предположил, что плотность эфирной

¹³ *Stokes G.* On Fresnel's theory of the aberration of light.— *Phil. Mag.*, 1845, 28 (3), p. 76—81.

¹⁴ *Beer A.* Über die Vorstellungen vom Verhalten des Aethers in Bewegten Mitteln.— *Ann. Physik*, 1855, 94, S. 428—434.

¹⁵ *Boussinesq J.* Théorie nouvelle des ondes lumineuses.— *J. Math.*, 1868, 13 (2), p. 313—339, 425—438.

¹⁶ *Ketteler E.* Astronomische Undulationstheorie oder die Lehre von der Aberration des Lichtes. Bonn, 1873.

¹⁷ *Voigt W.* Theorie des Lichtes für bewegte Medien.— *Gött. Nachr.*, 1887, S. 177—237.

¹⁸ *Cauchy A.* Note sur l'égalité des réfractions de deux rayons lumineux qui émanent de deux étoiles situées dans deux portions opposées de l'écliptique.— *C. r.*, 1839, 8, p. 327—329.

атмосферы, окружающей тела, убывает по мере удаления от тел, и соответственно этому изменяется скорость света.

Первую математическую теорию аберрации на основе полного увлечения эфира дал Стокс ¹⁹. Скорость эфира вблизи поверхности Земли принималась равной скорости Земли. По мере удаления от Земли она убывает до нуля. Допустив, что движение эфира, увлекаемого Землей, безвихревое, Стокс получил правильное выражение для угла аберрации. Он отметил, что поступательное движение Солнечной системы вместе с заполняющим ее эфиром не повлияет на годичную аберрацию звезд.

Челлис ²⁰ возражал Стоксу. По его мнению, волновая теория должна обосновать закон аберрации при любом движении эфира, а не только при том специальном, которое предложил Стокс. Челлис предпочитал исходить в объяснении аберрации из прямолинейности распространения света от звезды до наблюдателя, как обоснованного экспериментально.

Со временем Стокс ²¹ пришел к выводу, что существования потенциала скоростей достаточно для объяснения аберрации и без допущения о равенстве скорости эфира вблизи Земли и скорости Земли, однако он не развил эту теорию. Для прозрачных тел Стокс ²² принял гипотезу Френеля о частичном увлечении эфира и на ее основе показал в более общем виде, чем Френель, что законы отражения и преломления света в первом порядке по v/c выполняются на движущейся поверхности. Теория Стокса получила название «теории увлекаемого эфира».

Стокс считал слабым местом теории Френеля движение эфира сквозь массивные непрозрачные тела и полагал, что только эксперимент может решить спор между двумя теориями.

¹⁹ *Stokes G.* On the aberration of light.— *Phil. Mag.*, 1845, 27 (3), p. 9—15.

²⁰ *Challis Z.* A theoretical explanation of the aberration of light.— *Phil. Mag.*, 1845, 27 (3), p. 321—327.

²¹ *Stokes G.* On the constitution of the luminiferous aether, viewed with reference to the phenomenon of the aberration of light.— *Phil. Mag.*, 1846, 29 (3), p. 6—10.

²² См. ссылку 13.

2. Экспериментальная проверка теории частичного увлечения

Эпоха экспериментальной проверки началась в 1851 г. с опыта Физо²³. Физо поставил целью выяснить, какая из гипотез об увлечении эфира справедлива для движущихся преломляющих тел. Интерференционным методом он измерял скорость света, распространявшегося в движущейся воде вдоль течения и против течения (описание опыта см. в²⁴). Аналогичный опыт он провел с движущимся воздухом. С точностью до 15% была подтверждена формула Френеля для коэффициента увлечения.

Опыт Физо сыграл очень важную роль в развитии ОДС. В теоретическом плане он продемонстрировал справедливость теории частичного увлечения. В экспериментальном плане он продемонстрировал значение для ОДС интерферометра как очень чувствительного прибора. Опыт Физо открыл эпоху опытов первого порядка по v/c , в которых выяснялось в рамках волновой теории влияние движения источника света, наблюдателя или прибора. Во всех этих опытах сравнивались эффекты, создаваемые в различных приборах лучами света, падающими на прибор в направлении, совпадающем с направлением движения Земли или в противоположном направлении.

Рассмотрим, какие цели преследовались в этих опытах. В одной группе опытов ставилась задача выбора между теориями неподвижного и увлекаемого эфира. К ним относятся интерференционные опыты Бабинне²⁵ и Физо, исследования Хэггинса²⁶ по изучению преломления в призме и др. Продолжением опыта Физо 1851 г. явился его опыт 1859 г. Установив справедливость теории частичного увлечения для жидких и газообразных сред, Физо решил проверить ее для твердых тел. Для этой цели он использовал явление поворота плоскости поляризации при преломлении поляризованного света на границе двух сред. Угол поворота зависит от показателя преломления среды,

²³ *Fizeau H.* Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux et sur un experiment qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse, avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur.— *C. r.*, 1851, 33, p. 349—355.

²⁴ *Франкфурт У. И., Френк А. М.* Оптика движущихся сред. М.: Наука, 1972, с. 31—35.

²⁵ *Babinet J.* Sur l'aberration de la lumière.— *C. r.*, 1839, 8, p. 774.

²⁶ *Huggins W.* Observations on the spectra of some of the stars and nebulae.— *Phil. Trans.*, 1868, 158, p. 529—564.

а последний — от скорости света в данной среде. По мнению Физо, изменение ориентации прибора относительно направления поступательного движения Земли должно было изменить относительную скорость света в среде. Проанализировав результаты 2000 опытов, Физо ²⁷ в 1859 г. объявил о подтверждении формулы Френеля и о наличии влияния движения Земли на поворот плоскости поляризации. Никто не мог обнаружить ошибку в этих опытах, а трудность их постановки была столь велика, что только через 43 года они были повторены и дали отрицательный результат.

Другая группа опытов стимулировалась потребностями астрономии, в частности необходимостью уточнения постоянной аберрации.

По этому поводу вновь вспыхнула дискуссия о возможных результатах опыта Босковича. Хотя Френель показал, что и в эмиссионной, и в волновой теории результат опыта должен быть отрицательным независимо от используемого источника света, Клинкерфус ²⁸ в 1867 г. предложил новую волновую теорию распространения света в преломляющей среде, согласно которой наблюдаемая постоянная аберрации тем больше, чем больше величина задержки, которую испытывает свет в водяном телескопе по сравнению с воздушным. Поводом для создания этой теории послужило сопоставление постоянных аберрации, опубликованных Деламбром и В. Струве. Деламбр обработал около тысячи наблюдений затмений спутников Юпитера за 150 лет и вывел постоянную аберрации в $20,255''$. В. Струве на основе наблюдений в Пулковской обсерватории в 1840—1842 гг. получил постоянную, равную $20,445'' \pm 0,011''$. Различие в $0,19''$ выходило далеко за пределы ошибок эксперимента, и Клинкерфус объяснил его тем, что телескопы XIX в. имеют более толстые объективы, чем телескопы XVIII в.

Хук ²⁹ возражал ему, ссылаясь на неточность метода Рёмера. Клинкерфус настаивал на опытной проверке, и

²⁷ *Fizeau H.* Sur une méthode propre à rechercher sur l'azimut de polarisation du rayon réfracté est influencé par le mouvement du corps réfringent.— C. r., 1859, 49, p. 717—723.

²⁸ *Klinkerfues W.* Untersuchungen aus der analytischen Optik, insbesondere über den Einfluss der Bewegung der Lichtquelle auf die Brechung.— Astr. Nachr., 1866, 66, S. 337—366.

²⁹ *Hoek M.* Sur la différence entre les valeurs de la constante de l'aberration d'après Delambre et Struve.— Astr. Nachr., 1867, 70, p. 193—194; 1869, 73, p. 193—200.

в 1868 г. Хук³⁰ поставил опыт, в котором наблюдал земной источник света в телескоп через двухметровый столб воды. Отсутствие предполагаемого сдвига изображения, обусловленного суточным вращением Земли, Хук объяснил на основе теории Френеля. Он пришел к выводу, что френелевский коэффициент увлечения справедлив с точностью до 2%.

Для уточнения величины коэффициента увлечения Хук³¹ поставил интерференционный опыт (см. описание в³²). Отрицательный результат этого опыта он интерпретировал как доказательство истинности коэффициента увлечения с точностью до 1,5%.

В свою очередь Клинкерфус³³ поставил аналогичный опыт с 8-дюймовым столбом воды и получил увеличение постоянной аберрации на 7,1" (по его теории ожидалось увеличение на 8").

Для разрешения этого противоречия серию точных опытов провел в 1871—1872 гг. Эйри³⁴. Он наблюдал звезду вблизи зенита с помощью вертикально установленного телескопа высотой 35,3 дюйма, заполненного водой. По теории Клинкерфуса за полгода угловое смещение звезды должно было составить около 30", в то время как на опыте смещение не превышало 1" и лежало в пределах ошибок эксперимента.

Третья группа опытов была связана с попытками измерить скорость движения Земли относительно эфира. Перспективным в этом отношении казались дифракционные опыты. Например, Бабине³⁵ показал, что за счет движения дифракционной решетки дифрагированный луч

³⁰ *Hoek M.* Détermination de la vitesse avec laquelle est entraînée une onde lumineuse traversant un milieu en mouvement.— Arch. Néerl., 1868, 3, p. 180—185.

³¹ *Hoek M.* Détermination de la vitesse avec laquelle est entraînée un rayon lumineux, traversant un milieu en mouvement.— Arch. Néerl., 1869, 4, p. 443—450.

³² *Франкфурт У. И., Френк А. М.* Указ. соч., с. 29—30.

³³ *Klinkerfues W.* Versuche über die Bewegung der Erde und der Sonne im Aether.— Astr. Nachr., 1870, 76, N 1803, S. 33—38.

³⁴ *Airy G. B.* On a supposed alteration in the amount of astronomical aberration of light, produced by the passage of the light through a considerable thickness of refracting medium.— Proc. Roy. Soc., 1871, 20, p. 35—39.

³⁵ *Babinet J.* Sur la paragénie ou propagation latérale de la lumière et sur la deviation que les rayons paragéniques éprouvent sous l'influence du mouvement de la terre.— Cosmos, 1864, 25, p. 421—429.

отклоняется, и это отклонение происходит в том же направлении, что и за счет аберрации. По расчетам Бабинс, отклонение дифрагированного луча при изменении направления падающего луча относительно направления движения Земли на противоположное достигало 12,6". Бабине надеялся этим методом уточнить направление и скорость движения Солнечной системы, однако осуществить задуманные опыты ему не довелось.

Ангстрем³⁶ на основе теории, аналогичной теории Бабине, пришел к выводу, что для его решетки смещение дифрагированного луча за счет движения Земли вокруг Солнца должно составлять 7". На опыте Ангстрем получил большие смещения, которые он объяснил влиянием движения Солнечной системы к созвездию Геркулеса со скоростью, примерно равной $\frac{1}{3}$ орбитальной скорости Земли.

Однако в опытах Клинкерфуса 1870 г. не обнаружилось влияния движения Земли на дифракцию света. В спор вступил Маскар, утверждая, что ошибка теорий Бабине и Ангстрема состояла в отсутствии учета изменения длины волны согласно принципу Доплера.

3. Принцип Доплера

В 1842 г. профессор из Праги Х. Доплер³⁷ задался целью выяснить, почему среди двойных звезд часто обе звезды окрашены во взаимно дополнительные цвета. Он предположил, что обе звезды — белые, но одна из них кажется нам голубоватой, потому что движется к нам, а другая — красноватой, потому что движется от нас. По терминологии Доплера, наблюдатель, покоящийся относительно источника, воспринимает «абсолютный» цвет, а движущийся наблюдатель воспринимает «кажущийся» цвет. Исходя из гипотезы неподвижного эфира, он получил, что период колебаний T , воспринимаемый движущимся наблюдателем, и период колебаний T_0 , воспринимаемый неподвижным наблюдателем, связаны для случая движущегося наблюдателя и покоящегося источника

³⁶ *Angström A. J.* On a new determination of the lengths of waves of light, and on a method of determining, by optics, the translatory motion of the Solar system. — *Phil. Mag.*, 1865, 29 (4), p. 489—504.

³⁷ *Doppler Ch.* Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger andern Gestirne des Himmels. — *Abh. Böhm. Ges.*, 1842, 2, S. 465—482.

соотношением

$$T = \frac{T_0}{1 \pm \beta}, \quad \beta = \frac{v}{c},$$

а для случая движущегося источника и покоящегося наблюдателя

$$T = T_0 (1 \mp \beta).$$

Верхний знак соответствует взаимному сближению, нижний — взаимному удалению. Если направление волны образует с направлением движения угол φ , то вместо v следует брать $v \cos \varphi$.

Доплер распространил свой принцип на все виды волн. Для звука он был проверен экспериментально в 1845—1848 гг. Бейс-Баллотом, Скоттом, Расселом и Физо. Применение этого принципа к объяснению цветов двойных звезд вызвало возражения астрономов, особенно изменение вида сплошного спектра.

Физо³⁸ в 1848 г. высказал мысль, что движение небесных тел относительно Земли можно обнаружить с помощью линейчатого, а не сплошного спектра, наблюдая смещение спектральных линий. Эта идея, сыгравшая важнейшую роль в астрономии, была признана не сразу. Только в 60-х годах, после открытия спектрального анализа, когда изучение спектров звезд и других небесных тел становится актуальным, принцип Доплера начинают применять для определения радиальных скоростей небесных тел. В 1868 г. Хаггинс определил смещение водородной линии в спектре Сириуса относительно той же линии в гейслеровской трубке и нашел, что скорость Сириуса относительно Земли составляет 41,4 миль/с.

Первые попытки экспериментальной проверки применимости принципа Доплера в оптике были сделаны Секки и Фогелем в 1870—1871 гг. Они показали, что линейная скорость краев солнечного диска, определенная спектральным путем, равна 2 км/с, что совпадало со значением, найденным из движения солнечных пятен. Точность опытов была невелика, но это не помешало физикам и астрономам широко использовать принцип Доплера. Первое убедительное подтверждение принципа Доплера в земных условиях было дано только в 1898—1900 гг. А. Белопольским.

³⁸ Fizeau H. Extraites des proces-verbaux de séances de Soc. Philom. de Paris, 1848, p. 81—83.

Не следует преувеличивать роль экспериментальной проверки принципа Доплера. При этой проверке исходили из некоторых положений, истинность которых была недостаточно проверена. Например, и в астрономических наблюдениях, и в лабораторных опытах исходили из теории отражения света от движущихся зеркал. Но теория эта дает однозначные результаты только при определенных допущениях об увлечении эфира, что само являлось предметом исследования. Многие рассматривали принцип Доплера как эвристический, справедливость которого можно проверить по всей совокупности результатов его применения. Теоретическая интерпретация принципа зависела от конкретной теории: в СТО, например, смысл принципа Доплера не такой, как в теории неподвижного эфира. Неправильная интерпретация принципа Доплера была причиной многих ошибок в истолковании результатов экспериментов. Одну из них допустил Маскар³⁹.

Маскар писал: «С точки зрения влияния, которое может оказать движение Земли на оптические явления, солнечный свет, отраженный в произвольном направлении, ведет себя точно так, как свет земного источника того же периода»⁴⁰.

Вывод Маскара был верен, но длины волн, воспринимаемые решеткой, он указал неверно. В действительности свет земного источника, покоящегося относительно наблюдателя, воспринимается с длиной волны λ_0 , а солнечный свет после отражения от неподвижного зеркала также сохраняет длину волны λ_0 .

Маскар полагал, что если в расчеты Бабине ввести измененную длину волны света, падающего на решетку, то получится независимость угла дифракции от движения Земли. Однако Маскар ошибался. Позднее Лодж⁴¹ показал, что зависимость угла дифракции от движения решетки появляется только во втором порядке по β . Следовательно, теория Бабине ошибочна и все дифракцион-

³⁹ Mascart E. Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuses et du mouvement de l'observateur. — Ann. l'Ecole Normale, 1872, 1 (2), p. 155—214; 1874, 3, p. 363—420.

⁴⁰ Ibid., p. 180.

⁴¹ Lodge O. Aberration problems. — A discussion concerning the motion of the ether near the Earth, and concerning the connexion between ether and gross matter; with some new experiments. — Phil. Trans., 1893, 184A, p. 749—804.

ные опыты первого порядка по β не могут обнаружить абсолютного движения Земли.

Впоследствии Маскар⁴² пришел к правильному выводу о том, что доплер-эффект обусловлен не абсолютным движением источника света, а относительным движением источника и наблюдателя.

Ошибка Маскара была характерной для той эпохи. Клинкерфус⁴³ повторил ее в интерпретации спектра поглощения. Он полагал, что если излучение D -линии натрия проходит кювету с парами брома поочередно по направлению движения Земли или в противоположном направлении, это должно изменить наблюдаемую длину волны. Хотя Клинкерфус получил сдвиг в 5 раз меньше предполагаемого, он считал его реальным, ибо он лежал за пределами ошибок измерения. С выводом Клинкерфуса соглашался Кеттелер⁴⁴. Ошибка в этом опыте была обнаружена только через 30 лет.

4. Интерпретация опытов первого порядка в 60—70-е годы XIX в.

Положительные результаты опытов Физо (1859), Ангстрема и Клинкерфуса были исключением среди всех опытов 60—70-х годов, отрицавших влияние движения Земли на оптические явления. Кроме уже упоминавшихся, следует отметить интерференционный опыт Кеттелера⁴⁵ и Зельмейера и Кеттелера⁴⁶ по двойному преломлению.

Новые результаты, полученные Маскаром, побудили Парижскую академию наук избрать для очередного математического конкурса 1872 г. тему: «Экспериментально обнаружить изменения, испытываемые светом при его распространении, и его свойства, вытекающие из движения источника света и движения наблюдателя». Премия была присуждена в 1873 г. Маскару. В отчете об итогах конкурса Физо отметил, что премия присуждается Маскару, «несмотря на то, что автор не получил всего, что искал, а именно — проявления движения Земли в пространстве»⁴⁷.

⁴² Mascart E. *Traité d'Optique*, v. 3. Paris, 1893, p. 91.

⁴³ См. ссылку 33.

⁴⁴ Ketteler E. *Op. cit.*

⁴⁵ *Ibid.*, p. 67.

⁴⁶ Ketteler E. *Theoretische Optik*. Braunschweig, 1885, S. 534.

⁴⁷ Fizeau H. *Grand Prix des Sciences Mathématiques*. — C. r., 1874, 79, p. 1534.

