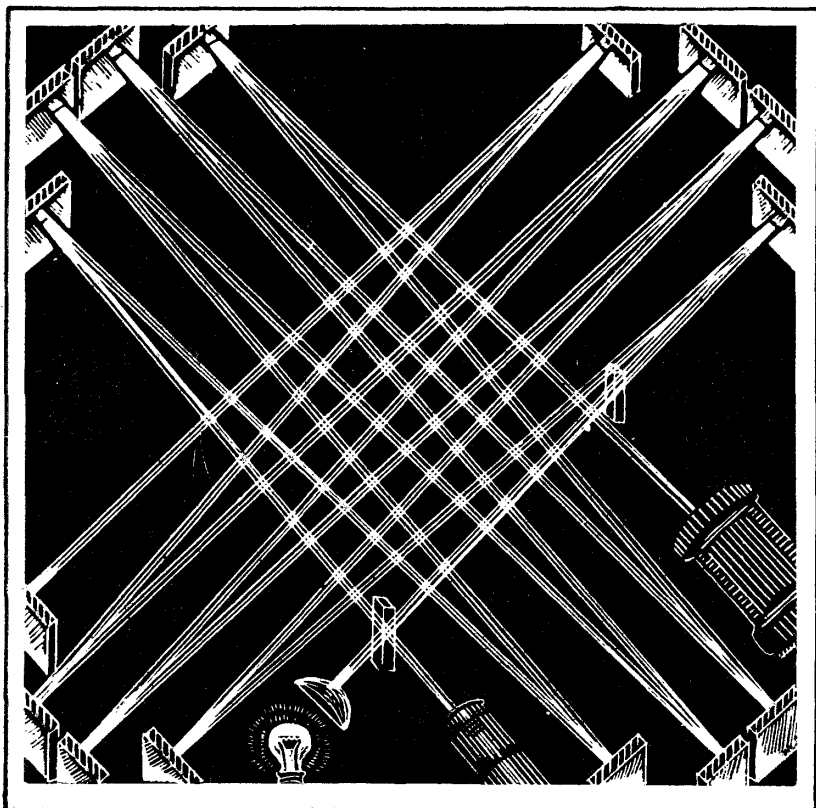


У.И.ФРАННФУРТ , А.М.ФРЕНН

ОПТИКА
ДВИЖУЩИХСЯ ТЕЛ



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА



У.И.ФРАНКФУРТ , А.М.ФРЕНН

**ОПТИКА
ДВИЖУЩИХСЯ ТЕЛ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1972

Электродинамика движущихся тел, и в частности оптика, сыграла важную роль в истории физики. Ею занимались все крупнейшие ученые — от Эйлера, Юнга и Френеля до Планка, Эйнштейна, Дирака, Ландау.

Эта книга посвящена оптике движущихся тел (и охватываемых ею явлений) на всех этапах развития. Особое внимание уделено роли, которую сыграла оптика в развитии теории относительности, осветившей с единой точки зрения основные явления оптики движущихся тел — абберацию, эффект Допплера, опыты Майкельсона. Популярно изложены современные экспериментальные методы оптики движущихся тел.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся историей и проблемами современной физики.

Ответственный редактор

Л. С. ФРЕЙМАН

Введение

В любом оптическом опыте участвуют источник света, наблюдатель (наблюдательный прибор) и среда, в которой распространяется свет. Среда может быть однородной (пустота, воздух, жидкость, стекло и т. д.) и неоднородной, когда на пути луча находятся различные тела (зеркала, призмы, пластинки, решетки и т. д.). Если источник, или наблюдатель, или среда, или отдельные части среды движутся относительно друг друга, то законы оптических явлений, происходящих при этом, могут меняться по сравнению с законами явлений, происходящих, когда все эти тела покоятся. Кроме того, могут возникнуть и совершенно новые явления. Весь этот круг вопросов и является предметом оптики движущихся тел (релятивистской оптики).

Оптика движущихся тел прошла значительный путь развития — от первых разрозненных астрономических наблюдений середины XVII в. до стройного замкнутого учения в специальной теории относительности. Фактически решение основных проблем оптики движущихся тел содержалось уже в первой работе Эйнштейна 1905 г. «К электродинамике движущихся тел». И только в конце 30-х годов нашего века возник ряд новых интересных аспектов, связанных с движением источников света в преломляющих средах со скоростью, близкой к скорости света или даже превышающей скорость света в среде. Эти новые аспекты выявились главным образом в трудах советских физиков (В. Л. Гинзбург, И. Е. Тамм, И. М. Франк, П. А. Черенков); разработка этих вопросов еще продолжается, поэтому говорить об их исторической оценке еще рано.

Знание исторического развития любой основной теории всегда важно, однако не всегда необходимо. Но при рассмотрении вопросов теории относительности, по

выражению Л. И. Мандельштама, надо исподволь подходить к тем парадоксальным с точки зрения старого «здравого смысла» выводам этой теории, надо осознать неизбежность этих выводов, надо знать, как пытались обойти трудности крупнейшие ученые и как это в действительности не удавалось.