Маскар сформулировал итоги своих наблюдений так: «...поступательное движение Земли не оказывает никакого заметного влияния на оптические явления, производимые с земным источником или с солнечным светом ...эти явления не дают нам средства обнаружить абсолютное движение тел ...относительные движения — единственные, которые мы способны обнаружить»⁴⁸.

Отрицательные результаты большинства опытов по изучению влияния движения Земли на оптические явления к концу 70-х годов сформировали среди физиков убеждение в том, что обнаружить абсолютное движение Земли невозможно, хотя не все отваживались делать столь решительные заключения, как Маскар. Чтобы перейти от констатации невозможности обнаружить абсолютное движение Земли к принципу относительности для оптических явлений, нужно было сделать один, но очень трудный шаг. В рассматриваемую эпоху этот шаг не был сделан. Никто не оперировал такими понятиями, как «независимость оптических явлений от движения системы отсчета», даже в ограниченном смысле, т. е. в первом порядке по β .

На этом фоне интересным выглядит следующее заявление Физо, сделанное в упоминавшемся выше отчете по поводу оптических явлений, используемых для обнаружения движения Земли: «...для каждого явления этого рода, которое первоначально кажется дающим положительный результат, находятся компенсирующие причины, аннулирующие его. И в самом деле (кроме одного из двух исключений, результаты которых остаются сомнительными) все опыты этого рода приводят к полностью отрицательным результатам, *как будто некий общий закон природы всегда препятствует их успеху*»⁴⁹.

Выделенные слова как будто предвосхищают путь Эйнштейна, отказавшегося от понятия «абсолютное движение». Однако, если учесть первую часть цитаты, представляется, что все-таки Физо был ближе к Лоренцу, считавшему, что абсолютное движение существует, но оно не обнаружимо из-за действия компенсирующих факторов.

Интересно сопоставить мнение теоретиков в связи с отрицательными результатами опытов по обнаружению абсолютного движения Земли.

⁴⁸ Mascart E. Sur les modifications..., p. 420.

⁴⁹ Fizeau H. Grand Prix..., p. 1533.

Большая часть из них считала независимость оптических явлений от движения Земли доказанной экспериментально и выводила отсюда, например, формулу увлечения Френеля.

Другие решали обратную задачу: исходя из справедливости формулы Френеля, доказанной экспериментально, вывести независимость оптических явлений от движения Земли. Все расчеты при этом велись только в первом порядке по β ; видимо, никто не предполагал, что вскоре станут реальностью опыты второго порядка.

В 1873 г. Фельтман⁵⁰ предложил следующее доказательство независимости любых интерференционных явлений от движения Земли.

Элемент волнового фронта, испытывая многократные отражения и преломления,

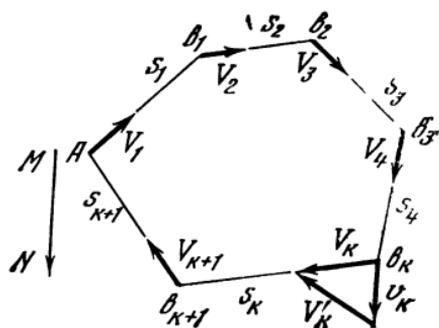


Рис. 1

замкнутый многоугольник $Ab_1b_2 \dots b_{k+1}$ (рис. 1). Обозначим соответствующие пути и скорости на отдельных участках s_1, s_2, \dots ; $V_1, V_2 \dots$. Пусть вся среда движется в направлении MN и каждая точка приобретает за счет движения среды скорость v_k , образующую угол φ_k со скоростью V_k . Скорость этой точки V'_k относительно неподвижного эфира является результирующей скоростей V_k и v_k . С точностью до второго порядка по v_k/V_k получим

$$V'_k = V_k + v_k \cos \varphi_k.$$

Отсюда

$$t_k = \frac{s_k}{V'_k} = \frac{s_k}{V_k + v_k \cos \varphi_k} \simeq \frac{s_k}{V_k} \left(1 - \frac{v_k}{V_k} \cos \varphi_k \right).$$

Полное время распространения света по замкнутому пути равно

$$T = \sum t_k = \sum \frac{s_k}{V_k} - \sum \frac{v_k}{V_k^2} s_k \cos \varphi_k.$$

⁵⁰ *Veltmann W.* Über die Fortpflanzung des Lichtes in bewegten Medien.— *Ann. Physik*, 1873, **150**, S. 497—535.

Покажем, что

$$\frac{v_k}{V_k^2} = \text{const.}$$

Из неразрывности струн эфира на границе двух сред следует (ρ — плотность эфира)

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2.$$

При постоянной упругости эфира из формулы (2) имеем

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{V_2^2}{V_1^2}.$$

Отсюда

$$\frac{v_1}{V_1^2} = \frac{v_2}{V_2^2} = \text{const.}$$

Учитывая, что

$$\sum s_k \cos \varphi_k = 0,$$

получим

$$\sum \frac{s_k}{V_k'} = \sum \frac{s_k}{V_k},$$

т. е. время распространения света по замкнутому пути не зависит от движения системы отсчета.

Позднее это доказали на основе тех же предпосылок Потье⁵¹ и Лоренц⁵², причем оба указывали на приоритет Фельтмана. В связи с этим выглядит странной попытка некоторых современных авторов присвоить этой теореме название «принцип Потье»⁵³.

⁵¹ *Potier A.* Conséquences de la formule de Fresnel relative à l'entraînement de l'éther par les milieux transparents.— *J. Phys.*, 1874, **3**, p. 201—204.

⁵² *Lorentz H. A.* De l'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux.— *Arch. Néere*, 1887, **21**, p. 103—176.

⁵³ *Newburgh R., Costa O. de Beauregard.* Experimental search for anisotropy in the speed of light.— *Amer. J. Phys.*, 1975, **43**, N 6, p. 528—530.

ОПТИКА ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД В КОНЦЕ XIX И НАЧАЛЕ XX В.

1. Опыт Майкельсона второго порядка и его повторения. Контракционная гипотеза

Новая эпоха в истории ОДС — эпоха опытов второго порядка — началась с опыта Майкельсона 1881 г. Майкельсон ставил цель обнаружить абсолютное движение Земли. Поскольку было ясно, что опыты первого порядка для этого не пригодны, он решил попытаться поставить опыт второго порядка. О реальности подобных опытов никто не думал. Об этом достаточно красноречиво говорит письмо Максвелла к Тодду, опубликованное в 1880 г.: «Лабораторные методы определения скорости света связаны с возвращением света назад по тому же пути, так что скорость Земли относительно эфира меняет время двойного прохождения на величину, зависящую от квадрата отношения скорости Земли к скорости света, а эта величина слишком мала, чтобы ее наблюдать»⁵⁴.

Между тем интерферометрические методы, способные в принципе измерить столь малый эффект ($\beta^2 = 10^{-8}$), применялись давно, но многочисленные трудности подобных опытов способны были отпугнуть любого. Майкельсон дерзнул на постановку такого опыта. Первый свой интерферометр он собрал в апреле 1881 г. в период работы в лаборатории Гельмгольца.

Тонкий пучок света от источника света максимально монохроматического падает на плоскопараллельную пластинку M с полупосеребренной задней поверхностью (рис. 2). При этом часть света (примерно половина) отражается, направляясь к плоскому зеркалу S_1 , вторая часть проходит к такому же зеркалу S_2 . Отражаясь от зеркал, оба луча возвращаются к пластинке M , откуда по общему пути попадают в трубу F . Когерентность лучей обеспечивает образование интерференционной картины, вид которой зависит от разности оптических путей, приобретаемой лучами при прохождении плеч интерферометра MS_1M и соответственно MS_2M . Пластинка P , одинаковая с M , служит просто компенсатором (оба луча трижды прохо-

⁵⁴ *Maxwell J.* Letter to Dr. Todd.— *Nature*, 1880, 21, p. 317.

дят толщю пластинки). Зеркало S_1 , установленное на салазках, может перемещаться параллельно самому себе по очень аккуратно сделанным рельсам. Движение осуществляется с помощью червячной передачи. Неподвижное зеркало S_2 снабжено винтами для установки относительно вертикальной и горизонтальной осей. Если зеркала S_1 и S_2 можно было бы установить точно перпендикулярно, то при интерференции получились бы полосы равного на-

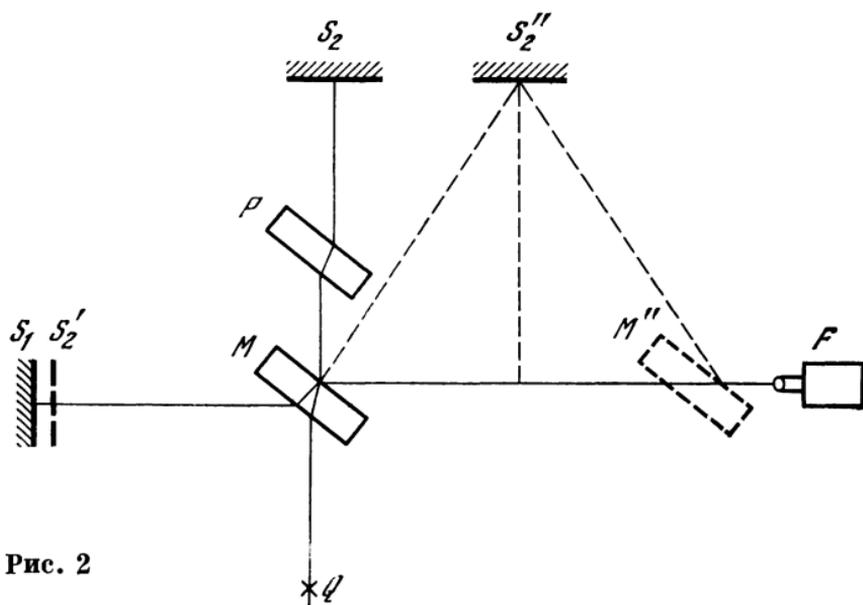


Рис. 2

клона (концентрические окружности), соответствующие воздушной пластинке S_1S_2' , где S_2' — изображение S_2 в зеркале M . Толщина зазора равна разности длин плеч. Однако подобная точная установка затруднительна, S_1 и S_2 не строго параллельны, и получаются полосы равной толщины. Любое изменение в разности хода лучей приведет к смещению полос в интерференционной картине.

Поскольку в формулы, определяющие ширину интерференционных полос и их смещение, входит длина световой волны λ ($6 \cdot 10^{-5}$ см), можно было бы надеяться наблюдать даже очень тонкие эффекты порядка $(v/c)^2 = \beta^2$.

Идея Майкельсона заключалась в том, чтобы обнаружить смещение интерференционных полос, обусловленное движением Земли относительно эфира. Для этого прибор устанавливался таким образом, чтобы одно плечо (например, L_1) располагалось в момент опыта точно вдоль направления орбитального движения Земли, а второе — соответ-

ственно перпендикулярно. Тогда нетрудно вычислить запаздывание одного луча по сравнению с другим (вычисления производятся в системе, связанной с предполагаемым неподвижным эфиром).

Время t' , необходимое лучу для прохождения пути MS_1 и обратно (t''), будет

$$t' = \frac{L_1}{c - v}, \quad t'' = \frac{L_1}{c + v},$$

а общее время

$$t_1 = t' + t'' = \frac{L_1}{c - v} + \frac{L_1}{c + v} = \frac{2L_1}{c} \cdot \frac{1}{1 - \beta^2}.$$

Луч, идущий перпендикулярно направлению движения Земли, пройдет путь $MS_2''M''$ (S_2'' и M'' — положения зеркала и пластинки в момент, когда от них отражается луч). Если обозначить t_2 общее время, затраченное вторым лучом, то общий путь

$$MS_2'' + S_2''M'' = 2\sqrt{L_2^2 + \left(\frac{vt_2}{2}\right)^2} = \sqrt{4L_2^2 + v^2t_2^2},$$

откуда

$$t_2 = \frac{\sqrt{4L_2^2 + v^2t_2^2}}{c}, \quad t_2 = \sqrt{\frac{4L_2^2}{c^2 - v^2}} \approx \frac{2L_2}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Разность времен

$$\Delta_1 t = t_1 - t_2 = \frac{2}{c} \left(\frac{L_1}{1 - \beta^2} - \frac{L_2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right).$$

Но полученная вследствие этой разности интерференционная картина ни о чем не говорит, ибо ее нельзя сравнить с картиной, которая получилась бы при отсутствии эфирного ветра (если допустить, что последний действительно существует, — а именно из этого исходил Майкельсон, — то его никак нельзя устранить). Поэтому в реальном опыте вся установка поворачивалась на 90° , так что плечи менялись местами. Во втором положении разность времен

$$\Delta_2 t = \frac{2}{c} \left(\frac{L_2}{1 - \beta^2} - \frac{L_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right),$$

так что общее смещение полос будет соответствовать раз-

ности времен

$$\Delta t = \Delta_1 t + \Delta_2 t = \frac{2}{c} (L_1 + L_2) \left(\frac{1}{1 - \beta^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \approx \frac{L_1 + L_2}{c} \beta^2$$

(с точностью до членов второго порядка). Расстояние между двумя интерференционными полосами соответствует разности времен в один период $T = \lambda/c$, поэтому в долях ширины полосы смещение составит

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{L_1 + L_2}{\lambda} \beta^2.$$

Нетрудно оценить эту величину. В основных опытах Майкельсона длина плеч доходила до 11 м, а $\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ см. Значит,

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{2 \cdot 11 \cdot 10^2}{6 \cdot 10^{-5}} 10^{-8} \approx 0,36^{55}.$$

Такую величину можно было уже обнаружить.

В первых опытах, проведенных Майкельсоном в Берлине, установка оказалась слишком чувствительной к внешним источникам вибраций. Например, движение городского транспорта или смена караула императорской гвардии вызывали смещения, перекрывающие искомые. Поэтому установка была перенесена в подвал Потсдамской обсерватории, где и были получены первые результаты. Хотя Майкельсону они позволили сделать вывод, что эфирный ветер не обнаружен, на самом деле серия опытов 1881 г. не может считаться убедительной. Ошибки измерений были того же порядка, что и ожидаемое значение величины. Вывод Майкельсона об отсутствии «эфирного ветра», т. е. о том, что теория неподвижного эфира неверна, был скорее угадан, чем обоснован.

Вскоре после публикации опыта Майкельсон зимой 1881/82 г. провел несколько месяцев в Париже, где Потье обратил его внимание на то, что в опыте не учтено движение зеркала вместе с Землей. Майкельсон внес исправления и получил результат в 2 раза меньше.

Заметку Майкельсона с исправленным результатом Корню представил в «Comptes rendus»⁵⁶. В этой же заметке

⁵⁵ *Michelson A.* The relative motion of the Earth and the luminiferous aether.— *Amer. J. Phys.*, 1881, 22, p. 120—129.

⁵⁶ *Michelson A.* Sur le mouvement relatif de la Terre et de l'éther.— *C. r.*, 1882, 94, p. 520—523.

содержались ценные сведения об особенностях опыта, в частности о том, что в зависимости от установки зеркал можно наблюдать либо прямолинейные полосы, либо круговые, эллиптические, параболические и гиперболические.

Майкельсон демонстрировал свой интерферометр выдающимся французским экспериментаторам — Маскару, Корню, Липману, но не произвел на них впечатления. Бросалась в глаза чувствительность прибора к различным помехам, обусловленная, в частности, тем, что оба луча шли различными путями и на них могли оказывать влияние местные флуктуации температуры, упругости и т. д. Французы привыкли к схеме Физо, многократно повторенной потом, где лучи шли одинаковыми путями и действие неоднородностей уничтожалось. Подобное отношение встретил Майкельсон и в Америке. Так как новый прибор и полученный в опыте результат оказались непризнанными, Майкельсон утратил интерес к повторным опытам ⁵⁷.

Вывод Майкельсона о том, что теория неподвижного эфира неверна, должен был прозвучать как гром с ясного неба. Гипотеза Френеля о частичном увлечении эфира так хорошо вписывалась в теорию ОДС, что никто не сомневался в справедливости и второй части этой гипотезы — о неподвижности внешнего эфира. Усомниться в справедливости гипотезы Френеля означало усомниться в справедливости опыта Физо. И Майкельсон в 1886 г. повторяет опыт Физо, измеряя скорость света в движущейся среде. Опыт подтвердил формулу Френеля с точностью до 5% ⁵⁸.

Как же совместить частичное увлечение эфира внутри тел и полное снаружи? Этой проблеме посвятил свою работу «Влияние движения Земли на световые явления» Лоренц в 1886 г. ⁵⁹

Лоренц критикует теорию Стокса о полном увлечении эфира. Он указывает, что из уравнений гидродинамики несжимаемой жидкости следует, что, если задан потенциал скоростей и нормальная компонента скорости, то тангенциальные компоненты скорости эфира и Земли не могут быть равными. Следует заметить, что ссылка Лоренца на гидродинамику не очень убедительна, ибо свойства эфира

⁵⁷ *Shankland R. S.* Michelson — Morley experiment.— Amer. J. Phys., 1964, 32, N 1, 16—35.

⁵⁸ *Michelson A. A.* Influence of motion of the medium on the velocity of light.— Amer. J. Sci., 1886, 31 (3), p. 377—386.

⁵⁹ *Lorentz H.* Op. cit.

значительно больше походили на свойства твердого тела и трактовались теоретиками, как правило, на основе теории упругости. Лоренц предлагает свою модификацию теории Стокса: 1) существует потенциал скоростей, 2) скорость эфира вне тела убывает с расстоянием, но у поверхности Земли скорости Земли и эфира не равны (это тоже одна из идей Стокса), 3) сохраняется частичное увлечение эфира внутри тел по Френелю. На основе этой теории Лоренц показывает, что в первом приближении движение Земли не должно оказывать влияния на оптические явления. Лоренц считает, что опыт Майкельсона не опровергает его теорию. Он показывает, что действительное значение смещения должно быть вдвое меньшим, чем было указано, и попадало бы в область ошибок, а это значит, что если бы и был эфирный ветер меньше 30 км/с (как следует по Лоренцу), то Майкельсон его бы не обнаружил.

На работу Майкельсона откликнулся Фойгт⁶⁰, но он допустил ошибку, оставшуюся незамеченной.

В 1887 г. лорд Рэлей обратил внимание Майкельсона на статью Лоренца и предложил повторить эксперимент. Воодушевленный этой поддержкой, Майкельсон в сотрудничестве с Морли⁶¹ за 3 месяца собрали усовершенствованную установку и повторили опыт в Кливленде. Для увеличения чувствительности интерферометра путь лучей был увеличен в 4 раза за счет четырехкратного отражения от зеркал. Для уменьшения влияния вибраций основание было сделано весьма массивным и плавало в ртути. Малое трение позволило привести прибор в очень медленное непрерывное вращение и считывать показания на ходу, чтобы повторяющимися толчками не создавать деформаций плеч интерферометра. В опыте было $L = 2 \cdot 10^7 \lambda$, ожидаемое смещение — 0,4 полосы. Наблюдаемое смещение было, по оценке Майкельсона, в 20 раз меньше, что соответствовало скорости эфирного ветра не более 5—7 км/с. Майкельсон сделал вывод об ошибочности и теории Френеля, и теории Лоренца. Он допускал, что движение Солнечной системы может частично компенсировать движение Земли относительно эфира, и для получения достоверного результата считал желательным повторить опыт через 3 месяца.

⁶⁰ Voigt W. Op. cit., S. 239.

⁶¹ Michelson A. A. On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether.— Amer. J. Sci., 1887, 34 (3), p. 333—345; Phil. Mag., 1887, 24 (5), p. 449—463.

Майкельсон был разочарован результатами своего опыта. Хотя ему удалось показать неудовлетворительность существующей теории эфира, он не достиг основной своей цели: обнаружить с помощью интерферометра абсолютное движение Земли, или, иными словами, движение Солнечной системы относительно эфира. В дополнении к статье видно, что Майкельсон отныне возлагает свои надежды на иные способы, связанные с астрономическими наблюдениями. Разочарование Майкельсона в результатах своих опытов по обнаружению эфирного ветра нашло характерное отражение в его докладе на заседании Американской академии искусств и наук в 1906 г.⁶²: рассказывая о многочисленных применениях своего интерферометра в науке и технике, Майкельсон даже не упомянул о своих опытах по обнаружению эфирного ветра.

В 1887 г. у Майкельсона еще оставалась надежда на то, что если эфир полностью увлекается у поверхности Земли, то, быть может, он отстает на некоторой высоте над Землей. В 1897 г. Майкельсон⁶³ провел опыт с вертикально расположенным интерферометром, в котором луч света часть пути проходил на высоте 50 футов над Землей. При допущении некоторого экспоненциального убывания скорости эфира с высотой ожидалось смещение в 7,2 полосы, а наблюдалось смещение около 0,05 полосы. Если считать, что этот эффект был связан с эфирным ветром, то приходилось допустить, что влияние Земли на эфир простирается на расстояние порядка диаметра Земли. Это выглядело столь невероятным, что многие предпочли вернуться к теории Френеля, пытаясь согласовать ее иным способом с отрицательными результатами прежних опытов. Майкельсон отдавал себе отчет, что для более достоверного установления закона убывания скорости эфира с высотой нужны дополнительные опыты. Он намеревался повторить их, но эти намерения не осуществились.

Не видя иного способа согласования теории Френеля с отсутствием эфирного ветра, Лоренц⁶⁴ предложил в 1892 г. новую гипотезу, получившую название «контрак-

⁶² *Michelson A. A.* A plea for light waves. — Proc. Amer. Acad. Arts a. Sci., 1906, 41, p. 67—78.

⁶³ *Michelson A. A.* The relative motion of the Earth and the ether. — Amer. J. Sci., 1897, 3 (4), p. 475—478.

⁶⁴ *Lorentz H. A.* The relative motion of the Earth and the Ether. — Versl. K. Akad. W. Amsterdam, 1892, 1, p. 74; Coll. Papers, v. 4. Hague, 1935, p. 219—223.

ционной». Он полагал, что движение Земли относительно эфира может влиять на величину сил молекулярного взаимодействия, а через них — на длину тел. Чтобы объяснить нулевую разность хода в опыте Майкельсона, пришлось допустить, что длина любого тела (в том числе плеча интерферометра) в направлении движения уменьшается сравнительно с истинной величиной по следующему закону:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \simeq l_0 \left(1 - \frac{v^2}{2c^2}\right).$$

В дальнейшем Лоренц обосновал свою гипотезу на основе электронной теории. Как сообщил в 1893 г. Лодж ⁶⁵, подобную гипотезу излагал несколько лет на своих лекциях в Дублине Фитцджеральд.

Результат опыта Майкельсона — Морли лорд Кельвин оценил на Международном физическом конгрессе в Париже в 1900 г. как «очень густое облако» над динамической теорией тепла и света. Спасение он видел в контракционной гипотезе. Лорд Кельвин предложил Морли и Миллеру повторить опыт с более чувствительным интерферометром.

Морли и Миллер построили новый интерферометр, у которого за счет увеличения оптического пути чувствительность была увеличена в 3 раза. В 1902—1904 гг. они проверяли зависимость лоренцевского сокращения от материала, из которого изготовлены плечи интерферометра. Интерференционный сдвиг оказался практически одинаковым при применении сосны и песчаника, эфирный ветер не превышал 3,5 км/с⁶⁶. В 1905 г. был получен тот же результат для стали. Поскольку об увлечении эфира непрозрачными телами ничего не было известно, можно было предположить, что большая толщина вещества (стен здания, например) может быть причиной увлечения эфира. Подобную гипотезу высказывал еще в 1887 г. Майкельсон в письме Рэлею как возможное объяснение результатов своего опыта. Он допускал, что эфир может задерживаться во впадинах между холмами и т. д. Поэтому Морли и Мил-

⁶⁵ *Lodge O.* Op. cit., p. 749.

⁶⁶ *Morley E. W., Miller D. C.* Extract from a letter dated Cleveland, Ohio, August 5th, 1904, to Lord Kelvin. — *Phil. Mag.*, 1904, 8 (6), p. 753—754.

лер ⁶⁷ решили повторить свой опыт на вершине холма и в таком помещении, где имеются большие окна в нужных направлениях. Опыты дали скорость эфирного ветра до 8,7 км/с, но результаты эти были опубликованы гораздо позже.

2. Опыты первого порядка на рубеже XX в.

Опыты Майкельсона—Морли оставили открытым вопрос: только ли Земля увлекает за собой эфир или это свойственно всем движущимся телам? Лодж ⁶⁸ полагал, что при вращении тел эффект должен наблюдаться уже в первом порядке по β .

В опыте Лоджа два стальных одинаковых диска, разделенных небольшим промежутком, вращались с большой скоростью вокруг вертикальной оси (до 300 об/мин). Луч света расщеплялся на два луча, которые пробегали вблизи периферии дисков замкнутые пути в противоположных направлениях, отражаясь от трех зеркал и затем интерферируя. Вся оптическая система была неподвижна. Если бы вращающиеся диски увлекали за собой эфир, то должен был наблюдаться сдвиг интерференционных полос, величина и направление которого должны зависеть от направления и скорости вращения. Наблюдались очень малые смещения полос, соответствовавшие скорости эфира в $1/200$ окружной скорости дисков. Лодж сделал вывод о неподвижности эфира, а смещение объяснил температурным и другими эффектами.

Попытки значительного увеличения массы вращающегося тела (до 700 кг), намагничивания и электризации не дали результатов: эфир по-прежнему не увлекался.

Тогда Лодж предложил для обнаружения эфирного ветра иной вариант: установить свой интерферометр вместе с наблюдателем на вращающуюся площадку. По его расчетам, даже при скорости вращения 4 об/мин уже можно было бы обнаружить сдвиг полос ⁶⁹.

Опыт Лоджа показал, что небольшие вращающиеся тела не увлекают эфир. Но, может быть, очень массивные

⁶⁷ *Morley E. W., Miller D. C.* Report of an experiment to detect the Fitzgerald — Lorentz effect.— *Phil. Mag.*, 1905, 9 (6), p. 680—685; *Proc. Amer. Acad. Sci.*, 1905, 41, p. 321—327.

⁶⁸ *Lodge O.* *Op. cit.*

⁶⁹ *Lodge O.* Experiments on the absence of mechanical connexion between Ether and matter.— *Phil. Trans.*, 1897, A, p. 149—166.

вращающиеся тела, такие, как Земля, все же увлекают эфир? Лодж⁷⁰ рассчитал, что за счет вращения Земли с помощью квадратного интерферометра со стороной в 1 км можно получить на средних широтах сдвиг более чем в одну полосу. Но как обнаружить этот сдвиг? Лодж этого не знал.

Проблему решил в 1904 г. Майкельсон⁷¹. Он предложил ввести дополнительный контур, размеры которого были бы столь малы, чтобы смещением его интерференционных полос можно было пренебречь. Теперь стало возможным рассматривать искомый сдвиг как расстояние между центральными полосами обеих интерференционных систем. Осуществлен опыт только через 20 лет.

В связи с тем, что опыт Майкельсона по проверке увлечения эфира противоречил предшествовавшим опытам, вновь были подвергнуты пересмотру опыты первого порядка.

В 1886 г. Лоренц⁷² теоретически показал, что большая часть оптических явлений в первом порядке не должна испытывать влияния движения Земли. Он исходил из теории движущегося относительно Земли эфира, в котором существует потенциал скоростей, и френелевского частичного увлечения эфира прозрачными телами. Поскольку частичное увлечение можно не везде применить (анизотропные тела, поглощение света и др.), вывод Лоренца не был всеобщим. В 1892 г. он обобщил свою теорию преломления на анизотропные тела и пришел к выводу, что вращение плоскости поляризации должно быть подвержено влиянию движения Земли⁷³. Лармор⁷⁴ возразил ему и предложил провести экспериментальную проверку. Лоренц продолжал отстаивать свою точку зрения⁷⁵.

В этот же период Вахсмут и Шенрок⁷⁶ подвергли кри-

⁷⁰ *Lodge O.* Aberration problems...— *Phil. Trans.*, 1893, 184A, p. 773.

⁷¹ *Michelson A.* Relative motion of Earth and ether.— *Phil. Mag.*, 1904, 8 (6), p. 716—719.

⁷² *Lorentz H.* *Op. cit.*

⁷³ *Lorentz H. A.* On the influence of the Earth's motion on the propagation of light in doubly refracting bodies (1892).— *Coll. Papers*, v. 4. Hague, 1935, p. 232.

⁷⁴ *Larmor J.* *Aether and matter.* Cambridge, 1900, p. 214.

⁷⁵ *Lorentz H. A.* The rotation of the plane of polarization in moving media (1902).— *Coll. Papers*, v. 5. Hague, 1935, p. 156.

⁷⁶ *Wachsmuth R., Schönrock O.* Beiträge zu einer Wiederholung des Mascart'schen Versuches.— *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, 1902, N 8, S. 183—188.

тическому анализу опыты Маскара по вращению плоскости поляризации. По их мнению, точность опытов была недостаточной для уверенного отрицательного вывода. Подобного мнения придерживался и Рэлей ⁷⁷.

В 1902 г. Рэлей поставил эксперимент, в котором с точностью до 10^{-5} показал отсутствие влияния ориентации кристалла относительно направления движения Земли на вращение плоскости поляризации. Месяцем позже Рэлей ⁷⁸ поставил опыт второго порядка по двойному преломлению. Идея опыта заключалась в следующем: если справедлива контракционная гипотеза, то при некоторой ориентации твердых или жидких тел в них должна возникнуть искусственная анизотропия, как и при механической деформации. При этом изотропное тело должно приобретать способность к двойному преломлению. Опыт показал, что с точностью $1,2 \cdot 10^{-10}$ для бисульфида углерода и $0,3 \cdot 10^{-8}$ для стекла двойное преломление при движении сквозь эфир не возникает.

В связи с тем, что ожидаемый эффект лоренцевского сокращения был $0,5 \cdot 10^{-8}$, результаты, полученные для стекла Рэлеем, показались малоубедительными. В 1904 г. Брэйс ⁷⁹ значительно увеличил чувствительность поляриметра, но не обнаружил никакого сжатия ни у воды, ни у стекла. Он сделал вывод о том, что «контракционная гипотеза не может объяснить отрицательные результаты интерференционных опытов».

Брэйс ⁸⁰ повторил опыт Рэлея по вращению плоскости поляризации некоторых жидкостей и констатировал отсутствие влияния движения Земли с точностью до $2 \cdot 10^{-7}$.

В 1898 г. на заседании Немецкого общества естествоиспытателей и врачей в Дюссельдорфе в докладах В. Вина и Г. Лоренца ⁸¹ дан обзор проблемы увлечения эфира и высказано пожелание повторить опыт Физо по повороту

⁷⁷ *Lord Rayleigh*. Is rotatory polarization influenced by the Earth's motion? — *Phil. Mag.*, 1902, 4, p. 215—220.

⁷⁸ *Lord Rayleigh*. Does motion through the aether cause double refraction.— *Phil. Mag.*, 1902, 4 (6), p. 678—683.

⁷⁹ *Brace D. B.* On double refraction in matter moving through the aether.— *Phil. Mag.*, 1904, 7 (6), p. 317—328.

⁸⁰ *Brace D. B.* The aether «Drift» and rotatory polarization.— *Phil. Mag.*, 1905, 10 (6), p. 383—396.

⁸¹ *Wien W., Lorentz H. A.* Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen.— *Verh. Ges. Deutsch. Naturforsch.*, 1898, 2 Th., S. 49—65.

плоскости поляризации преломленного луча и опыт Клинкерфуса по сдвигу линий в спектре поглощения.

В 1905 г. Брэйс⁸² повторил опыт Физо. При повороте прибора на 180° ожидаемое вращение составляло $0,024^\circ$, наблюдалось на опыте в среднем $-0,003^\circ$, что позволяло сделать вывод об отсутствии эффекта. Штрассер считал, что у Брэйса слишком велик разброс результатов и метод нуждается в совершенствовании. В 1907 г. Штрассер⁸³ поставил последнюю точку в этом эксперименте: при ожидаемом вращении $1,4^\circ$ он наблюдал вращение в пределах от $-0,001$ до $+0,018^\circ$. Отрицательный вывод больше не вызывал сомнений.

Опыт Клинкерфуса повторил в 1901 г. Хага⁸⁴. Наблюдаемый им сдвиг линий поглощения брома при изменении ориентации прибора составил $1/300$ ожидаемой величины и лежал в пределах экспериментальных ошибок. Таким образом, и в опыте Клинкерфуса эффект движения Земли отсутствовал.

Такова была ситуация в ОДС ко времени появления специальной теории относительности (СТО).

3. Отношение физиков к опыту Майкельсона до 1905 г.

В своей фундаментальной работе «К электродинамике движущихся тел» А. Эйнштейн указал, что распространению принципа относительности на оптику и электродинамику содействовали и «неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно „светоносной среды“»⁸⁵. Эйнштейн никогда не конкретизировал, какие именно опыты он имел в виду. Неоднократное обсуждение в литературе этого вопроса не привело к определенному выводу.

Представляет интерес уточнить, насколько же были обоснованы экспериментально в рамках ОДС выдвинутые Эйнштейном постулаты. В частности, особый интерес

⁸² *Brace D. B.* A repetition of Fizeau's experiment on the change produced by the Earth's motion on the rotation of a refracted ray. — *Phil. Mag.*, 1905, **10** (6), p. 591—599.

⁸³ *Strasser B.* Der Fizeausche Versuch über die Änderung des Polarisationsazimuts eines gebrochenen Strahles durch die Bewegung der Erde. — *Ann. Physik*, 1907, **24**, S. 137—144.

⁸⁴ *Haga H.* L'expérience de Klinkerfues. — *Arch. Néerl.*, 1902, **6** (2), p. 765—772.

⁸⁵ *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов, т. 1. М.: Наука, 1965, с. 7.

представляет оценка роли опыта Майкельсона в возникновении первого постулата — принципа относительности.

Вошло в традицию считать опыт Майкельсона основной причиной появления принципа относительности. Исследования Холтона⁸⁶, основанные по преимуществу на анализе высказываний Эйнштейна, показали, что опыт Майкельсона не сыграл заметной роли в появлении СТО.

В 1898 г. Сазерленд⁸⁷ выступил с критикой интерпретации опыта Майкельсона—Морли. По его мнению, заметное смещение полос можно наблюдать только при определенной юстировке зеркал интерферометра, в частности изображения источников в зеркалах не должны совпадать, а глаз должен находиться на оси симметрии этих изображений. При другой юстировке чувствительность прибора должна заметно уменьшиться. Именно неправильную юстировку Сазерленд считал причиной отрицательного результата опыта. Сазерленду возразил Лодж⁸⁸.

Детальную теорию опыта Майкельсона дал в 1902 г. Хикс⁸⁹. Хикс учитывал аберрацию света, изменение угла отражения при отражении от движущейся пластинки, изменение длины волны при отражении и т. п. Хикс пришел к выводу, что при некоторой величине и направлении скорости эфирного дрейфа смещение полос имеет характер, соответствующий не сжатию, а удлинению плеча интерферометра. По мнению Хикса, при наблюдении интерференционной картины изображение на сетчатке глаза, воспринимаемое как центральная полоса, может в действительности соответствовать боковой полосе. Хикс считал, что избежать подобных искажений можно только заменив глаз и зрительную трубу фотографическим методом регистрации. Хикс полагал статистический метод обработки результатов наблюдений в опыте Майкельсона—Морли некорректным. Из этих же данных можно было, по его мнению, получить и положительный резуль-

⁸⁶ Холтон Д. Эйнштейн, Майкельсон и «решающий» эксперимент.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1972. М.: Наука, 1974, с. 104—211.

⁸⁷ Sutherland W. Relative motion of the Earth and aether.— Phil. Mag., 1898, 45, p. 23—31.

⁸⁸ Lodge O. Note on Mr. Sutherland's objection to the conclusiveness of the Michelson — Morley aether experiment.— Phil. Mag., 46, p. 343—344.

⁸⁹ Hicks W. M. On the Michelson — Morley experiment of the drift of the aether.— Phil. Mag., 3 (6), p. 9—42, 556.

тат. Для уменьшения роли температурных флуктуаций он предлагал провести опыт в вакууме.

В дискуссии по статье Хикса выяснилось, что полученное им противоречие с контракционной гипотезой обусловлено математической ошибкой⁹⁰.

Картмел⁹¹ считал, что оптическая иллюзия, предсказанная Хиксом, не существует, ибо ее легко можно было бы обнаружить на опыте. С этой иллюзией у Хикса в математическом выражении для координат интерференционных полос был связан член первого порядка. Картмел категорически отрицал возможность присутствия такого члена, ссылаясь на то, что предшествующие экспериментальные и теоретические работы доказали отсутствие влияния движения Земли в первом порядке. Это высказывание весьма интересно, ибо было сделано до появления теории относительности, в рамках теории эфира.