Исторический взгляд на оптику движущихся тел позволяет дать правильную оценку многочисленным опытам по экспериментальному обоснованию специальной теории относительности. Обзор этих опытов, начиная с опытов Физо и кончая работами последних лет, занимает значительную часть книги. Опыты эти генетически связаны с проводившимися параллельно измерениями одной из фундаментальных постоянных современной физики — скорости света. Место оптики движущихся тел в генезисе теории относительности выявляется до конца на фоне очерка истории теории относительности.

Развитие оптики движущихся тел на разных этапах тесно переплеталось с развитием наблюдательной астрономии, теории упругости, гидродинамики, акустики, астрофизики, спектроскопии, квантовой теории света. Исторический анализ позволяет выделить вклад в науку собственно оптики движущихся тел.

Всю историю развития оптики движущихся тел можно разделить на пять периодов.

В течение первого периода (1728—1800) была открыта абберрация света; разрозненные наблюдения и, в меньшей мере, опыты привели к постановке первых задач — о зависимости скорости света от скорости источника и о влиянии движения наблюдателя на оптические явления. Но в рамках господствовавшей в XVIII в. корпускулярной теории света явление абберрации оставалось изолированным и не затрагивало коренных физических проблем.

Второй период (1800—1845) характеризуется более систематическим накоплением эмпирического материала; возникновение волновой теории сразу же выдвинуло на первый план вопрос об отношении вещества и эфира — появились концепции неподвижного и увлекаемого эфира. Был открыт эффект Допплера.

Третий период (1845—1892) является периодом создания классической оптики движущихся тел в рамках упругой волновой теории света на основе данных, полученных при выполнении большого числа опытов первого и

второго порядка относительно v/c . Хотя в середине этого периода была создана электромагнитная теория света, оптические явления в движущихся телах рассматривались обособленно от электродинамических.

В четвертом периоде (1892—1905) оптика становится частью электродинамики, что отразилось и на рассмотрении оптических явлений в движущихся телах. Успех электронной теории Лоренца и неудачи электродинамики Герца обусловлены были в значительной мере их возможностями объяснения совокупности экспериментальных данных оптики движущихся тел.

Пятый период (после 1905 г.) является релятивистским. Теория относительности разрешила весь клубок противоречий, связанных с эфиром, и позволила с единой точки зрения охватить явления оптики движущихся тел.

Помещенная в конце книги достаточно подробная библиография по оптике движущихся тел предназначена для читателей, желающих более глубоко ознакомиться с вопросами оптики движущихся тел, и экспериментального обоснования теории относительности.

Глава I

Основные явления оптики движущихся тел

Аберрация света

Открытие аберрации. Одной из важнейших задач наблюдательной астрономии последних десятилетий XVII в. было обнаружение параллакса звезд. Еще Коперник указывал, что существование параллакса является прямым следствием гелиоцентрической теории. Тот факт, что это следствие коперниканской системы не удавалось установить экспериментально к 70-м годам XVII в., оставался последним существенным доводом против самой теории [1]. По-видимому, первым, кому удалось наблюдать некоторое отклонение в положении звезд с годичным периодом, был французский астроном Ж. Пикар (1671). Затем Гук (1674), Флэмстид (1689—1698) и др. [2] также обнаружили отклонения, но результаты их измерений количественно не согласовывались с теоретическими вычислениями параллактического смещения [3]. В декабре 1725 г. серию измерений начал в Кью, близ Лондона, С. Молине, в распоряжении которого был хороший зенитный сектор мастера Грэхема. В наблюдениях участвовал профессор Оксфордского университета астроном Джеймс Д. Бредли. 17 декабря он заметил небольшое смещение звезды γ Дракона к югу; в последующие дни смещение возрастало, достигнув к началу марта 20". Несколько дней звезда не испытывала видимых перемещений, после чего она начала движение на север и в июне заняла то же положение, что и в декабре. Во второй половине года звезда проделала точно такой же путь на север и обратно.

Замеченное Бредли смещение звезды не могло быть приписано ни случайным ошибкам инструмента, ни параллаксу (если бы это был параллакс, то движение к югу должно было бы начаться в декабре, а не в марте, а

к северу—в июне, а не в сентябре). Для выяснения причины движения звезд требовались дальнейшие исследования. С этой целью Бредли заказал новый телескоп, который был установлен в Уанстеде (Эссекс). Этот прибор давал возможность следить и за звездами, более отдаленными от полюса. В 1726—1728 гг. наблюдались 37 Жирафа (по каталогу Флэмстида), β Дракона, η Большой Медведицы, α Кассиопеи, τ Персея, α Персея, Капелла. Для всех этих звезд амплитуда перемещения заключалась в пределах $40''$ — $41''$ (среднее значение $40'',4$). Вскоре Бредли заметил, что строго по прямой перемещаются только звезды, лежащие в плоскости эклиптики, остальные описывают небольшие эллипсы, а звезда у полюса—окружность. Последние выводы правильны, но Бредли не мог их строго обосновать, поскольку наблюдал только склонения и нигде не говорит об измерениях в прямом восхождении звезд. Последние были найдены в 1730 г. итальянцем Манфреди.