Оказывается, появление члена первого порядка в формуле Хикса и его теории «оптической иллюзии» было обусловлено неверной трактовкой понятия длины волны в движущихся средах. У Хикса при отражении от каждого зеркала изменяется длина волны, и в итоге интерферируют волны разных длин. Отсюда следовало, что, проходя некоторое расстояние в оптической системе, лучи могут приобрести дополнительную разность фаз по сравнению с существующей в плоскости интерференции. Различие длин волн, по Хиксу, не служит препятствием для интерференции, ибо частоты обеих волн равны, различие длин волн обуславливается различием их скоростей. Причина ошибки, видимо, была в том, что Хикс измерял длину волны по нормали к волновому фронту вместо того, чтобы измерять ее вдоль луча.

В ответ на критику Хикса Морли и Миллер⁹² показали в 1905 г., что большая часть предлагаемых поправок дает члены третьего порядка, которые нельзя обнаружить на опыте, а во втором порядке обе теории совпадают.

Независимо от точности измерения скорости эфирного ветра было ясно, что эта скорость меньше 30 км/с, т. е. гипотезу неподвижного эфира — основу теории эфира — нужно оставить. Только Майкельсон, Морли и Миллер

⁹⁰ *Hicks W. M.* The Fitzgerald — Lorentz effect. — *Nature*, 1902, 65, N 1685, p. 343.

⁹¹ *Cartmel W. B.* On the Michelson — Morley experiment. — *Phil. Mag.*, 1902, 3 (6), p. 555—556.

⁹² См. ссылку 66.

занимались в этот период попытками обнаружить поступательное движение Земли относительно эфира. Все они были единомышленниками, сотрудниками, использовали одни и те же идеи, методы и частично даже оборудование. Опыты типа опыта Лоджа, связанные с вращением, имели свои особенности, и здесь мы их не рассматриваем. Единственным опытом, в котором был применен обычный интерферометр Майкельсона для обнаружения движения эфира, был опыт Трелфолла и Поллака⁹³ в 1896 г. В опыте проверялось, не связано ли рентгеновское излучение с движением эфира. Впрочем, этот опыт не имел никакого отношения к эфирному ветру.

Каковы могли быть причины подобного безразличия к контрольным опытам?

Можно допустить, что одной из причин была трудность работы с интерферометром Майкельсона. Но упоминавшиеся выше опыты начала века по двойному преломлению и вращению плоскости поляризации были тоже очень трудными, однако они ставились и тут же перепроверялись.

Можно допустить, что основной причиной доверия к результату, объявленному Майкельсоном, был его высокий авторитет экспериментатора. Но авторитет Физо был не менее высок, однако он не помешал поставить контрольные опыты в 1905—1906 гг. и показать, что опыты Физо 1859 г. были неточными.

Можно допустить, наконец, что основная причина была в том, что в известном смысле опыт Майкельсона не дал ничего нового, неожиданного, поэтому и перепроверять его не было нужды.

В самом деле, в чем состоял результат опыта с точки зрения экспериментатора? Прибор устанавливали в различных направлениях относительно направления поступательного движения Земли, но наблюдаемая картина не изменялась. Но то же самое десятки раз наблюдалось ранее в опытах первого порядка. К отсутствию влияния движения Земли экспериментаторы уже привыкли, и то, что этот вывод был подтвержден более чувствительным прибором, не должно было вызывать удивления. Удивление вызывал всякий положительный результат, например в опытах Физо или Клинкерфуса. Именно этим объясняется стремление перепроверить их. Полученные при перепро-

⁹³ *Threlfall R., Pollock J. On some experiments with Röntgen's radiation.— Phil. Mag., 1896, 42 (5), p. 453—463.*

верке отрицательные результаты никого не удивили, не вызвали возражений. Возражения вызывали только те отрицательные выводы, которые не были надежно обоснованы и которые можно было при желании толковать как положительные. Видимо, к 1905 г. представление о том, что движение Земли нельзя обнаружить оптическим путем, было общепринятым.

Возможно, именно этим объясняется отказ Морли и Миллера от публикации результатов опытов 1905 г., в которых был зафиксирован сравнительно большой эфирный ветер. Когда же Миллер подобный результат после тщательной проверки опубликовал в 1925 г., тогда и началась эпоха контрольных опытов.

Таким образом, достаточно вероятным является предположение, что опыт Майкельсона перед 1905 г. и не должен был произвести особого впечатления на Эйнштейна. Возможно, что Эйнштейн имел в виду в приведенной выше цитате опыты первого порядка. Появление СТО многими физиками было оценено как попытка объяснения отрицательного результата опыта Майкельсона: эту теорию ставили в один ряд с контракционной гипотезой. Подобная версия укоренилась в литературе, в частности в учебной: очень удобно методически выводить СТО из опыта Майкельсона.

4. Проблема постоянства скорости света

Перейдем к вопросу об экспериментальном обосновании второго постулата СТО — постоянства скорости света во всех инерциальных системах отсчета.

Что было известно о скорости света к 1905 г.? С точки зрения теории эфира скорость света определяется только упругостью и плотностью эфира, и в однородном и изотропном эфире она не должна зависеть ни от направления света, ни от движения источника света.

Казалось бы, теория эфира дает СТО второй постулат в готовом виде. В действительности дело обстояло значительно сложнее. Как узнать, обладает ли эфир свойствами однородности и изотропности? Проще всего об этом судить, измеряя скорость света в различных местах как на Земле, так и в космическом пространстве (в различных направлениях). Получается замкнутый круг. То, что в прозрачных телах эфир зачастую обладает неоднородностью и анизотропией, было основой многих эфирных теорий.

Эти отклонения состояния эфира от «нормального» объяснялись воздействием молекул тел. В межпланетном пространстве как будто не могло быть искажающих факторов, но их можно было ожидать в атмосфере звезд и планет.

У астрономов не было убежденности в необходимости постоянства скорости света от различных небесных тел. Публикуя результаты измерения постоянной абберации семи звезд, В. Струве указывал на одинаковость скорости света именно от этих звезд, воздерживаясь от обобщений. В 1872 г. Вилларсо⁹⁴ выдвинул гипотезу о том, что постоянная абберации для различных звезд неодинакова, по различие ее значений очень мало (менее 0,1"). Вилларсо предложил новую теорию абберации, в которой учитывается не относительное движение Солнечной системы (относительно нашей галактики), а ее абсолютное движение (относительно эфира). Постоянная абберации для звезд определяется так:

$$\alpha = \frac{k}{u \cos \varphi + \sqrt{c^2 - u^2 \sin^2 \varphi}},$$

где k — постоянная, зависящая от движения Земли вокруг Солнца, u — абсолютная скорость Солнечной системы, φ — угол между направлением на звезду и направлением абсолютного движения Солнца.

Определив постоянную абберации различных звезд, можно найти величину и направление абсолютной скорости Солнечной системы. Формула Вилларсо выведена им в предположении, что скорость света не зависит от направления в пространстве и от движения источника света.

С какой же точностью скорость света можно определить из наблюдений абберации? Длительное время считался образцовым результат В. Струве — (20,445 ± 0,011"). В 1853 г. он уточнил его: 20,463 ± 0,017". Новый анализ результатов измерений привел В. Струве в 1872 г. к величине 20,445 ± 0,017". Нирен в Пулкове получил различными методами величины 20,43"; 20,54"; 20,517" и сделал вывод о сезонной систематической ошибке. В 1885 г. Кюстнер в Берлине получил 20,313". В 1891 г. Леви в Пуизе новым методом вновь получил 20,445". Анализируя эти

⁹⁴ *Villarceau J.* Sur la constante de l'aberration et la vitesse de la lumière, considérées dans leurs rapports avec le mouvement absolu de translation du système solaire.— С. 1., 1872, 75, p. 854—860.

результаты, Маскар⁹⁵ пришел к выводу, что вероятная ошибка, видимо, не менее $0,1''$. Таким образом, абберационный метод позволял измерить скорость света с точностью не выше $5 \cdot 10^{-3}$.

Первые прямые эксперименты по измерению скорости света, проделанные Физо, Фуко, Корню, не отличались высокой точностью, погрешность составляла $200-500$ км/с. Более точными были измерения Майкельсона и Ньюкомба. В 1902 г. Майкельсон получил для скорости света величину $(299\ 890 \pm 60)$ км/с. Относительная ошибка составляла $2 \cdot 10^{-4}$.

Таким образом, прямые и косвенные методы измерения скорости света имели точность ниже, чем в оптических опытах первого порядка. Поэтому нельзя считать, что второй постулат СТО был достаточно строго обоснован экспериментально, что Эйнштейн извлек его непосредственно из опыта. Эйнштейн и сам признавался в беседе с Шенклядом, что выбор между постоянством скорости света и баллистической гипотезой был сделан им на основе математических соображений: он не мог составить дифференциальное уравнение, решение которого давало бы волны со скоростью, зависящей от скорости источника.

Глава 3

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ОДС В РАМКАХ СТО. ДИСКУССИЯ ВОКРУГ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. Абберация и доплер-эффект в теории Эйнштейна

Уже в первой работе по теории относительности Эйнштейн показал, что явление абберации света и эффект Доплера являются следствиями релятивистской кинематики.

Пусть штрихованная система отсчета связана с Землей, а нештрихованная — со звездой, причем угол между лучом света и направлением движения Земли в обеих системах соответственно α и α' . Тогда, учитывая преобразования координат и времени, при переходе от одной системы от-

⁹⁵ Mascart E.— Traité d'optique, 1893, 3, p. 60.

счета к другой получим

$$\cos \alpha' = \frac{\cos \alpha - \beta}{1 - \beta \cos \alpha}.$$

Разлагая в ряд по β правую часть в первом порядке, получим классическую формулу аберрации. Таким образом, с точки зрения СТО явление аберрации — это результат преобразования углов при переходе от одной инерциальной системы к другой.

Следствием инвариантности фазы световой волны при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой является преобразование частоты света (φ — угол между лучом света и направлением движения)

$$\nu' = \nu \frac{1 - \beta \cos \varphi}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Из этой релятивистской формулы для эффекта Доплера разложением в ряд по степеням β с учетом только членов первого порядка можно получить классическое выражение.

Простота, с которой в СТО объяснялись аберрация света и эффект Доплера, была неоспоримым доводом в пользу новой теории, однако отказ от эфира и необычность новых концепций пространства и времени создали СТО определенную оппозицию среди физиков. Одной из тем для дискуссии явилась релятивистская аберрация.

Антирелятивисты выдвинули следующие доводы против СТО. При наблюдении двойных звезд выяснилось, что угловое расстояние между звездами равно нулю тогда, когда равно нулю доплеровское смещение их спектральных линий. Это соответствует такому расположению звезд, когда обе звезды и Земля оказываются на одной прямой. Однако в этот момент скорости звезд направлены в противоположные стороны и аберрационное смещение их максимально, т. е. визуально они должны четко разделяться. Получается, что движение светила не играет роли, играет роль только движение наблюдателя, что противоречит СТО⁹⁶.

⁹⁶ *Tomaschek R.* Über Aberration und Absolutbewegung.— *Ann. Physik*, 1924, 74, p. 136—145; *Osten H.* Aberration und Relativität.— *Astr. Nachr.*, 1925, 224, S. 65—68; *Lenard P.* Ueber Äther Bewegungen und Aberration.— *Astr. Nachr.*, 1925, 224, S. 345—356; *Thirring H.* Relativität und Aberration — *Naturwis.*, 1925, 13, S. 445—447; *Emden R.* Aberration und Relativitätstheorie.— *Naturwis.*, 1926, 14, S. 329—335.

Ошибка заключалась в том, что СТО приписывалось утверждение о зависимости aberrации от скорости светила. В действительности скорость движения источника не входит в формулы теории aberrации. При наблюдении в одной инерциальной системе aberrация вообще не обнаруживается, она появляется только при переходе из одной инерциальной системы в другую. В этом смысле в СТО вообще aberrации нет, а появляется она только в ОТО, ибо движение Земли вокруг Солнца, являющееся причиной aberrации, ускоренно.

Копф⁹⁷ считал, что только с помощью опыта можно сделать выбор между классической и релятивистской теориями aberrации.

В классической теории aberrации в первом порядке имеем

$$\sin(\alpha' - \alpha) = \frac{v_e}{c} \sin \alpha_e \sin \alpha_s \left(1 - \frac{v_s}{c} \cos \alpha_s\right),$$

где $\alpha' - \alpha$ — угол aberrации, в СТО α — угол между направлением на звезду и направлением движения Земли в системе, связанной со звездой, α' — тот же угол в системе, связанной с Землей.

Здесь α_e и v_e относятся к движению Земли относительно Солнца, а α_s и v_s — к движению Солнечной системы относительно эфира.

В СТО имеем

$$\sin(\alpha' - \alpha) = \frac{v_e}{c} \sin \alpha_e \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v_s}{c} \cos \alpha_s\right).$$

По мнению Копфа, различие может достигать $0,07''$, что можно обнаружить экспериментально.

Эпштейн⁹⁸ показал, что различие между этими формулами в первом порядке только кажущееся. Оно существует во втором порядке, но слишком мало, чтобы быть обнаруженным.

Одним из поводов для критики СТО послужило изменение в интерпретации опытов по измерению скорости света в движущихся средах. В опыте Майкельсона—Морли 1886 г. коэффициент увлечения эфира, пересчитанный для

⁹⁷ *Kopff A.* Über eine Möglichkeit der Prüfung der speziellen Relativitätstheorie auf astronomischen Wege.— *Phys. Z.*, 1922, 23, S. 120—122.

⁹⁸ *Epstein P.* Zur Aberrationstheorie.— *Phys. Z.*, 1923, 24, S. 64—65.

излучения D -линии натрия, был равен $k = 0,437$, что согласовалось с формулой Френеля $k = 1 - 1/n^2$. Лоренц в 1895 г. показал, что с учетом дисперсии коэффициент увлечения принимает вид

$$k = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}.$$

По этой формуле для D -линии Na $k = 0,451$, что заметно отличалось от результатов Майкельсона—Морли.

Лауэ⁹⁹ показал, что с точностью до второго порядка теория относительности ведет к формуле Лоренца. Однако в этот же период появились и иные выражения¹⁰⁰ для коэффициента увлечения, дававшие значения, близкие к френелевским для воды, но заметно отличавшиеся для других сред. Появилась необходимость в опытной проверке. Эту задачу решил в 1914 г. Зеeman¹⁰¹; он подтвердил формулу Лоренца для воды с точностью до 2%.

В этот же период (1909—1911 гг.) Харрес измерил коэффициент увлечения для стекла. Поскольку наиболее просто осуществить для твердого тела вращательное, а не поступательное движение, Харрес расположил 10 стеклянных призм в виде замкнутого многоугольника на горизонтальной площадке, которая могла вращаться вокруг вертикальной оси. Луч света входил в многоугольник и выходил из него вдоль радиуса (рис. 3).

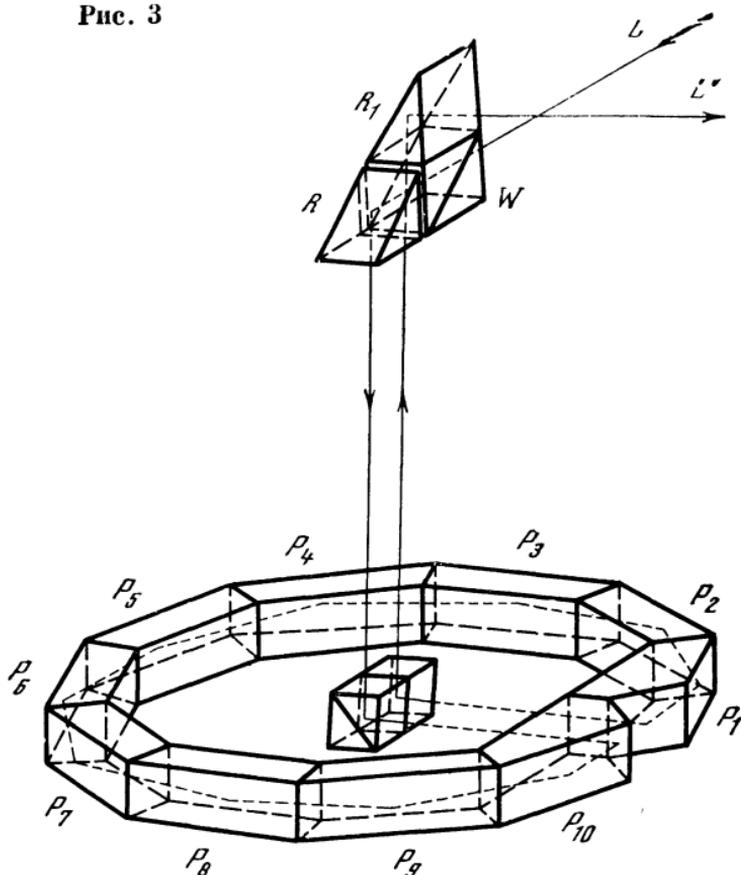
Результаты, сообщенные Харресом в его диссертации в 1912 г., не соответствовали ни формуле Френеля, ни формуле Лоренца. П. Харцер¹⁰² критически проанализировал теорию Харреса, внес изменения и показал, что экспериментальные результаты Харреса лучше удовлетворяют формуле Френеля, чем Лоренца. По его мнению, это было благом для астрономии, ибо наличие дисперсионного члена препятствовало правильному объяснению аберрации звезд.

⁹⁹ *Laue M.* Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip.— Ann. Physik, 1907, 23, S. 989—990; рус. пер. в кн.: *Лауэ М.* Статьи и речи. М.: Наука, 1969, с. 30—31.

¹⁰⁰ *Jaumann G.* Electromagnetische Theorie.— Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Math. Naturw. Kl., 1908, 117, S. 459.

¹⁰¹ *Zeeman P.* Fresnel's coefficient for light of different colours.— Proc. Kön. nederl. acad. wet. B, 1914—1915, 17, p. 445—451; 1915, 18, p. 398—408.

¹⁰² *Harzer P.* Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration.— Astr. Nachr., 1914, 198, S. 377—392.



Результаты Харцера для зеленого и красного света соответственно $k_1 = 0,5802 \pm 0,0020$; $k_2 = 0,5964 \pm 0,0015$; по Френелю имеем $k_1 = 0,5977$ и $k_2 = 0,5952$; по Лоренцу $k_1 = 0,6210$ и $k_2 = 0,6120$.

Харцер полагал, что эти результаты не подтверждают СТО, ибо, по его мнению, из СТО получается формула увлечения, совпадающая с лоренцевской.

Ясность в эту дискуссию внес в 1914 г. Эйнштейн¹⁰³. Он показал, что вид дисперсионного члена в коэффициенте увлечения зависит от условий опыта, в частности от угла между входящим лучом и направлением света в среде.