Многочисленные наблюдения позволили Бредли не только установить общие закономерности явления, но и выяснить его причину. В конце 1728 г. Бредли нашел правильное объяснение явления и изложил его в письме к королевскому астроному Галлею. Приведем объяснение словами самого автора.

«Наконец, я догадался,— писал Бредли,— что все упомянутые явления происходят от постепенного распространения света и годичного движения Земли по своей орбите. Ибо я видел, что если свет распространяется во времени, то кажущееся положение неподвижного предмета, когда глаз находится в покое, будет иное, чем когда он движется в направлении, уклоняющемся от линии, соединяющей предмет с глазом, и что когда глаз движется в различных направлениях, то и кажущиеся положения объекта будут различны.

Я рассмотрел это обстоятельство следующим образом. Я принял SA за луч света, перпендикулярно падающий на линию BD ; тогда, если глаз покоится в A , он должен видеть предмет в направлении AC , будет ли свет распространяться во времени или передаваться мгновенно. Но если глаз движется от B к A , а свет распространяется во времени со скоростью, относящейся к скорости движения глаза как SA к BA , то, когда свет движется от C к A , в то время как глаз перемещается из B в A , та частица

его, по которой будет распознан предмет, когда глаз придет в A , находится еще в C , когда глаз помещается в B . Соединив точки B и C , я вообразил на месте линии CB трубку (наклоненную к линии BD под углом DBC) такого диаметра, который пропускал бы только одну световую частицу; тогда легко понять, что световая частица C (по которой предмет воспринимается глазом по

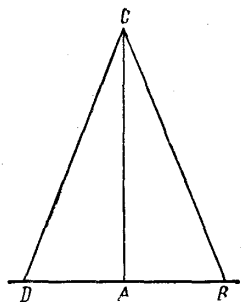


Рис. 1

прибытии его в A) пройдет через трубку BC , если она наклонена к BD под углом DBC , и будет сопровождать глаз в его движении из B в A ; ясно также, что она не достигнет глаза, помещенного позади такой трубки, если она будет наклонена к DB под иным углом...

Хотя, таким образом, истинное или действительное направление объекта перпендикулярно к линии, по которой движется глаз, однако видимое направление окажется иным, так как оно, без сомнения, будет совпадать с направлением трубки; но различие между истинным и кажущимся положениями, при равенстве прочих условий, будет больше или меньше в зависимости от различного отношения между скоростью света и глаза. Так что если бы свет распространялся мгновенно, то между истинным и кажущимся положениями объекта не было бы разницы, хотя бы глаз даже и находился в движении; так как в этом случае AC бесконечно велико по сравнению с AB и угол ACB (различие между истинным и кажущимся положениями) превращается в нуль. Но если свет распространяется во времени (что, надеюсь, охотно допускают многие философы нашего века), тогда из предыдущих рассуждений очевидно, что всегда будет существовать разница между истинным и кажущимся поло-

жениями объекта, если только глаз не будет двигаться прямо к нему или от него»¹.

Таким образом, проведенное с точки зрения корпускулярной теории света объяснение Бредли опирается на два основных допущения: 1) Земля движется вокруг Солнца; 2) скорость света конечна.

Бредли фактически выводит, хотя и не записывает, формулу для угла aberrации

$$\sin \alpha = \frac{v}{c} \quad (1)$$

(v — орбитальная скорость Земли, c — скорость света). Новое явление получило название aberrации света. Сартон [4] задался целью установить, когда проник в науку термин «абберация». По его просьбе были просмотрены основные научные журналы за 1729—1749 гг. Оказалось, что впервые в них слово «абберация» встречается в статье Клеро² 1737 г. и в письме того же года Мопертюи³ к Бредли. Но в обоих случаях термин не определялся, а использовался как известный. Так, Клеро пишет: «Это Бредли астрономия обязана замечательным открытием aberrации света». Из письма Мопертюи: «...согласно вашей теории aberrации, вызываемой движением света...». Поэтому Сартон говорит, что термин появился в 1737 г. (или ранее). Но, по-видимому, он не обратил внимания, что еще в 1729 г. в Болонье вышла книга Манфреди «*De annuis inerrantium stellarum aberrationibus*» (курсив наш. — Ф. Ф.). В ней подводятся итоги всех наблюдений, обнаруживших видимые движения звезд, и показывается, что они не могут объясняться параллаксом. Здесь любые смещения называются aberrацией. А в статье 1730 г.⁴ Манфреди явно уже говорит о «новой теории aberrации Бредли».

¹ J. Bradley. A Letter from the Reverend Mr. James Bradley, Savilian Professor of Astronomy at Oxford and F. R. S. to Dr. Edmund Halley, Astronom. Roy. giving an Account an a new discovered Motion of the Fix'd Stars. «Phil. Trans.», 1728, 35 p. 637—660.

² A. C. Clairaut. De l'aberration apparente des étoiles, causée par le mouvement progressif de la lumière. «Mém. Acad. Paris», 1737, p. 205—227.

³ J. Bradley. Misscelaneous works and correspondence. Oxford, 1832, p. 404.

⁴ E. Manfredi. De novissimis circa siderum fixorum errores observationibus Epistola. «Comm. Acad. Bon.», 1730 (1731), 1, p. 599—634.

Приведенная выше формула относится к случаю, когда свет падает перпендикулярно направлению движения Земли. При произвольном угле φ нужно брать составляющую скорости и

$$\sin \alpha = \frac{v}{c} \sin \varphi. \quad (2)$$

При любом положении звезды на небе дважды в год скорость Земли перпендикулярна направлению на звезду и абберация максимальна. Эта величина, одинаковая для всех звезд, называется постоянной абберации.

Необходимо подчеркнуть (а в XVIII в. этот факт недостаточно четко отмечался), что если бы направление движения Земли в течение года не менялось, то абберация была бы некоторым постоянным смещением, в существовании которого нельзя было бы убедиться наблюдениями. Наблюдатель видит светило в том месте, в котором оно находилось в момент испускания света, но в своей системе отсчета. Появление угла абберации связано с переходом из системы источника к системе наблюдателя. Поскольку при движении вместе с Землей по замкнутой орбите наблюдатель переходит из одной мгновенной инерциальной системы в другую, угол абберации меняется, что и позволяет его определить наблюдениями.

Развитие представлений об абберации в корпускулярной и волновой теории света. Открытие абберации света было важнейшим вкладом XVIII в. в оптику. Но в рамках механической эмиссионной теории света, при отсутствии точных представлений о влиянии движения наблюдателя, источника и промежуточной среды на характер оптических явлений, принципиальные физические вопросы, связанные с этими явлениями, выпадали из поля зрения, на первый план выдвигались весьма интересные астрономов задачи редукции астрономических наблюдений.

Хотя взгляд на свет как на поток частиц позволял строить аналитическую теорию абберации без каких-либо дополнительных допущений о природе явления, физические факторы неявно фигурировали в основе используемых рассуждений. Одним из таких факторов было молчаливо принимаемое всеми авторами предположение о независимости скорости света от движения участвующих в явлении тел.

Интерес представлял и вопрос, выдвинутый Бошковичем. Поскольку угол aberrации зависит от величины скорости света, то, если бы удалось каким-либо образом увеличить скорость света, этим бы уменьшилась aberrация. В 1766 г. в письме к Лаланду Бошкович [5] выдвинул идею экспериментальной проверки этого утверждения. Если трубу телескопа, служащего для наблюдения aberrации, заполнить водой, то, так как по Ньютону скорость света в воде больше, чем в воздухе, величина aberrации должна уменьшиться. Он даже считал возможным наблюдение aberrации земных источников.

Решение этих вопросов было получено значительно позже.

Вторая проблема, тесно переплетающаяся с предыдущей, была поставлена шире: выяснить влияние движения тел на характер оптических явлений. В частности, Мичелл [6] задался целью выяснить, будет ли отличаться отражение и преломление световых лучей, идущих от звезд и от земных тел, вследствие различия в движении источников. Если бы такое различие существовало, то оно должно было бы влиять на показатель преломления. Но поскольку на Земле получить скорости, достаточные для получения заметного эффекта, было невозможно, Блейр, например, предлагал изучать свет, идущий от противоположных краев Юпитера. Вследствие вращения планеты скорости лучей, идущих от краев, относительно земного наблюдателя должны быть разными. Но действительное осуществление подобных опытов в то время выходило за рамки возможностей эксперимента.

Переход к волновым представлениям о природе света в рамках механической и позже классической электромагнитной теории сразу же наталкивался на вопрос о свойствах промежуточной среды — эфира. В понятии эфира были скрыты противоречия, значительно затруднявшие развитие волновой теории на всех ее этапах. Преодоление этих противоречий вместе с тем значительно продвинуло понимание оптических и электродинамических явлений в движущихся телах и привело в конце концов к созданию специальной теории относительности. «Мы видим,— писал Л. И. Мандельштам,— что весь вопрос приобретает принципиальный интерес, что здесь сразу же возникает та кардинальная проблема, которая потом оставалась неразрешенной вплоть до принципа отно-

сительности,— проблема взаимодействия между движущейся Землей и эфиром, а тем самым проблема взаимодействия между эфиром и материей вообще»¹.

Первая попытка объяснить аберрацию в волновой теории света принадлежит Томасу Юнгу [7]. Он заметил, что сам факт наблюдения аберрации вынуждает принять допущение о неувлекаемости эфира движущейся Землей. При этом он признает, что подобное допущение трудно согласовать с известными свойствами обычной материи. Принятие гипотезы неподвижного эфира позволило Юнгу дать волновое объяснение аберрации, отличающееся фактически от ранее применявшихся в корпускулярной теории лишь терминологически.