Согласно СТО, с точностью до второго порядка

$$V = V' (v') + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right),$$

¹⁰³ Эйнштейн А. Замечания к статье П. Харцера «Об увлечении света в стекле и об aberrации». — В кн.: Эйнштейн А. Собр. науч. трудов, т. 1. М.: Наука, 1965, с. 313—315.

где V' — скорость света в среде для наблюдателя, покоящегося в этой среде, ν' — частота света для этого наблюдателя, V — скорость света для движущегося наблюдателя. Изменение частоты света можно определить по принципу Доплера

$$\nu' = \nu (1 - \beta \cos \varphi).$$

1. Если луч движется параллельно направлению движения среды, то

$$\varphi = 0, \quad \nu' = \nu \left(1 - \frac{v}{c}\right);$$

$$V'(\nu') = V'(\nu) - \frac{\nu v}{c} \frac{dV'}{d\nu} = V'(\nu) - \frac{\lambda}{n^2} \frac{dn}{d\lambda} \nu;$$

$$V = V'(\nu) + \left(1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n^2} \frac{dn}{d\lambda}\right) \nu.$$

Отсюда получаем формулу Лауба¹⁰⁴

$$k = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n^2} \frac{dn}{d\lambda}.$$

2. Свет входит в тело перпендикулярно направлению движения среды (опыт Харреса): $\varphi = \pi/2$; $\nu' = \nu$;

$$V = V'(\nu) + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \nu; \quad k = 1 - \frac{1}{n^2}.$$

3. Опыт Физо (этот случай уже был рассмотрен Лауэ в 1907 г.). Теперь

$$\nu' = \nu (1 - v/V):$$

$$V'(\nu') = V'(\nu) - \frac{\nu v}{V} \frac{dV'}{d\nu};$$

$$V = V'(\nu) + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \nu - \frac{\nu v}{V} \frac{dV'}{d\nu}.$$

Отсюда приходим к формуле Лоренца

$$k = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}.$$

Таким образом, вопреки мнению Харцера, опыт Харреса подтверждал СТО.

Первый из рассмотренных Эйнштейном случаев относится к поступательному движению твердых тел. Подобные очень трудные опыты осуществил в 1922 г. Зеeman

¹⁰⁴ Laub I. Zur Optik der bewegten Körper.— Ann. Physik, 1908, 25 (4), S. 175—184.

с сотрудниками¹⁰⁵. Он проверял формулу Лауба, к которой приводят и СТО, и теория Лоренца. В опыте стеклянные или кварцевые цилиндры приводили с помощью кривошипно-шатунного механизма в поступательное движение со скоростью около 10 м/с. Интерференционная картина фотографировалась, и сравнивались смещения полос при изменении направления движения. Для монохроматизации света применялись интерференционные фильтры. Отклонения экспериментальных результатов от теоретических не превышали 3%, точность была достаточной для суждения о справедливости формулы Лауба и анализа Эйнштейна.

2. Баллистическая теория

Часть физиков полагала, что можно избежать радикальных перемен, если заменить СТО баллистической теорией.

Баллистическая теория, выдвинутая впервые Ритцем¹⁰⁶, как и СТО, вводила принцип относительности и отвергала эфир, но вместо постоянства скорости света вводила зависимость скорости света от скорости источника. Скорость света относительно наблюдателя получалась сложением скорости света и скорости источника. Это позволяло легко объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона. В баллистической теории распространение света рассматривалось фактически в рамках эмиссионной теории, хотя Ритц говорил о фиктивном характере световых «частиц». Аберрация легко объяснялась этой теорией, но возникали многочисленные трудности: нужно было полностью перестраивать электродинамику, возникали трудности с интерпретацией опыта Физо и эффекта Доплера. При доплер-эффекте приходилось допускать изменение частоты и постоянство длины волны.

Чтобы постоянство длины волны не противоречило наблюдаемому сдвигу линий в дифференциальном спектре, Толмен¹⁰⁷ допустил, что свет от движущегося небесного

¹⁰⁵ *Zeeman P.* Experiences sur la propagation de la lumière dans des milieux liquides ou solides en mouvement. — Arch. Néerl., 1927, 10 (3A), p. 131—220.

¹⁰⁶ *Ritz W.* Recherches critiques sur l'électrodynamique générale. — Ann. Chim., 1908, 13 (8), p. 145—275.

¹⁰⁷ *Tolman R.* The second postulate of relativity. — Phys. Rev., 1910, 30, p. 26—40.

источника, отраженный от зеркала, ведет себя так, как будто его источником является зеркало. Поскольку зеркало неподвижно относительно дифракционной решетки, то оно испускает свет со скоростью c , а поскольку частота при отражении не изменяется, то изменяется длина волны. Для проверки своей гипотезы Толмен произвел следующий опыт. Противоположные концы солнечного диаметра поочередно рассматривались в телескоп, с которым был соединен интерферометр Ллойда, состоящий из щели s , плоского зеркала m и окуляра f . Интерферировали между собой прямой луч 1 и луч 2, отраженный от зеркала. Скорость луча 1 равнялась $c + v$, где v — линейная скорость точек на поверхности Солнца, а скорость луча 2 после отражения равнялась c . За счет разности скоростей возникала разность хода. При визиравании телескопа на противоположные края Солнца интерференционная картина должна была заметно сдвигаться. Поскольку никакого сдвига не наблюдалось, Толмен сделал вывод об ошибочности баллистической теории и справедливости второго постулата СТО.

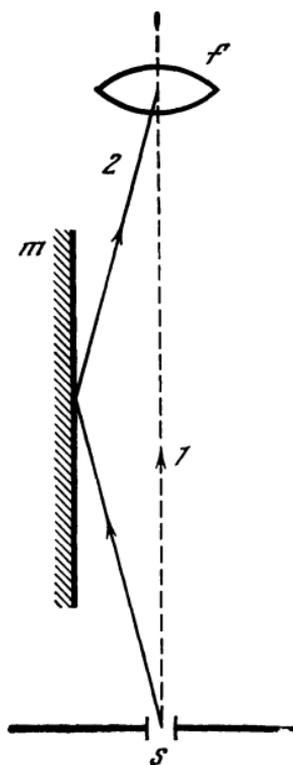


Рис. 4

Комсток ¹⁰⁸ указал, что различие в скорости света от приближающихся к нам и от удаляющихся от нас звезд должно было бы исказить орбитальное движение двойных звезд, но этого никто не наблюдал.

Подробно этот вопрос был рассмотрен в 1913 г. де Ситтером ¹⁰⁹. Пусть скорость света от звезды определяется выражением $c' = c + kv$, где v — скорость звезды, k — некоторый коэффициент (по Ритцу $k = 1$, по Лоренцу и Эйнштейну $k = 0$). Де Ситтер показал, что для двойной звезды β Возничего $k = 0,002$, а для других звезд, ве-

¹⁰⁸ Comstock D. A neglected type of relativity.— Phys. Rev., 1910, 30, p. 267.

¹⁰⁹ Sitter W. de. A proof of the constancy of the velocity of light.— Proc. Kon. Akad. Wen. Amst., 1913, 15, p. 1297.

роятно, еще меньше. Это был довод в пользу постоянства скорости света.

В 1918 г. Майорана¹¹⁰ поставил прямой опыт по измерению скорости света от движущегося источника. Ртутная лампа двигалась по окружности со скоростью $v = 80$ м/ч. Наблюдалась зеленая линия ртути ($\lambda = 0,5461$ мк) с помощью интерферометра Майкельсона, у которого разность хода лучей $\Delta l = 232$ мм. Если скорость света постоянна, то вследствие доплер-эффекта должен наблюдаться сдвиг в x полос, причем

$$x = \frac{\Delta l}{\lambda} \frac{v}{c}.$$

Различие между теоретическим и наблюдаемым сдвигом оказалось порядка 5%. Майорана сделал вывод о постоянстве скорости света.

3. Анализ опыта Майкельсона и его повторения в 1909—1930 гг.

После появления СТО анализы опыта Майкельсона приняли другой оттенок. Противники СТО рассчитывали опровергнуть ее, доказав ошибочность интерпретации опыта Майкельсона.

В 1909 г. Коля¹¹¹ заявил, что в опыте Майкельсона наблюдаются полосы равного наклона, а не равной толщины. За счет диафрагмирования зрительной трубы из всей системы колец видно только центральное пятно. Параллельные прямолинейные полосы, по мнению Коля, возникают от дифракции света на выходной щели осветителя, т. е. мы видим результат интерференции двух дифракционных картин. Если применяется монохроматический свет, то при вращении аппарата будет меняться интенсивность полос, а не их положение. При некоторых азимутах полосы исчезают, при дальнейшем вращении вновь появляются. В белом свете можно наблюдать иллюзию смещения полос, обусловленную тем, что интенсивность некоторой линии сильно уменьшается, а интенсивность линии с близкой длиной волны заметно возрастает.

¹¹⁰ *Majorana Q.* Experimental demonstration of the constancy of velocity of the light emitted by a moving source.— *Phil. Mag.*, 1919, 37 (6), p. 145—150.

¹¹¹ *Kohl B.* Über den Michelsonsche Versuch.— *Ann. Physik*, 1909, 28, S. 259—307, 662.

Развивая теорию отражения света на движущемся зеркале, Коль показывает (вслед за Лоджем), что угол отражения отличается от угла падения на величину второго порядка (в системе отсчета, связанной с прибором). Это приводит к раздвоению изображения источника — этот факт ранее не учитывался.

Колью возразил Лауэ¹¹². Приведем начало статьи Лауэ, ярко характеризующее дух дискуссии: «Так как интерференционный опыт Майкельсона, как основа теории относительности, приобрел исключительное значение для развития физики, необходимо устранить любые сомнения в его доказательности, в том числе высказанные недавно Колем». Ссылаясь на статью Морли и Миллера (1905 г.), Лауэ показал, что в опыте наблюдались полосы равной толщины, а не равного наклона. Возможно, Лауэ не знал, что еще в 1887 г. Майкельсон применил свой интерферометр для решения задачи о световом эталоне длины. Метод Майкельсона основывался на том, что сдвиг интерференционных полос прямо пропорционален смещению зеркала интерферометра, что возможно только для полос равной толщины. Дифракция, описываемая Колем, по мнению Лауэ, не имеет никакого отношения к наблюдаемым на опыте явлениям. Можно добавить к этому, что в опыте Майкельсона и Морли щели вообще не было, об этом упоминал Хикс со слов Морли. По поводу удвоения изображения Лауэ указал, что оно вытекает не только из теории эфира, но и из СТО, поэтому данное явление не могло бы служить критерием выбора между теориями, даже если бы оно легко наблюдалось. В действительности расстояние между изображениями слишком мало (10^{-5} см), чтобы его наблюдать.

В 1911 г. свои возражения против опыта Майкельсона выдвинул Будде¹¹³. Он считал, что разность фаз в опыте Майкельсона ранее рассчитывалась неверно. Кроме того, Будде считал необходимым учитывать влияние, оказываемое на разность фаз плоскопараллельной пластиной. По мнению Будде, в опыте Майкельсона не учитывалась компонента эфирного дрейфа, связанная с движением нашей галактики относительно эфира. Для устранения

¹¹² *Лауэ М.* Доказателен ли опыт Майкельсона? — В кн.: *Лауэ М.* Статьи и речи. М.: Наука, 1969, с. 32—36.

¹¹³ *Budde E.* Zur Theorie des Michelsonschen Versuches.— *Phys. Z.*, 1911, **12**, S. 979—991; 1912, **13**, S. 825.

Влияния этой компоненты необходимо производить измерения в разное время года.

Лауэ¹¹⁴ ответил Будде, что если учитывать все поставленные до сих пор опыты, выполненные в разное время года, то вероятность постоянной компенсации ожидаемого эффекта действием неизвестной компоненты чрезвычайно мала. Особенно подробно Лауэ рассмотрел подсчет разности фаз, с которой происходит интерференция. Он указал, что время прохождения света можно определить либо через отношение абсолютного пути l и абсолютной скорости c , либо через отношение относительного пути S и относительной скорости c_r :

$$t = \frac{l}{c} = \frac{S}{c_r}.$$

Для расчета разности фаз полученный промежуток времени нужно делить либо на абсолютный, либо на относительный период (различие во втором порядке несущественно). Можно непосредственно получить разность фаз, разделив относительный путь S на относительную длину волны в конце пути λ_r (изменение длины волны происходит вследствие эффекта Доплера).

Будде применил неверный метод: он делил абсолютный путь луча l_n на относительную длину волны λ_n . Лауэ считает, что эта величина не имеет отношения к разности фаз.

Представляется, что возражение в этом пункте можно сформулировать и так: Будде неверно применил принцип Доплера. Поскольку источник света, все детали установки и наблюдатель находятся в одной системе отсчета, при прохождении лучом света различных участков своего пути изменения длины волны не должно быть. У Будде же после каждого отражения длина волны изменяется. Фактически он повторил ошибку Фойгта: вместо относительной длины волны ввел абсолютную. Но последнее не имеет физического смысла: чтобы регистрировать абсолютную длину волны, наблюдатель должен покоиться относительно эфира.

После появления статьи Лауэ Будде признал, что применение принципа Доплера в опыте Майкельсона необоснованно. В вопросе о роли разделительной пластины

¹¹⁴ Лауэ М. К теории опыта Майкельсона. — В кн.: Лауэ М. Статьи и речи. М.: Наука, 1969, с. 37—46.

Лауэ не согласен с Будде. Лодж¹¹⁵ уже рассматривал этот вопрос и пришел к выводу, что учет прохождения света через разделительную пластинку не влияет на разность хода в опыте Майкельсона.

В опытах Майкельсона—Морли и Морли—Миллера в течение всего времени измерений интерферометр медленно вращался. Мог возникнуть вопрос о влиянии деформаций, возникающих при вращении, на величину наблюдаемого эффекта. Оказалось, что эти деформации заметной роли не играют¹¹⁶.

В связи с тем, что контракционная гипотеза на опытах не находила подтверждения, сторонники теории эфира искали иные способы для объяснения опыта Майкельсона.

Роуз-Инз¹¹⁷ и Биркеланд¹¹⁸ допустили, что движение Земли воздействует на ближайшие слои эфира так, что в нем возникает анизотропия, и что скорость света зависит от угла между лучом и направлением движения Земли. Формула изменения скорости подбиралась так, чтобы удовлетворить результату опыта Майкельсона. Биркеланд полагал, что эта гипотеза не противоречит постоянству скорости света, которое должно выполняться только в свободной среде, где не осуществляется влияние движения Земли.

Появление СТО стимулировало у сторонников теории эфира интерес к теории отражения и преломления света с учетом членов второго порядка, в частности изучаются квадратичная абберация, квадратичный эффект Доплера. Попытки применить эту теорию к опыту Майкельсона сделал Харнак¹¹⁹, но не получил ничего нового. Риги¹²⁰ применил принцип Гюйгенса к распространению волн

¹¹⁵ *Lodge O.* Aberration problems, p. 792.

¹¹⁶ *Lüroth I.* Eine Bemerkung zum Michelsonschen Versuch.— Sitzber. Kön. Bayer. Akad. Wiss., Math. Phys. Kl., 1909, S. 3—10.

¹¹⁷ *Rose-Innes J.* On the physical interpretation of the Michelson-Morley experiment.— *Phil. Mag.*, 1914, 27, p. 150—153.

¹¹⁸ *Birkeland R.* An attempt to explain the Michelson interference-experiment.— *Phil. Mag.*, 1919, 37 (6), p. 150—156.

¹¹⁹ *Harnack A.* Der Dopplereffekt und die Gesetze der Spiegelung und Brechung an einer bewegten Grenzfläche.— *Ann. Physik*, 1914, 46 (4), S. 547—560.

¹²⁰ *Righi A.* L'expérience de Michelson et son interpretation.— *C. r.*, 1919, 168, p. 837—842; Sur les bases experimentales de la Théorie de la Relativité.— *C. r.*, 1920, 170, p. 497—501; Sur la Relativité et sur un projet d'expérience décisive.— *C. r.*, 1920, 170, p. 1550—1554; 1920, 171, p. 22—23.

в интерферометре. Он полагал, что разность хода волн, обусловленная эфирным ветром, компенсируется разностью хода с противоположным знаком, обусловленной взаимным наклоном волн при отражении. В итоге, по мнению Риги, при повороте интерферометра на 90° никакого изменения интерференционной картины не должно быть. Виллей ¹²¹ выступил с возражениями, он считал теорию Риги совместимой с опытом Майкельсона. Кеннет и Ричмонд ¹²² поддержали Виллея против Риги. Они показали, что изучавшаяся Риги квадратическая абберация практически не влияет на результаты наблюдений. В случае идеальной юстировки (угол между зеркалами 90° , угол между разделительной пластиной и зеркалами 45°) действительно, как отмечал Риги, в двух положениях интерферометра, отличающихся на 90° , освещенность в поле зрения одинакова. Однако в промежуточных положениях освещенность меняется, что можно обнаружить фотометрически при непрерывном вращении интерферометра.

Большую роль в дискуссии между сторонниками и противниками теории относительности сыграли интерферометрические опыты, в которых лучи света пробегали замкнутый путь. Опыты эти ставились в различных вариантах. Первым был описанный выше опыт Лоджа, в котором интерферометр покоился, а вращался (по предположению) относительно него эфир. В опыте Харреса вращались все детали интерферометра, кроме источника света и зрительной трубы. В опыте Саньяка ¹²³ 1913 г. вращался весь интерферометр, была применена фотографическая регистрация. Наконец, в 1925 г. Майкельсон повторил опыт Саньяка, используя в качестве вращающейся основы интерферометра саму Землю. Несмотря на это разнообразие, ожидаемое согласно теории эфира смещение полос всюду получалось одинаковым.

Рассмотрим, для примера, схему опыта Саньяка (рис. 5). Луч света от осветителя падает на разделитель-

¹²¹ *Villey J.* Sur la discussion de l'expérience de Michelson.— C. r., 1920, **170**, p. 1175—1178; Sur l'application de la méthode de Righi à la discussion de l'expérience de Michelson.— C. r., 1920, **171**, p. 298—301.

¹²² *Kennard E. H., Richmond D. E.* On reflection from a moving mirror and the Michelson-Morley experiment.— *Phys. Rev.*, 1922, **19** (2), p. 572—577.

¹²³ *Sagnac G.* Effect tourbillonnaire optique. La circulation de l'éther lumineux dans un interférographe tournant.— *J. phys. theor. appl.*, 1914, **4**, p. 177—195.