Принципиально новый шаг в теории аберрации сделал Френель. В 1818 г. было опубликовано его письмо к Араго «Относительно влияния движения Земли на некоторые оптические явления». Письмо было ответом на просьбу Араго объяснить с волновой точки зрения результаты проведенных им еще в 1810 г. опытов по обнаружению влияния движения Земли на преломление света. С этой целью он наблюдал преломление света звезд в призме, когда Земля (а значит, и призма) двигалась к звезде и от звезды. Если в первом случае скорость Земли должна была прибавляться к скорости света, то во втором она вычитается. По расчетам Араго разница в углах отклонения в обоих случаях должна была составить $2'$, что могло быть измерено. Но опыты дали отрицательный результат, и Араго даже не опубликовал их результаты, хотя и доложил о них в Академии. Значение работы Френеля [8] определяется не тем, что он нашел объяснение для опыта Араго, а широтой постановки вопроса о влиянии движения Земли вообще на оптические явления. Фактически с нее начинается оптика движущихся тел как особая физическая проблема, связанная с фундаментальными представлениями, лежащими в основе построения оптики и электродинамики в целом. Абберация света перестает быть изолированным явлением, требующим для своего объяснения отдельной теории. И хотя в дальнейшем в названии многих физических статей в том или ином сочетании встречается выражение «теория

¹ Л. И. Мандельштам. Полное собрание трудов, т. V. М., 1950, стр. 98.

аберрации», на самом деле в них идет речь об основах оптики движущихся тел. Если отвлечься от частных случаев, то общая схема всех этих работ та же, что и у Френеля: на основании определенной гипотезы об увлечении эфира объяснить одновременно две группы фактов — существование аберрации и отсутствие влияния движения Земли на оптические явления.

Хотя допущение полного увлечения эфира движущейся Землей легко объясняет отрицательные результаты опыта Араго, Френель его отвергает, поскольку при этом возникают непреодолимые трудности в объяснении аберрации. Поэтому в основу своей теории Френель ставит предположение о неподвижном эфире и вытекающее из него положение о независимости скорости света от скорости источника. Тогда абберация получается просто, но отсутствие влияния движения на преломление в призме требует дополнительных разъяснений. Тут Френель вводит гипотезу о том, что «нашим земным шаром увлекается только некоторая часть этой среды, а именно та, которая образует собой превышение его плотности по сравнению с окружающим эфиром». При таком предположении скорость распространения волн должна увеличиваться благодаря движению среды «только на скорость центра тяжести системы».

Отсюда легко выводится коэффициент увлечения света движущимися телами. Координату центра тяжести неподвижной части эфира обозначим x_1 , увлекающейся — x_2 , а всего эфира — x ; превышение плотности эфира ρ' в стекле над плотностью эфира в среде ρ будет $\rho' - \rho$, причем $\rho'/\rho = n^2$ (n — относительный показатель преломления). Из формулы для центра масс

$$x = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

получаем

$$dx = \frac{m_1 dx_1 + m_2 dx_2}{m_1 + m_2}.$$

Поскольку $dx_1 = 0$, $dx_2 = v dt$, $m_1 = v\rho$, $m_2 = v(\rho' - \rho)$, имеем

$$dx = \frac{v(\rho' - \rho) v dt}{v\rho + v(\rho' - \rho)} = \frac{n^2 - 1}{n^2} v dt.$$

Скорость перемещения центра масс

$$\frac{dx}{dt} = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v;$$

значит, френелевский коэффициент увлечения будет $k = 1 - \frac{1}{n^2}$, а скорость света в стекле для неподвижного наблюдателя равна

$$c' = \frac{c}{n} \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v. \quad (3)$$

Если считать эту формулу правильной, то можно объяснить опыт Араго. Пусть пучок света LL падает на неподвижную призму (рис. 2). Тогда, на основании принципа Гюйгенса фронт преломленной волны будет DC ($AD \cdot n = BC$), и луч отклоняется на угол δ ; если же призма движется со скоростью v в том же направлении, то через время τ , необходимое верхнему лучу для достижения грани призмы, призма займет положение $E'G'F'$. В этом случае подобное же построение дает для фронта преломленной волны положение $D'C'$ (луч отклоняется на угол δ'). Но здесь необходимо учесть, что путь AD' луч проходит в движущейся призме, а следовательно, скорость света $c' = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v$. Несложные расчеты, проведенные с учетом лишь величин первого порядка относительно v/c , позволяли вывести закон преломления с

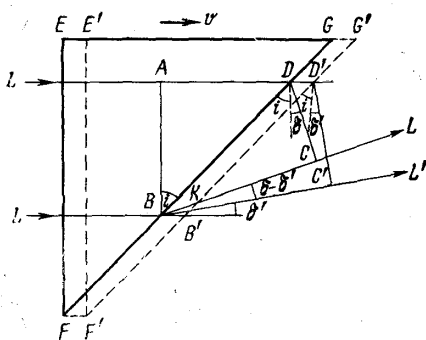


Рис. 2

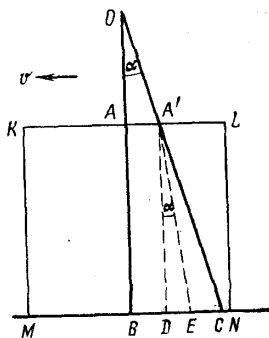


Рис. 3

учетом движения и вычислить разность углов отклонения

$$\delta - \delta' = \frac{v}{c} \sin \delta.$$

Из этой формулы видно, что зрительная труба должна быть установлена на звезду в том же направлении, как если бы призма покоилась, ибо $v/c \sin \delta$ есть угол абerrации. Через призму мы наблюдаем звезду в том направлении, в которое она кажется смещенной благодаря абerrации, измененном на угол отклонения, обусловленной покоящейся призмой. Значит, с точностью до величины второго порядка движение Земли не влияет на преломление света. Френель не сделал отсюда общего вывода, а воспользовался введенными им представлениями лишь для обсуждения вопроса, поставленного Бошковичем: изменится ли угол абerrации, если телескоп заполнить водой? Вот рассуждения Френеля (рис. 3). Пусть $KLNM$ — труба заполненного водой телескопа, O — источник света; направление скорости наблюдателя обозначено стрелкой. В отсутствие воды для наблюдения O трубу вследствие абerrации следует направить вдоль CA_1O , причем, так как угол мал, $AA_1/AO = \tan \alpha = \sin \alpha = \frac{v}{c}$. Если трубу наполнить водой, то на границе AA' луч преломляется, так что

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = n, \quad \frac{DE}{l} = \tan \alpha' = \sin \alpha' = \frac{\sin \alpha}{n} = \frac{v}{cn},$$

где c' — скорость света в воде. Внутри движущейся воды световые волны увлекаются со скоростью $v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$, так что за время прохождения светом трубы ($A'E = A'D = l$) общее смещение будет

$$CE = \frac{lv}{c'} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

и

$$CD = CE + ED = \frac{l}{c'} v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) + l \frac{v}{cn} = lv \left(\frac{1}{c'} - \frac{1}{c'n^2} + \frac{1}{cn}\right) = l \frac{v}{c'}.$$

полнительная абберация, вызванная прохождением света через воду.

Теоретически вычисленная разница (при наличии эффекта) должна была быть порядка нескольких секунд, тогда как в наблюдениях Эйри она не превышала 1", что было в пределах ошибок измерения.

В отличие от Френеля Стокс в 1845—1846 гг. построил теорию абберации, исходя из гипотезы о полном увлечении эфира движущейся Землей. В основе его теории были положены два постулата: 1) у поверхности Земли скорость эфира равна скорости Земли (нет скольжения); 2) движение эфира невихревое, существует потенциал скоростей. Стоксу [10] удалось объяснить абберацию и получить френелевский коэффициент увлечения, а следовательно — построить всю оптику движущихся тел. Но Лоренц [11] указал на несовместимость двух исходных предположений Стокса. Из гидродинамики известно, что существование потенциала скоростей для несжимаемой жидкости при поступательном движении в ней шара нельзя совместить с требованием равенства скорости шара и жидкости по величине и направлению. Если допустить, что потенциал скорости существует и что нормальные компоненты равны, то этим полностью определяется движение среды, причем тангенциальные компоненты окажутся разными. А это означает, что будет иметь место скольжение эфира и увлечение его Землей не будет полным. Если же принять только первый постулат, то не удастся построить теорию абберации.

Вся дальнейшая история попыток построения полной непротиворечивой теории оптических явлений в движущихся телах вплоть до создания теории относительности является ярким свидетельством именно невозможности построения такой теории как в рамках механической волновой теории, так и позже, в рамках электромагнитной теории света. По этому поводу Лоренц писал в 1895 г.: «Вопрос о том, принимает ли участие эфир в движении весоных тел, все еще не нашел ответа, удовлетворяющего всех физиков. Для решения можно было бы привлечь в первую очередь абберацию и связанные с ней явления, но до сих пор ни одна из двух спорящих теорий, ни Френеля, ни Стокса, не оправдала себя по отношению ко всем наблюдениям. Поэтому при выборе между обоими воззрениями можно исходить только из того, что сравни-

ваются между собой оставшиеся с обеих сторон трудности»¹.

Тем не менее вторая половина XIX в. имеет для развития оптики движущихся тел то значение, что в ходе обсуждения экспериментов и теорий постепенно выкристаллизовывались два бесспорных заключения: о независимости скорости света от движения источника и о правомерности распространения принципа относительности на оптические явления, т. е. те положения, которые легли в основу специальной теории относительности.