ную пластину и делится на два луча, причем луч T описывает замкнутый путь по часовой стрелке, луч R — против часовой стрелки. Выходя из пластины, лучи T и R проектируются объективом L на фотопластинку P . Рассмотрим время прохождения светом элемента пути mm' ; v — линейная скорость точки m . Разность времени про-

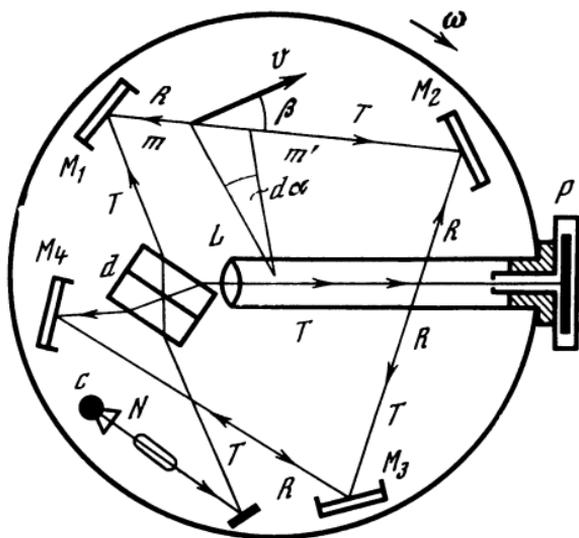


Рис. 5

хождения пути mm' лучом T при вращающемся и неподвижном интерферометре равна

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta l}{c-v} - \frac{\Delta l}{c} \simeq \frac{v\Delta l}{c} + kv^2.$$

Для луча R имеем

$$\Delta t_2 = \frac{\Delta l}{c+v} - \frac{\Delta l}{c} \simeq -\frac{v\Delta l}{c^2} + kv^2.$$

Разность времени, если пренебречь величинами выше второго порядка малости, будет

$$\Delta t = \frac{2\Delta lv}{c^2}.$$

Для полного пути задержка составит

$$\Delta T = \frac{2}{c^2} \int v dl.$$

Поскольку $v = \omega r \cos \beta$; $dl = r d\alpha / \cos \beta$;

$$\int v dl = 2\pi r^2 \omega = 2\omega S,$$

где S — площадь замкнутого контура, охватываемая лучом, ω — угловая скорость.

Разность хода в длинах волн $\Delta = 4\omega S/c\lambda$.

В опыте Саньяка отклонения экспериментальных данных от расчетных (при $S = 863$ см, $\lambda = 436$ мкм, $n = 1 - 2$ об/с) не превышали 2%. Исходя из этого результата, он рассчитал, что увеличение скорости света за счет движения источника (если допустить справедливость баллистической гипотезы) составляет менее 10^{-10} . Саньяк счел это подтверждением теории неподвижного эфира.

Важный вклад в интерпретацию опытов с вращающимся интерферометром внес Лауэ. Впервые он обратился к этой теме в связи с проектом опыта Майкельсона в 1911 г.¹²⁴ Лауэ показал, что если центр окружности покоится, то СТО дает тот же результат, что и теория эфира (данный опыт является фактически опытом первого порядка). Если центр окружности движется, то появляется различие в предсказаниях теорий, но оно лежит за пределами возможностей наблюдений. Лауэ пришел к выводу, что опыты с вращающимся интерферометром не могут быть использованы для выбора между СТО и теорией эфира.

Второй раз к этому вопросу Лауэ вернулся после того, как получила признание общая теория относительности (ОТО). В 1920 г., анализируя опыт Харреса, Лауэ¹²⁵ указал, что опыты с вращающимся интерферометром относятся к сфере ОТО, но, учитывая малую величину возникающих при вращении ускорений, можно их рассматривать на основе СТО. Лауэ показал, что с точки зрения СТО и в опыте Харреса, и в опыте Саньяка должны получаться те же результаты, что и с точки зрения теории эфира.

В 1923 г. к теории опытов с вращающимся интерферометром вернулся Зильберштейн¹²⁶. Он показал, что рассмотрение этой проблемы в ОТО приводит к тем же результатам, что и в теории неподвижного эфира. В этом же он видел возможность проверки теории относительности. Если опыт дает величину, соответствующую полностью неподвижному эфиру, то это будет доводом как в пользу теории эфира, так и в пользу ОТО. Но если смещение, наблюдаемое в опыте, будет соответствовать хотя бы

¹²⁴ *Лауэ М.* Об одном опыте оптики движущихся тел.— В кн.: *Лауэ М.* Статьи и речи. М.: Наука, 1969, с. 52—58.

¹²⁵ *Laue M.* Zum Versuch von Harress.— *Ann. Physik*, 1920, 62, S. 448—463.

¹²⁶ *Silberstein L.* The rotating Earth as a reference system for light propagation.— *Phil. Mag.*, 1924, 48 (6), p. 395—404.

частичному увлечению эфира, это будет доводом против ОТО. По настоянию Зильберштейна Майкельсон подготовил и осуществил совместно с Гейлем свой опыт, в котором использовалось вращение Земли вокруг оси.

Интерферометр Майкельсона—Гейля¹²⁷ представлял собой четырехугольник, составленный из труб общей длиной 1904 м. Большой контур охватывал площадь 0,208 км². Чтобы сохранить устойчивость интерференционных полос при столь большом оптическом пути, в трубах поддерживалось пониженное давление (10—20 мм рт. ст.). Использовался монохроматический свет с длиной волны 5700 Å. Ожидаемое смещение составляло $0,236 \pm 0,002$ полосы, наблюдалось же на опыте $0,230 \pm 0,005$. Для регистрации смещения был введен малый контур, площадь которого была столь мала, что сдвиг центральной полосы его интерференционной системы был ничтожен. В опыте измерялось смещение центральной полосы большого контура относительно центральной полосы малого контура при условии совпадения изображений источника света, даваемых каждой из систем зеркал. Результат опыта подтверждал и теорию неподвижного эфира, и теорию относительности.

20-е годы XX в. были отмечены оживлением в лагере антирелятивистов. Позиция СТО к этому времени достаточно окрепла, чему немало содействовало полученное в 1919 г. экспериментальное подтверждение ОТО.

Однако и противники СТО получили поддержку в опытах Миллера (1921—1926 гг.), обнаружившего ощутимый эфирный ветер. Если в теории эфира любой, даже небольшой, эфирный ветер мог найти объяснение, то СТО могла примириться только с нулевым результатом.

В феврале 1921 г. Миллер установил интерферометр, использовавшийся им еще в опытах 1905 г., на горе Маунт-Вильсон на высоте 6000 футов. В апреле 1921 г. было проведено 1300 измерений, объединенных в 117 серий. Был обнаружен дрейф эфира около 10 км/с в направлении на северо-запад. Чтобы устранить возможность неравномерного нагрева прибора, Миллер покрыл его слоем пробки толщиной в 1 дюйм, но это никак не отразилось на результатах. Возникло подозрение о том, что наблюдаемый эффект обязан происхождением магнитострикции.

¹²⁷ *Michelson A. A. The effect on the Earth rotation on the velocity of light. I. — Astrophys. J., 1925, 61, p. 137—139; Michelson A. A., Gale H. G. Idem. II, ibid, p. 140—145.*

Стальная основа, несущая зеркала, была заменена алюминиевой и деревянной. С немагнитным прибором в декабре 1921 г. Миллер провел еще 42 серии измерений. Результат был тот же, что и раньше. Условия опыта изменялись: менялась скорость вращения, наблюдатель находился то вблизи, то вдали от прибора, плечи интерферометра деформировались с помощью устанавливаемого груза — все это не влияло на результаты.

Миллер предположил, что наблюдаемый эффект обусловлен самим прибором, и в 1922—1923 гг. изучал его в лаборатории в Кливленде. Облучая интерферометр с помощью электрических спиралей, помещенных в фокусе рефлектора, Миллер обнаружил медленное смещение полос в одну сторону, но не получил периодических смещений, наблюдавшихся ранее, в опытах 1921 г. Он пытался применить фотографическую регистрацию, но большие размеры прибора обусловили недостаточную освещенность даже при использовании в качестве источника света электрической дуги. Наблюдался эфирный ветер порядка 2 км/с.

В сентябре 1924 г. прибор был вновь установлен на Маунт-Вильсон, были проведены 10 серий измерений. Результаты оказались те же, что в 1921 г. В марте — апреле 1925 г. было проведено еще 1600 измерений (35 серий). Благоприятные погодные условия содействовали тому, что температура в помещении изменялась очень мало ($0,1-0,4^\circ$), что должно было устранить возможные температурные «скачки», тем не менее снова наблюдался положительный эффект.

В своем отчете 1925 г. Миллер ¹²⁸ сделал вывод о существовании эфирного дрейфа со скоростью 9 км/с и о том, что опыт Майкельсона—Морли в действительности не дал нулевого результата.

Летом 1925 г. Миллер начал новый цикл опытов. Если раньше его целью была проверка нулевого результата опыта Майкельсона, то теперь он рассматривает свои опыты как способ измерения скорости и направления движения Земли относительно эфира. В 1925—1926 гг. Миллер провел измерения при 6400 оборотах интерферометра (каждому обороту соответствовали 16 измерений), в то время как все опыты до 1925 г. включали 1200 оборотов. Миллер истолковал результаты опы-

¹²⁸ *Miller D. Ether-drift experiments at Mount Wilson.— Proc. Nat. Acad. Sci., USA, 1925, 11, p. 306—314.*

тов так: обнаружен дрейф Земли относительно эфира со скоростью $10 \pm 0,5$ км/с. Его можно объяснить, допуская помимо движения Земли вокруг Солнца со скоростью 30 км/с движение Солнечной системы со скоростью 200 км/с относительно эфира по направлению к созвездию Дракона (прямое восхождение 255° , склонение $+68^\circ$).

Появление статьи Миллера в 1925 г. вызвало в печати оживленную полемику. Сторонникам СТО было ясно, что одними рассуждениями многочисленными и тщательными опыты Миллера не опровергнуть, нужны контрольные эксперименты.

В 1926 г. Кеннеди¹²⁹ построил интерферометр — копию первого неосуществленного проекта интерферометра Майкельсона, в котором для уменьшения температурных флуктуаций длина пути луча была уменьшена до 4 м. Оптическая часть прибора помещалась в герметический металлический кожух, заполненный гелием. У гелия показатель преломления значительно меньше, чем у воздуха, поэтому флуктуации давления и температуры в гелиевой атмосфере будут сказываться меньше. Поскольку чувствительность интерферометра была в 8 раз меньше, чем у Миллера, необходимо было разработать способ измерения малых смещений интерференционных полос. Для этой цели Кеннеди применил ступенчатое зеркало, у которого половина поверхности выступала над соседней на небольшую часть длины волны. Это приводило к тому, что в поле зрения трубы наблюдались две системы интерференционных полос. Если добиться равенства интенсивности этих систем при определенном положении полос, то в результате сдвига полос возникает пропорциональное ему изменение интенсивности одной системы относительно другой. Для улучшения видимости полос применялся монохроматический поляризованный свет. Практически можно было обнаружить сдвиг в 0,002 полосы. Время наблюдения и расположение прибора выбирались так, чтобы эфирный ветер, по предположению Миллера, был максимальным. Скорости 10 км/с соответствовал сдвиг 0,008 полосы. В действительности сдвиг обнаружить не удалось, т. е. он был меньше 0,002 полосы. Это означало, что скорость эфирного ветра не превышала 2 км/с.

¹²⁹ *Kennedy R. A refinement of the Michelson-Morley experiment. — Proc. Nat. Acad. Sci., USA, 1926, 12, p. 621—629.*

В 1927 г. Иллингворт¹³⁰ несколько усовершенствовал методику работы с интерферометром Кеннеди и сделал вывод о том, что верхняя граница скорости эфирного ветра не более 1 км/с. Большой разброс полученных им результатов не вызывает, впрочем, особого доверия к найденному им значению.

В 1926—1927 гг. с целью проверки зависимости скорости эфирного дрейфа от высоты Пикар и Стаэль¹³¹ подняли на воздушном шаре небольшой интерферометр с длиной оптического пути 280 см, помещенный в герметический термостатированный контейнер. Шар медленно равномерно вращался с помощью электромотора. Сдвиг интерференционных полос регистрировался автоматически на движущуюся фотопленку. На высоте 2500 м скорость эфирного ветра не превышала 9 км/с. В связи с тем, что в этом опыте случайные ошибки были велики из-за заметного температурного дрейфа, Пикар и Стаэль повторили опыт на горе Риги в Швейцарии на высоте 1800 м. Был зарегистрирован эфирный ветер со скоростью около 2,5 км/с.

Для обсуждения результатов опытов Миллера в феврале 1927 г. в обсерватории Маунт-Вильсон была проведена конференция¹³². В ней принимали участие Лоренц, Майкельсон, Эпштейн, Кеннеди, Миллер, Хедрик и др.

Майкельсон высказал мнение, что, видимо, Миллер получил положительный эффект. Этот эффект не может быть обусловлен орбитальным движением Земли. По всей вероятности, он объясняется движением Солнечной системы относительно звезд с очень большой скоростью. Майкельсон высоко оценил опыт Кеннеди и сообщил о своих предполагаемых опытах по проверке эффекта Миллера.

Миллер рассказал о результатах своих исследований. Он сообщил, что указанные им скорость и направление движения Солнечной системы, хотя и противоречат прежним представлениям астрономов, однако согласуются с некоторыми новыми результатами изысканий, в частности с результатами Штремберга и Лундмарка. Миллер заявил о своем намерении провести дополнительную серию

¹³⁰ *Illingworth K. K.* A repetition of the Michelson—Morley experiment using Kennedy's refinement.— *Phys. Rev.*, 1927, 30, p. 692—696.

¹³¹ *Piccard A., Stahel E.* Réalisation de l'expérience de Michelson en ballon et sur terre ferme.— *J. Phys.*, 1928, 9 (6), p. 49—60.

¹³² Conference on the Michelson—Morley experiments.— *Astrophys. J.*, 1928, 68, p. 341—402.

измерений в Кливленде для сравнения с полученными на Маунт-Вильсон.

Кеннеди сообщил о результатах своих опытов: измерения на уровне моря и в обсерватории Маунт-Вильсон не обнаружили дрейфа, найденного Миллером.

Хедрик вновь вернулся к теории опыта Майкельсона. Он получил иным способом формулы для разности хода лучей и изменения угла отражения лучей на движущейся поверхности с учетом членов второго порядка, выведенные Ригги. По мнению Хедрика, из этих формул вытекает, что измеряемая разность хода зависит от начальной юстировки прибора. Если эту юстировку не контролировать, то полученные результаты будут иметь случайное распределение и их нельзя усреднить.

Эпштейн указал, что предлагаемые Хедриком поправки на опыте необнаружимы, но что в целом теория Хедрика важна для интерпретации опыта Кеннеди.

Лоренц отметил, что различия между теорией Хедрика и общепринятой заметны в членах второго порядка и должны влиять на численные результаты в опыте Майкельсона. В то время как Хедрик оперирует с волновыми фронтами на основе принципа Гюйгенса, Лоренц применяет принцип Ферма к световым лучам. Лоренц считал свой подход более простым. Он допускал, что причина противоречия между теориями связана с путаницей между нормальными к волновым фронтам и лучам. По поводу опытов Миллера Лоренц указал, что вряд ли удастся избежать опасения, что весь эффект может происходить от какого-либо побочного лабораторного фактора.

Участники конференции не пришли к общему мнению о причинах эффекта Миллера. Была отмечена необходимость уточнения теории отражения и преломления света в движущихся телах.

В 1929 г. был опубликован краткий отчет об опытах, предпринятых в 1926—1928 гг. Майкельсоном совместно с Пизом и Пирсоном¹³³. Различные варианты опытов дали отрицательный результат. Один из них был осуществлен на Маунт-Вильсон для проверки гипотезы, высказанной Штрембергом и поддержанной Миллером, о том, что Солнечная система движется к точке в созвездии Дракона со скоростью около 300 км/с. Наблюдаемое смещение было в 15 раз меньше ожидаемого.

¹³³ *Michelson A. A., Pease F. G., Pearson F. Repetition of the Michelson--Morley experiment.— JOSA, 1929, 18, p. 181—182.*

Последним из серии контрольных опытов был опыт, поставленный Иосом¹³⁴ в 1930 г. в Иене. Интерферометр по размерам был подобен миллеровскому: длина плеча 3,5 м, длина оптического пути 21 м. Интерферометр, смонтированный на кварцевом основании, помещался в герметический металлический кожух, из которого откачивался воздух. Был применен монохроматический свет, интерференционные полосы фотографировались. Верхняя граница регистрируемого эфирного дрейфа составила 1,5 км/с.

Интересно, что в 1933 г. в большой статье об итогах своих работ Миллер¹³⁵ отказался признать, что эксперименты последних лет опровергают его результаты. По его мнению, во всех этих опытах, где интерферометр был заключен в металлический футляр или помещался в комнатах с массивными стенами, ниже уровня земли и т. д., были нарушены условия для свободного движения эфира. Это делает результаты этих опытов несопоставимыми с его собственными.

Глава 4

ОПЫТЫ ПО ПРОВЕРКЕ ПОСТУЛАТОВ СТО НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

1. Опыты по проверке первого постулата СТО

В 30-е годы СТО стала общепринятой. Тем не менее отдельные попытки противопоставить ей теорию эфира продолжались. Дискуссия перешла в иную плоскость: антирелятивисты пытались доказать, что все явления, объясняемые СТО, так же хорошо объяснимы и в теории эфира. Из эфирных теорий наиболее распространенной была теория Лоренца, включающая контракционную гипотезу. Лоренц еще в 1928 г. высказывался по поводу эффекта сокращения: «Оно так же реально, как все, что мы наблюдаем»¹³⁶.

Кеннеди и Торндайк¹³⁷ в 1932 г. пытались обнаружить с помощью неравноплечего интерферометра эфирный ве-

¹³⁴ Joos G. Wiederholungen des Michelson-Versuchs.— Naturwis., 1931, 19, S. 784—789.

¹³⁵ Miller D. C. The Ether-drift experiment.— Rev. Mod. Phys., 1933, 5, p. 203—242.

¹³⁶ Conference on the Michelson—Morley experiments, p. 351.

¹³⁷ Kennedy R., Thorndike E. Experimental establishment of the relativity of time.— Phys. Rev., 1932, 39 (2), p. 871.

тер, обусловленный суточным вращением Земли. Отрицательный результат опыта они истолковали так: плечо интерферометра действительно сокращается в направлении движения, но мы не замечаем этого сокращения, ибо одновременно изменяется ход часов.

В 1936 г. новый метод проверки лоренцевского сокращения предложили Вуд, Томлинсон и Эссен¹³⁸. Частота колебаний кварцевого генератора зависит от длины кварцевого стержня. Если при вращении генератора длина стержня периодически сокращается, это приведет к изменению частоты генератора. Изменение частоты генератора проверяется методом биений с помощью другого неподвижного генератора. Многократные повторения опыта в различное время суток и разное время года показали, что с точностью до $4 \cdot 10^{-11}$ частота генератора при его вращении остается неизменной. Отрицательный результат опыта был истолкован как подтверждение СТО. Интересно отметить, что авторы опыта приписывали СТО положение о реальном сокращении длины. В этом отношении они интерпретировали результат опыта так: изменение длины стержня компенсировалось изменением его упругости. В действительности такой вывод можно сделать с точки зрения теории эфира. Подобная гипотеза позволяет объяснить и неудачу прежних попыток обнаружить лоренцево сокращение.

В 30-е годы большой интерес вызывало изучение квадратичного доплер-эффекта. Этот эффект впервые был предсказан в 1907 г. Эйнштейном¹³⁹. Пусть φ — угол между направлением скорости источника и лучом, ν — частота света в системе, где покоится наблюдатель, ν_0 — частота света в системе, где покоится источник. Тогда

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \varphi} .$$

При наблюдении в направлении, перпендикулярном лучу света,

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} \simeq \nu_0 \left(1 - \frac{1}{2} \beta^2 \right) .$$

Если рассматривать атом, излучающий волны с частотой

¹³⁸ Wood A., Tomlinson G., Essen L. The effect of the Fitzgerald—Lorentz contraction on the frequency of longitudinal vibration of a rod.— Proc. Roy. Soc., 1937, 158A, p. 606.

¹³⁹ Эйнштейн А. О принципе относительности и его следствиях.— В кн.: Эйнштейн А. Собр. науч. трудов, т. 1. М.: Наука, 1965, с. 74—78.

той ν_0 , как часы с периодом T_0 , то в системе наблюдателя период колебаний

$$T = T_0 / \sqrt{1 - \beta^2},$$

откуда $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} \simeq \nu_0 \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right)$.

Таким образом, квадратичный доплер-эффект можно рассматривать как подтверждение релятивистского эффекта сокращения времени.

На реальную возможность проведения подобных опытов с каналовыми лучами указал Эйнштейн, ознакомившись с работами Штарка по изучению линейного доплер-эффекта в каналовых лучах.

С другой стороны, приверженцы теории эфира считали, что квадратичный доплер-эффект позволяет измерить скорость Земли относительно эфира. В самом деле, если источник света и наблюдатель движутся с соответствующими скоростями u и v по одной линии, то воспринимаемая частота равна

$$\begin{aligned} \nu &= \nu_0 \frac{1 \pm \frac{u}{c}}{1 \pm \frac{v}{c}} = \nu_0 \left(1 \pm \frac{u}{c}\right) \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)^{-1} \cong \\ &\cong \nu_0 \left(1 \pm \frac{u - v}{c} - \frac{uv}{c^2}\right). \end{aligned}$$

Очевидно, что ν зависит не только от относительной скорости наблюдателя и источника, но и от их абсолютных скоростей.

Длительное время не удавалось достичь нужной чувствительности эксперимента. Начальное смещение спектральной линии маскировалось ее расширением, вызванным распределением скоростей в значительном интервале. Первоначально предполагалось наблюдать излучение под прямым углом к направлению движения частиц, однако выяснилось, что даже небольшое отклонение угла от прямого приводит к появлению продольной компоненты доплеровского смещения, перекрывающей поперечный эффект.

Первые опыты, в которых удалось решить проблему, были выполнены Айвсом и Стилуэллом¹⁴⁰ в 1938—1941 гг.

¹⁴⁰ *Ives H. E., Stilwell G. R.* An experimental study of the rate of a moving atomic clock.— *JOSA*, 1938, 28, p. 215—226; 1941, 31, p. 369—374.

Они наблюдали излучение, направленное вдоль пучка частиц. С помощью вогнутого зеркала, установленного под углом 7° к направлению движения частиц, можно было наблюдать одновременно излучение во взаимно противоположных направлениях. Скорость частиц вычислялась по приложенному напряжению, а также по продольному доплеровскому смещению. Совпадение экспериментальных и расчетных данных наблюдалось с точностью порядка 10%.

Айвс интерпретировал эффект замедления времени в духе теории эфира, приписывая этому эффекту такой же реальный характер, как эффекту сокращения длины. Формула, полученная им из теории Лоренца—Лармора, совпадала с релятивистской¹⁴¹.

Релятивистскую трактовку опытов дал Джонс¹⁴². Иным методом для измерения квадратического смещения воспользовался в 1939 г. Оттинг. Точность его опытов была на таком же уровне, как у Айвса и Стилуэлла. В 1962 г. Мандельберг и Уиттен¹⁴³ повторили опыт Айвса—Стилуэлла со значительно меньшей погрешностью.

Появление в послевоенный период новой техники позволило увеличить точность оптических опытов и значительно расширить диапазон применяемых электромагнитных волн.

В 50-е годы проводятся первые повторения опыта Майкельсона для радиоволн микроволнового диапазона. В 1954 г. Ф. Литтман¹⁴⁴ предложил осуществить следующий опыт. Полый резонатор длиной l питается от микроволнового генератора. Условие резонанса в отсутствие эфирного ветра

$$v = \frac{nc}{2l}.$$

¹⁴¹ *Ives H. E.* Light signals on moving bodies as measured by transported rods and clocks.— *JOSA*, 1937, 27, p. 263—273; Apparent lengths and times in system experiencing the Fitzgerald — Larmor — Lorentz contractions.— *JOSA*, 1937, 27, p. 310—313; The doppler-effect considered in relation to the Michelson—Morley experiment.— *JOSA*, 1937, 27, p. 389—392.

¹⁴² *Jones R. C.* On the relativistic doppler-effect.— *JOSA*, 1939, 29, p. 337—339.

¹⁴³ *Mandelberg H. I., Witten L.* Experimental verification of the relativistic doppler-effect.— *JOSA*, 1962, 52, p. 529—536.

¹⁴⁴ *Littman F.* Proposal for a new ether-drift experiment.— *Nature*, 1954, 173, p. 80—81; 174, p. 505—506.

При наличии эфирного ветра изменяется скорость радиоволн, поэтому при ориентации резонатора вдоль направления движения Земли резонансная частота равна

$$v_1 = v \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right),$$

а при повороте резонатора на 90° имеем частоту

$$v_2 = v \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = v \left(1 - \frac{v^2}{2c^2} \right).$$

Эссен ¹⁴⁵ предложил для увеличения точности включить резонатор в качестве стабилизатора в схему самого генератора. Это позволило бы сравнивать его частоту с частотой стандартного кварцевого генератора. Опыт был осуществлен Эссеном в 1955 г. Цилиндрический резонатор, настроенный на частоту 9200 МГц, вращался в горизонтальной плоскости со скоростью 1 об/мин. Частота генератора сравнивалась с частотой кварцевого стандарта через каждые 45° .

Кромби ¹⁴⁶ предложил усовершенствовать метод Эссена, применив метод фазового детектора. Возникающий при вращении резонатора сигнал низкой частоты усиливался узкополосным усилителем, исключавшим действие случайных помех. Затем сигнал выпрямлялся с помощью синхронного детектора и шел на регистратор. Кромби полагал таким образом увеличить чувствительность, достигнутую Эссеном, в 200 раз. Он полагал также, что с помощью его метода можно заметно увеличить точность опыта А. Вуда — Толлинсона — Эссена.

Новые возможности повышения точности опытов типа Майкельсона появились с созданием квантовых генераторов.

Среди опытов второго порядка отметим опыт, проведенный в 1964 г. Таунсом с сотрудниками ¹⁴⁷. Два газовых лазера были установлены взаимно перпендикулярно. Разделительная пластинка направляла оба луча на фотодетектор. Регистрировалась частота биений лазерных пучков $\Delta\nu$. При повороте установки на 90° должно про-

¹⁴⁵ *Essen L.* A new ether-drift experiment.— *Nature*, 1955, 175, p. 793—794.

¹⁴⁶ *Crombi D.* Proposal for a new aether-drift experiment.— *Nature*, 1955, 175, p. 350—351.

¹⁴⁷ *Jaseja T., Javan, A., Murray J., Townes C.* Test of special relativity or of the isotropy of space by use of infrared maser.— *Phys. Rev.*, 1964, 133A, p. 1221—1225.

изойти изменение частоты, обусловленное эфирным ветром, $\Delta\nu/\nu = 0,5 \beta^2$. При $\nu = 3 \cdot 10^{14}$ Гц $\Delta\nu = 3 \cdot 10^6$ Гц. На опыте наблюдалось изменение частоты $3 \cdot 10^3$ Гц, что соответствовало скорости эфирного ветра 30 м/с.

Шамир и Р. Фокс¹⁴⁸ повторили опыт Майкельсона с одним лазером. В оба плеча интерферометра были введены стеклянные стержни одинаковой длины. Опыт показал отсутствие эфирного ветра со скоростью, превышающей 6,6 км/с.

Наибольший интерес вызвали опыты первого порядка с двумя источниками. Возможность таких опытов была обусловлена высокой стабильностью мазеров и лазеров.

Мёллер¹⁴⁹ предложил осуществить следующий опыт. Пусть два мазера установлены на вращающейся рейке так, что их резонаторы горизонтальны, а возбужденные молекулы газа (аммиака) движутся навстречу друг другу. По теории неподвижного эфира для каждого пучка частота будет

$$\nu = \nu_0 \left[1 + \frac{eu}{c} + \frac{(eu)^2}{c^2} + \frac{\nu u}{c^2} \right],$$

где e — единичный вектор в направлении излучения, u — скорость молекул, v — скорость Земли относительно эфира, ν_0 — частота излучения при $v = 0$. Так как молекула излучает перпендикулярно направлению своего движения, то

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{\nu u}{c^2} \right).$$

Знак второго члена для двух пучков различен, поэтому при повороте на 180° изменение частоты равно

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{2uv}{c^2}.$$

В 1958 г. подобный опыт был поставлен Таунсом с сотрудниками¹⁵⁰. В опыте измерялась частота биений. При неподвижной установке выбиралась частота биений 20 Гц. За счет эфирного дрейфа изменение частоты бие-

¹⁴⁸ Shamir J., Fox R. A new experimental test of special relativity.— Nuov. Cim., 1969, 62B, p. 258—264.

¹⁴⁹ Möller C. On the possibility of terrestrial tests of theory of relativity.— Nuov. Cim., Suppl., 1957, 6, p. 381.

¹⁵⁰ Gedarholm J., Bland G., Havens B., Townes C. New experimental test of special relativity.— Phys. Rev. Letters, 1958, 1, p. 342—343.

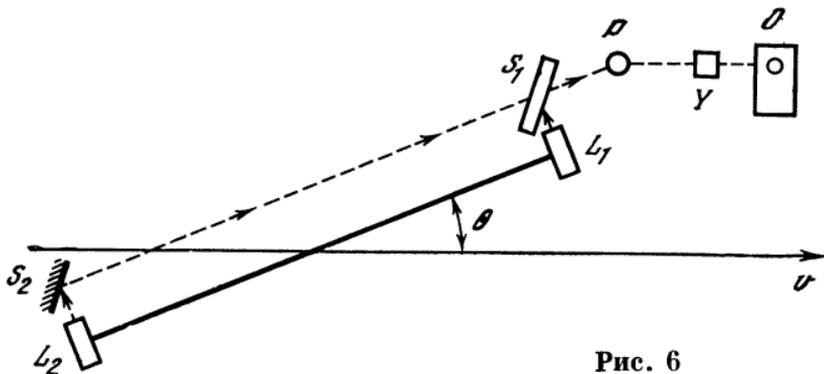


Рис. 6

ний, согласно расчетам, должно было составлять 20 Гц. При благоприятных условиях (низкий уровень помех) изменение частоты дрейфа составило 0,02 Гц, т. е. зафиксированная скорость дрейфа оказалась равной 0,03 км/с. В повторном опыте 1959 г. значение этой величины оказалось в 2 раза меньшим.

Г. М. Страховский¹⁵¹ в 1958 г. предложил опыт первого порядка, в котором можно было измерить разность фаз двух несинхронизированных мазеров. Мазеры следовало установить на поворотной станине на расстоянии L друг от друга. За счет эфирного ветра изменение времени распространения сигнала при повороте станины на 180° равно

$$\frac{\Delta t}{t} = \left(\frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v} \right) / t = \frac{2\beta}{1-\beta^2} \simeq 2\beta.$$

Разность фаз можно определить с помощью вспомогательного мазера по фигуре Лиссажу на экране осциллографа. Требуется стабильность частоты порядка 10^{-12} .

В 1972 г. был поставлен подобный опыт с двумя гелий-неоновыми лазерами¹⁵². Лазеры устанавливали на поворотной оптической скамье. Оба пучка волн от лазеров L_1 и L_2 накладывались на полупрозрачном зеркале S_2 (рис. 6) и попадали на фотодетектор. Излучение лазеров содержало три гармоники, сдвинутые на 580 МГц. Разностные частоты усиливались усилителем $У$ и попадали

¹⁵¹ Басов Н. Г., Крохин О. Н., Ораевский А. Н. и др. О возможности исследования релятивистских эффектов с помощью молекулярных и атомных стандартов частоты. — УФН, 1961, 75, с. 3—60.

¹⁵² Cialdea R. A new test of the second postulate of special relativity sensitive first-order effects. — Nuov. Cim., 1972, 4, p. 821—825.

на осциллограф. По сдвигу картины модулированных колебаний на экране осциллографа определялась разность фаз при повороте оптической скамьи на 180° . Разность фаз связана со скоростью эфирного ветра формулой

$$\delta = \frac{8\pi}{3} \frac{lv}{\lambda c}.$$

В опыте было $l = 160$ см, $\lambda = 6328$ Å. Опыт зафиксировал отсутствие эфирного ветра со скоростью более 0,9 м/с.

Серия опытов первого порядка была поставлена с кольцевыми лазерами. В кольцевом лазере два луча проходят одинаковые пути: один — по часовой стрелке, а другой — против часовой стрелки. Если лазер перемещается как целое или если движутся исследуемые тела, помещенные внутрь установки, то возникают биения, частота которых и регистрируется. Кольцевой лазер обычно имеет форму квадрата или треугольника.

Мачек и Дэвис¹⁵³ применили схему квадратного лазера для осуществления варианта опыта Саньяка (рис. 7). В данном опыте

$$\frac{\Delta v}{v} = \omega l/c,$$

где ω — угловая частота, l — сторона квадрата.

Заменяв один из резонаторов исследуемым твердым телом или кюветой с жидкостью или газом, Мачек, Шнейдер и Саламон¹⁵⁴ измеряли френелевский коэффициент увлечения. Для воздуха и кварца они получили хорошее согласие с теорией, для жидкости (CCl_4) — худшее. Общая схема этих опытов соответствует схеме опытов Физо—Зеемана.

В 1971 г. Бильгер и Заводны¹⁵⁵ измерили коэффициент увлечения для кварца. Применялся гелий-неоновый лазер, собранный по треугольной схеме. Кварцевый диск, вращающийся со скоростью 100—2500 об/мин, пересекал лазерный луч. При этом получились биения частоты 1—50 кГц. По формуле Лоренца для $\lambda = 0,6328$ мм коэффициент увлечения равен 0,5423. На опыте получилось

¹⁵³ Macek W., Davis D. Rotating note sensing with traveling wave ring lasers.— Appl. Phys. Lett., 1963, 2, p. 67—68.

¹⁵⁴ Macek W., Schneider J., Salamon R. Measurement of Fresnel drag with the ring laser.— J. Appl. Phys., 1964, 35, p. 2556—2557.

¹⁵⁵ Bilger H., Zavodny A. Fresnel drag in a ring laser: measurement of the dispersive term.— Phys. ev., 1972, 5A, p. 591—599.

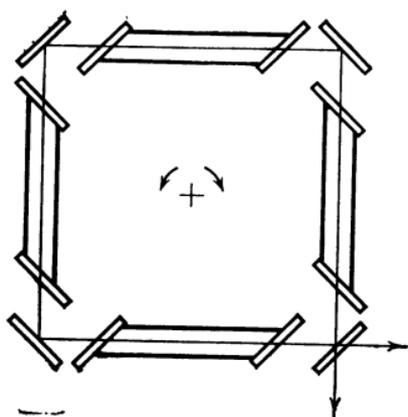


Рис. 7

$k = 0,541 \pm 0,003$, что рассматривалось как подтверждение формулы Лоренца.

Паркс и Доуэлли¹⁵⁶ подвергли критике этот вывод. По их мнению, точность опыта не позволяла сделать выбор между формулами Лоренца и Лауба (по формуле Лауба в этом опыте получается $k = 0,5381$). Они считали, что расположение вращающегося диска в опыте таково, что расчет следует проводить по формуле Лауба, а не Лоренца.

Большой интерес представляют опыты первого порядка с использованием эффекта Мессбауэра, позволяющего с очень большой точностью регистрировать изменения частоты резонансного поглощения γ -квантов.

В 1961 г. Чемпни и Мун¹⁵⁷ проделали следующий опыт. Источник γ -квантов (изотоп Co^{57} , введенный в фольгу Fe^{56}) и поглотитель размещались на противоположных концах ротора, вращающегося вокруг оси, проходящей через центр, и помещенного в вакуумную камеру. Счетчик γ -лучей ставился снаружи за специальным окном. Авторы предполагали обнаружить поперечный доплер-эффект $\Delta\nu/\nu = 2\beta^2$.

В условиях опыта скорость счета γ -квантов при скорости вращения 600 об/с должна быть на 9,4% больше, чем при 100 об/с. В действительности увеличение составило всего $(-0,8 \pm 2,0)\%$. С точки зрения ОТО

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{(R_2^2 - R_1^2)\omega^2}{2c^2},$$

где R_1 и R_2 — расстояния от центра до излучателя и поглотителя, ω — угловая скорость. Так как в опыте $R_1 = R_2$, то $\Delta\nu = 0$. Таким образом, данный опыт следует интерпретировать в рамках ОТО, а не СТО.

¹⁵⁶ Parks W., Dowell J. Fresnel drag in uniformly moving media.— Phys. Rev., 1974, 9 A, p. 565—566.

¹⁵⁷ Champney D., Moon P. Absence of Doppler shift for gamma ray source and detector on same circular orbit.— Proc. Phys. Soc., 1961, A77, p. 350—351.