Релятивистская трактовка абберационных явлений. В классической теории, как мы видели, вопросы абберации могли быть решены только после выбора определенных допущений о взаимоотношении эфира с весомой материей. Построение теории и полученные результаты существенно определялись тем, принимается ли увлечение эфира движущимися телами или эфир предполагается неподвижным. В релятивистской оптике абберация логически не связана непосредственно с комплексом вопросов, возникающих при рассмотрении увлечения света, являясь, как и увлечение, чисто кинематическим эффектом.

Формула абберации легко получается из основных соотношений релятивистской кинематики².

Пусть штрихованной будет система, связанная с Землей (K'), а нештрихованной — связанная с Солнцем (K); релятивистские формулы сложения скоростей

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}, \quad u'_y = \frac{u_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}.$$

Если угол между идущим от звезды лучом и скоростью Земли будет соответственно α и α' , то, учитывая, что $u_x = c \cos \alpha$ и $u_y = c \sin \alpha$, получим после деления u'_y на u'_x

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{\sin \alpha \sqrt{1 - \beta^2}}{\cos \alpha - \beta}, \quad \text{где } \beta = \frac{v}{c}. \quad (4)$$

¹ H. A. Lorentz. Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Medien. Leiden, 1895, S. 5.

² В. Паули. Теория относительности. М.—Л., 1947, стр. 33; П. Бергман. Введение в теорию относительности. М., 1947, стр. 59; В. А. Угаров. Специальная теория относительности. М., 1969, стр. 80—82.

Введя для изменения угла α , при переходе из одной системы в другую, обозначение $\Delta\alpha = \alpha' - \alpha$, получим, пренебрегая β^2 ,

$$\operatorname{tg} \alpha' - \operatorname{tg} \alpha = \Delta\alpha \frac{1}{\cos^2 \alpha} = \frac{\beta \sin \alpha}{\cos^2 \alpha}.$$

Отсюда

$$\Delta\alpha = \beta \sin \alpha,$$

т. е. получили классическую формулу аберрации.

Другой упрощенный способ вывода релятивистской формулы аберрации дал в своей работе Б. Н. Гиммельфарб¹. Обозначим (рис. 5) отрезки AD и CD , с помощью которых определяется угол α' , соответственно x и y в системе K , x' и y' — в системе K' . Тогда $\operatorname{ctg} \alpha' = \frac{x'}{y'}$. По-

скольку система K движется со скоростью v относительно K' , происходит сокращение длины в направлении движения и

$$x' = \frac{x}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad y' = y.$$

Отсюда

$$\operatorname{ctg} \alpha' = \frac{x}{y \sqrt{1-\beta^2}}.$$

Поскольку

$$x = c \cos \alpha + v \quad \text{и} \quad y = c \sin \alpha,$$

$$\operatorname{ctg} \alpha' = \frac{c \cos \alpha + v}{c \sin \alpha \sqrt{1-\beta^2}} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \alpha' = \frac{\sin \alpha \sqrt{1-\beta^2}}{\cos \alpha + \beta}.$$

Поскольку из преобразований Галилея вообще не следует никакого отклонения нормали к фронту волны (направления распространения волны), для объяснения аберрации приходилось вводить понятие о своеобразном «необыкновенном» луче, направление распространения которого в случае движущихся тел не совпадает с на-

¹ Б. Н. Гиммельфарб. К объяснению аберрации звезд в теории относительности. «Успехи физических наук», 1953, 51, стр. 99—114. Это наиболее подробная из известных нам работ по данному вопросу.

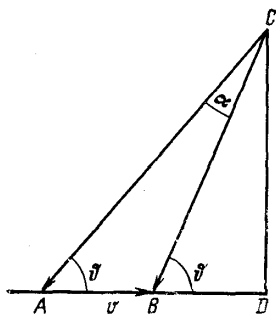


Рис. 5

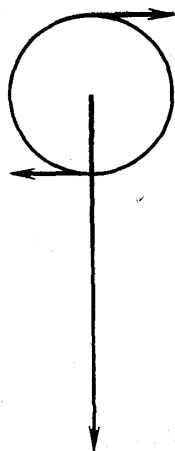


Рис. 6

правлением истинного луча. В теории относительности этой трудности нет: в любой инерциальной системе направление переноса энергии всегда совпадает с направлением нормали к фронту волны. Волновая поверхность есть поверхность одновременно равных фаз. Поэтому в классической теории, где одновременность абсолютна, положение нормали неизменно, и приходится принимать отклонение луча от нормали. В теории относительности события, одновременные в одной инерциальной системе, не являются таковыми в другой, и волновые поверхности сами займут в разных системах разные положения в соответствии с формулами преобразования Лоренца, так что совпадение направлений нормали и луча сохраняется. Таким образом, формула абберации есть по существу кинематическая формула преобразования направления волнового фронта при переходе из одной системы координат в другую. То, что она обычно применяется к системам, связанным с Землей и Солнцем, есть следствие практики астрономических наблюдений.