С точки зрения Мёллера¹⁵⁸ этот опыт можно рассматривать, как вариант опыта Майкельсона. Мёллер считает, что в лабораторной системе излучаемая и поглощаемая частоты определяются формулами

$$\nu = \nu_0 \left[1 + \frac{e u_s}{c} + \frac{(e u_s)^2}{c^2} + \frac{\nu u_s}{c^2} \right],$$

$$\nu = \nu_a \left[1 + \frac{e u_a}{c} + \frac{(e u_a)^2}{c^2} + \frac{\nu u_a}{c^2} \right],$$

где ν_0 и ν_a — соответственно частота, излучаемая источником, и частота, воспринимаемая поглотителем, в системе отсчета, где они покоятся, u_s и u_a — скорости источника и поглотителя в лабораторной системе отсчета. Переходя от лабораторной системы к системе, связанной с ротором, и учитывая, что $u_s = u_a$, имеем

$$\nu_a = \nu_0 \left(1 + \frac{R \omega v \cos \theta}{c^2} \right),$$

где θ — угол между направлением эфирного дрейфа и скоростью поглотителя. При вращении ротора θ изменяется от 0 до 360° и соответственно изменяется частота, воспринимаемая поглотителем, что должно дать уменьшение скорости счета.

В 1963 г. Чемпни, Айзек и Хан¹⁵⁹ повторили этот опыт, введя некоторые усовершенствования. Они пришли к выводу, что если эфирный дрейф, обусловленный движением Земли, существует, то его скорость не превышает $(1,6 \pm 2,8)$ м/с.

2. Опыты по проверке второго постулата СТО

Особое внимание в последние годы было уделено проверке второго постулата СТО. Было показано, что начальный вариант баллистической теории, опирающийся на гипотезу Ритца о том, что неподвижные тела не могут изменить скорость света, не соответствовал опытам де Ситтера, Майораны и др. Гипотезу Толмена о том, что после отражения и преломления на неподвижных телах свет от движущегося источника приобретает скорость c , распространили и на дифракцию. Поэтому прибор, в ко-

¹⁵⁸ *Moller C.* New experimental tests of the special principle of relativity.— Proc. Roy. Soc., 1962, 270A, p. 306—314.

¹⁵⁹ *Champney D., Isaac G., Khan M.* An ether-drift experiment based on the Mössbauer effect.— Phys. Lett., 1963, 7, p. 241—243.

тором происходит отражение, преломление или дифракция на неподвижных телах, непригоден для анализа изменений скорости света. Например, ни интерферометр Ллойда в опыте Толмена, ни интерферометр Майкельсона в опыте Майораны не могут обнаружить изменений скорости света, ибо после прохождения щели или разделительной пластинки скорость света становится равной c .

Этот фактор учел Кантор¹⁶⁰, поставивший в 1962 г. опыт по проверке баллистической теории. По мнению Кантора, движущиеся стеклянные пластинки должны изменить скорость проходившего сквозь них света как внутри стекла, так и в воздухе на пути до ближайшего неподвижного зеркала. В опыте Кантора (рис. 8) две тонкие стеклянные пластинки укреплялись на противоположных краях ротора. Изменение скорости света определялось с помощью интерферометра Майкельсона. Частично световой пучок проходил сквозь пластины, частично — мимо, поэтому в поле зрения наблюдались две интерференционные картины. Если на некоторых участках оптического пути скорость света изменяется при вращении ротора, то должен наблюдаться взаимный сдвиг интерференционных картин.

Пусть за счет увлечения телом скорость света изменяется так: $c' = c + kv$ (в баллистической теории $k = 1$, в СТО $k = 0$). Тогда в опыте Кантора должен был наблюдаться сдвиг в 0,74 полосы. На опыте наблюдался сдвиг в 0,5 полосы, что Кантор истолковал как доказательство увлечения света при $k = 2/3$.

Статья Кантора вызвала много откликов. Были сделаны попытки обоснования наблюдаемого сдвига на основе ОТО¹⁶¹. Опыт Кантора был повторен в 1963—1965 гг. в различных вариантах¹⁶²: применялся монохроматиче-

¹⁶⁰ *Kantor W.* Direct first-order experiment on the propagation of light from a moving source.— *JOSA*, 1962, 52, p. 978—984.

¹⁶¹ *Vysin V.* The possibility of an interpretation of Kantor's direct first order experiment on the propagation of light from a moving source.— *Phys. Lett.*, 1964, 8, p. 36—37.

¹⁶² *James J., Sternberg R.* Change in velocity of light emitted by a moving source.— *Nature*, 1963, 197, p. 1192; *Babcock G., Bergmann T. D.* Determination of the constancy of velocity of electromagnetic radiation.— *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1964, 68D, p. 1265—1268; Test of the constancy of velocity of electromagnetic radiation of high vacuum.— *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1965, 69D, p. 623—628; *Waddoups R., Edwards W., Merrill J.* Experimental investigation of the second postulate of special relativity.— *JOSA*, 1965, 55, p. 142—143,

ский свет, свет лазера, давление воздуха менялось от нормального атмосферного до 10^{-7} мм рт. ст. На роль воздуха обратил внимание Дж. Фокс¹⁶³. По его мнению, молекулы воздуха, как и других тел, являются ретрансляторами света, и при обычном давлении достаточно слоя воздуха толщиной в 1 мм, чтобы сообщить большей части фотонов постоянную скорость c . При уменьшении давле-

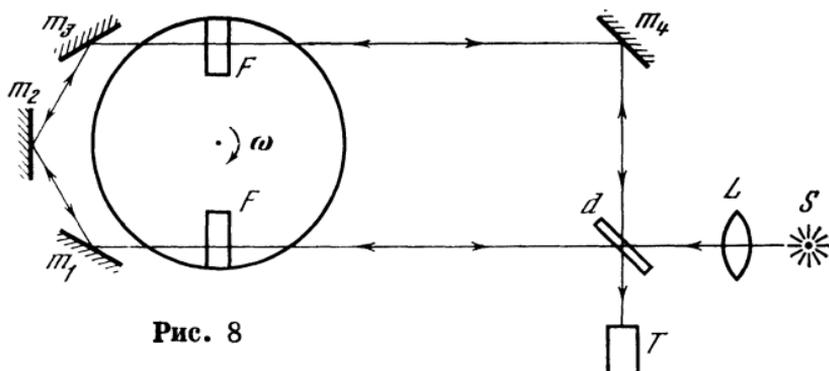


Рис. 8

ния воздуха толщина поглощающего слоя растет. Результаты всех контрольных опытов были истолкованы как опровержение опыта Кантора и как подтверждение постоянства скорости света (было высказано предположение, что положительный эффект у Кантора обусловлен тепловыми потоками воздуха)¹⁶⁴.

В 1963—1964 гг. была проведена серия опытов по проверке второго постулата для γ -лучей. В связи с тем, что γ -лучи очень слабо поглощаются воздухом, изменение их скорости из-за эффекта ретрансляции было маловероятным.

Альвегер, Нильссон и Кьеллман¹⁶⁵ измеряли скорость γ -лучей, испускаемых движущимися и покоящимися атомными ядрами. Возбужденные ядра C^{12*} с энергией 4,43 МэВ имеют период полураспада $6,5 \cdot 10^{-14}$ с и успевают излучить γ -квант до своей остановки, а возбужденные ядра O^{16*} с энергией 6,13 МэВ имеют сравнительно боль-

¹⁶³ Fox J. Experimental evidence for the second postulate of special relativity.— Amer. J. Phys., 1962, 30, p. 297—300; Evidence against emission theories.— Amer. J. Phys., 1965, 33, p. 1—17; Constancy of the velocity of light.— JOSA, 1967, 57, p. 967—968.

¹⁶⁴ Zahejsky J., Kolesnikov V. Optical experiment to verify the second. Postulate of the special theory of relativity.— Nature, 1966, N 5087, p. 1227.

¹⁶⁵ Alväger T., Nilsson A., Kjellmann J. A direct terrestrial test of the second postulate of special relativity.— Nature, 1963, 197, p. 1191.

шой период полураспада $1,2 \cdot 10^{-11}$ с и излучают γ -квант уже после остановки. Скорость ядер определялась по доплеровскому смещению. Углеродные и кислородные мишени, в которых получались возбужденные ядра при облучении γ -частицами, располагались на расстоянии 30 см друг от друга, и их можно было менять местами. Разность времен пролета γ -квантов измерялась с помощью двух приемников, один из которых находился в 1 м от мишеней, а другой — в 5 м. Если скорость γ -квантов не зависит от скорости ядер, то разница времен пролета квантов при перемене мишеней местами в обоих приемниках будет одинакова. Если же скорость ядер прибавляется к скорости γ -квантов, то разность времен пролета γ -квантов, испущенных ядрами C^{12*} и O^{16*} , в опыте должна была составить $\Delta\tau = 0,5 \cdot 10^{-9}$ с. Авторы сделали вывод, что результат подтверждает второй постулат (было получено $\Delta\tau = (-0,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-9}$ с).

Саде ¹⁶⁶ измерял время пролета двух γ -квантов, получаемых при аннигиляции летящего позитрона с электроном мишени. Энергия этих γ -квантов была порядка 0,5 МэВ.

Интерес представляли позитроны, аннигилирующие на лету. В этом случае центр масс системы электрон—позитрон перед аннигиляцией обладал определенной скоростью, от величины которой зависели углы разлета γ -квантов. В опыте счетчики γ -квантов устанавливали под углами $\theta = 20$ и $\theta = 135^\circ$ к направлению позитронного пучка на одинаковых расстояниях от мишеней. Если скорость γ -квантов не зависит от движения центра масс, то в условиях опыта должна наблюдаться разность времен пролета $2 \cdot 10^{-9}$ с. С точностью до 10% была зафиксирована нулевая разность, т. е. подтвержден второй постулат.

Филиппас и Дж. Фокс ¹⁶⁷ пришли к выводу, что результаты предыдущих опытов с γ -лучами недостоверны, поскольку не учитывалось поглощение. Чтобы уменьшить поглощение, они использовали γ -лучи большой энергии (68 МэВ), получающиеся при распаде Π^0 -мезонов.

Π^0 -мезоны образуются при бомбардировке жидкого

¹⁶⁶ Sadeh D. Experimental evidence for the constancy of the velocity of gamma rays, using annihilation in flight.— Phys. Rev. Lett., 1963, 10, p. 271—273.

¹⁶⁷ Filippas T., Fox J. Velocity of gamma rays from a moving source.— Phys. Rev., 1964, 135, p. 1071—1075.

водорода пучком Π^- -мезонов, вылетающих из ускорителя. Образующиеся в данной реакции Π^0 -мезоны всегда имеют постоянную скорость ($v = 0,2$ с). Счетчики устанавливаются так, чтобы регистрировать γ -кванты, разлетающиеся под углом 180° . В этом случае один квант летит в том же направлении, что и Π^0 -мезон, а другой — в противоположном. Если скорость γ -квантов зависит от скорости источника ($c' = c + kv$), то должна наблюдаться разность времен пролета. Достоверно авторам удалось показать только то, что $k < 0,5$, т. е. что простого сложения скоростей не происходит. Они сделали вывод о постоянстве скорости света в пределах ошибок измерений, но ошибки в их опыте велики. Была отмечена трудность учета степени поглощения γ -лучей.

Подобный опыт Альвегер с сотрудниками¹⁶⁸ провел на ускорителе в ЦЕРНе. Π^0 -мезоны, получающиеся при бомбардировке бериллия быстрыми протонами, давали при распаде γ -кванты очень высокой энергии (6 ГэВ). По мнению авторов, для таких квантов поглощением можно пренебречь. Они получили коэффициент увлечения равным $k = (-3 \pm 13)10^{-5}$, что можно рассматривать как убедительное подтверждение второго постулата.

Кантор¹⁶⁹ указал, что интерпретация опытов с γ -лучами отнюдь не так проста, как кажется с первого взгляда. Вывод о постоянстве скорости γ -квантов делается на основе некоторых недостаточно проверенных предпосылок. Так, измерение скорости частиц производится косвенными методами, разработанными на основе формул, учитывающих постоянство скорости света. Кантор считает, что теория поглощения Фокса, являющаяся экстраполяцией теории нормальной дисперсии для видимого спектра, не имеет экспериментального обоснования в области γ -лучей.

В 1969—1971 гг. были предприняты новые попытки опровергнуть второй постулат СТО. Материалом для этого послужили результаты радиолокационных измерений расстояния от Земли до Венеры, выполненных в 1961—1966 гг. Уоллес¹⁷⁰ пришел к выводу, что все труд-

¹⁶⁸ *Alväger T., Farley F., Kjellmann J., Wallin J.* Test of the second postulate of special relativity. — *Phys. Lett.*, 1964, 12, p. 260—262.

¹⁶⁹ *Kantor W.* Speed of gamma rays emitted by high speed particles. — *Spectr. Letters*, 1971, 4, p. 245—253.

¹⁷⁰ *Wallace B.* Radar testing of the relative velocity of light in space. — *Spectr. Lett.*, 1969, 2, p. 361—367; Radar-evidence that the velocity of light in space is not c . — *Spectr. Lett.*, 1971, 4, p. 79—84.

ности интерпретации полученных результатов можно устранить введением баллистической гипотезы. По мнению Уоллеса, только баллистическая гипотеза может объяснить aberrацию звезд в отдаленных галактиках, у которых радиальная скорость близка к c . Чтобы примирить с баллистической гипотезой излучение релятивистских протонов и поперечный доплер-эффект, Уоллес конструирует новую динамическую теорию эфира, призванную заодно объяснить структуру элементарных частиц ¹⁷¹.

Сторонником баллистической гипотезы выступил и Рапье ¹⁷². Он опирается на данные об угловом диаметре квазара 3C-279, полученные методом радиоинтерферометра с очень большой базой. По величине красного смещения расстояние до квазара определено в $3 \cdot 10^9$ световых лет. Тогда его угловой диаметр (1,5 мс) соответствует расстоянию 20 световых лет, причем за месяц это расстояние увеличилось на 10%. Рапье толкует это так: два радиопередатчика удаляются друг от друга со скоростью, большей чем $6 c$.

Луазо ¹⁷³ сравнивает спектры небесных и земных источников, полученные на одних и тех же фотопластинках. Считая, что чувствительность пластинки определяется только частотой поглощаемого света, и сравнивая время экспозиции до нужной степени почернения, он получил, что скорость света от источника равна $1,5 c$.

Критический обзор некоторых подобных попыток опровергнуть второй постулат был дан в ¹⁷⁴. Авторы отметили, что многие попытки ревизии теории относительности опираются либо на неточные экспериментальные данные, либо на новые, недостаточно проверенные, представления астрофизики. Эти и другие попытки ревизии теории относительности не увенчались каким-либо успехом.

¹⁷¹ *Wallace B.* Cosmological implications of a $c + v$ relative velocity of light.— *Spectr. Lett.*, 1970, 3, p. 115—121.

¹⁷² *Rapier P.* A recent application of detection and estimation practices in radio and radar astronomy.— *Spectr. Lett.*, 1971, 4, p. 303—311.

¹⁷³ *Loiseau J.* Une expérience permettant de connaître que la vitesse de la lumière.— *Appl. Optics*, 1972, 11, p. 470—472.

¹⁷⁴ *Horedt G., Ruck H.* Constancy of the velocity of light in vacuum.— *Spectr. Lett.*, 1972, 5, p. 455—461.

УДК 530.12.

Переписка А. Эйнштейна и М. Бессо, 1903—1955.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Публикуется окончание переписки, начало которой опубликовано в «Эйнштейновских сборниках, 1974 и 1975—1976».

УДК 530.12

Усиление электромагнитных волн в присутствии движущихся сред. Болотовский В. М., Столяров С. Н.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Обсуждаются вопросы усиления электромагнитных волн в присутствии движущихся сред. Указано, что в прозрачных или поглощающих средах могут усиливаться только те волны, плотность энергии которых отрицательна. Это иллюстрируется рядом примеров. В частности, с помощью аппарата электродинамики движущихся сред изучено распространение электромагнитных волн в движущихся проводящих средах; решена задача о рассеянии волн на медленно вращающемся диэлектрическом цилиндре с учетом потерь, а также обсуждаются результаты расчетов отражения и преломления волн на сверхсветовом тангенциальном разрыве скорости движения двух сред и ускорения заряженных частиц в потоковых системах.

Ил. 6. Библ. 29 назв.

УДК 530.12

К вопросу о кинематике абсолютно твердого тела в теории относительности. Нетер Ф.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Обсуждаются различные виды движений абсолютно твердого тела. Получены дифференциальные уравнения для условий Борна в эйлеровской форме. Показано, что условия Борна неприменимы для ускоренного вращательного движения абсолютно твердого тела.

УДК 530.12

Эйнштейн и проблема сверхпроводимости. Явелов Б. Е.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Прослежены своеобразные связи А. Эйнштейна с Лейденской криогенной лабораторией, ее руководителем Х. Камерлингом-Оннесом и с его ранними исследованиями по сверхпроводимости. Отмечен живой интерес Эйнштейна к вопросам электронной теории металлов. Проанализировано содержание его статьи «Теоретические замечания к сверхпроводимости металлов». Указано на связь проблематики сверхпроводимости с постановкой опытов, приведших к открытию эффекта Эйнштейна — де Гааза.

УДК 530.12

Взаимосвязь науки и искусства в мировоззрении Эйнштейна. Фейнберг Е. Л.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Проанализирована взаимосвязь науки и искусства во взглядах Эйнштейна.

Ил. 1. Библ. 29 назв.

УДК 530.12

Изобретательская деятельность А. Эйнштейна. Френкель В. Я., Явелов Б. Е.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Рассказывается о работе Эйнштейна в Бернском патентном бюро, его участии в разработках высокочувствительного электрометра, гироскопических компасов. Описаны технические изобретения, запатентованные Эйнштейном совместно с Л. Сцилардом, Р. Гольдшмидтом и Г. Бунки (холодильники, МГД-пасосы, магнотриксционный слуховой аппарат, автоматическая фотокамера); показана широта чисто технических интересов великого теоретика, изложены вопросы, касающиеся экспериментаторской деятельности, в частности опытов, приведших к открытию гидромагнитного эффекта Эйнштейна — де Гааза.

Ил. 8. Библ. 39 назв.

Эйнштейновский сборник, 1977

*Утверждено к печати
Отделением ядерной физики АН СССР*

Редактор В. А. Никифоровский
Редактор издательства Э. С. Павлинова
Художественный редактор Т. П. Поленова
Технический редактор Л. В. Каскова
Корректоры Л. В. Лукичева, П. А. Пирязев

ИБ № 17002

Сдано в набор 27.02.80
Подписано к печати 13.06.80
Т-09840. Формат 84×108¹/₃₂
Бумага № 1
Гарнитура обыкновенная
Печать высокая
Усл. печ. л. 17,22. Уч.-изд. л. 18,9
Тираж 7400 экз. Тип. зак. 2929
Цена 1 р. 60 к.

Издательство «Наука»
117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90
2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10