Как писал Борн, «этот вывод основных законов оптики движущихся тел ярко иллюстрирует превосходство теории Эйнштейна над всеми другими теориями»¹.

¹ М. Борн. Эйнштейновская теория относительности. М., 1964, стр. 365.

В 20-х годах теория аберрации стала одним из пунктов программы «опровержения» теории относительности [12]. Основные доводы противников этой теории сводились к следующему. Теория относительности не знает абсолютного движения, значит, аберрация может зависеть только от относительного движения наблюдателя и звезды. Но данные наблюдений показывали, что движение источника не оказывает влияния на аберрацию. Особенно наглядно это видно было при наблюдении двойных звезд (рис. 6). В первом положении скорости обеих составляющих двойной звезды перпендикулярны направлению к наблюдателю, поэтому абберрационное смещение максимально и составляющие должны быть видны с Земли четко пространственно разделенными (абберрационные смещения должны были бы иметь противоположные знаки). Но это кажущееся разделение составляющих не могло считаться действительным, потому что в этом положении равны нулю и доплеровское смещение спектральных линий равно нулю, а значит, угловое расстояние между составляющими тоже должно равняться нулю. Наблюдения показывали, что при отсутствии раздвоения спектральных линий не обнаруживается пространственное разделение составляющих звезды. А это и значит, что при рассмотрении аберрации движение светила ни при чем. Следовательно, теория относительности «опровергнута».

Хотя это «опровержение» казалось убедительным, оно так же несостоятельно, как и другие возражения, выдвигавшиеся против теории относительности, и основано на неверной трактовке основ этой теории. Ошибка противников теории относительности (Ленард, Остен, Папелло, Томашек) заключалась в том [13], что теории относительности приписывалось не содержащееся в ней положение о зависимости аберрации от скорости светила. На самом деле в теории относительности само понятие скорости относительно и только изменения скорости непосредственно измеримы. Поэтому и аберрация относительна, и только ее изменение измеримо абсолютно. Движение источника не входит в теорию аберрации. Если источник и наблюдатель движутся прямолинейно и равномерно, то абберрационный эффект (по терминологии Тирринга — «трансляционный» эффект) в этом случае является постоянным поправочным членом, выпадающим из наблю-

дений. Он не вызывает изменения направления светового луча и в этом смысле по Эмдену вообще не является aberrацией. Если бы Земля не двигалась вокруг Солнца, а была бы инерциальной системой, то для земного наблюдателя ни о какой aberrации не приходилось бы говорить.

Аберрация как изменение направления светового луча возникает при переходе от одной системы к любой другой. Годичная aberrация — это изменение направления светового луча при переходе от системы отсчета, относящейся к центру Земли, к системе отсчета, связанной с центром Солнца. Звездная aberrация вызвана в конечном счете изменением направления скорости системы, связанной с наблюдательным прибором. Изменение направления скорости телескопа связано с переходом его из одной мгновенной инерциальной системы в другую и никак не зависит от расстояния до светила. От этого расстояния зависит так называемая планетарная aberrация, т. е. смещение положения светила за aberrационное время, необходимое для прохождения светом расстояния от светила до Земли. Но этот вид aberrации представляет интерес только для исправления астрономических наблюдений.

Таким образом, в инерциальной системе отсчета aberrация сама по себе не существует. Она проявляется только относительно других подобных систем. Это и заставило Эмдена утверждать, что в специальной теории относительности aberrации вообще нет. Сама по себе aberrация существует только в общей теории относительности; она представляет собой изменение направления светового луча, ведущее к изменению направления видимого положения звезды. С классической точки зрения aberrация должна была бы обнаруживаться и для земных тел.

Тот факт, что относительное движение источника и наблюдателя не играет роли, наглядно следует из примера, приведенного Тиррингом. Если звезда пробегает путь, конгруэнтный орбите Земли и лежащий в той же плоскости, то между нею и Землей полностью отсутствует относительное движение; однако, несмотря на это, для земного наблюдателя существует годичная aberrация.

Копф [14] считал, что сравнение результатов, вычисленных по классической и релятивистской формулам для

абберации, с опытными данными может решить вопрос о правильности той или другой теории. Релятивистская формула с точностью до членов первого порядка v/c совпадает с классической; но он видел существенное различие между входящими в эти формулы величинами. Его доводы сводились к следующему. В классической теории α определяет кажущееся направление луча, а α' — истинное; в теории относительности α' дает направление на звезду в системе отсчета, связанной со звездой, а α — в системе, связанной с Землей, причем в обоих случаях по отношению к направлению движения Земли.

Если в классической теории учитывать поступательное движение солнечной системы в целом до членов второго порядка, то

$$\sin(\alpha' - \alpha) = \frac{v_l}{c} \sin \alpha_l \left(1 - \frac{v_s}{c} \cos \alpha_s \right), \quad (5)$$

где v_l и α_l относятся к движению Земли относительно Солнца, а v_s и α_s — к движению солнечной системы относительно эфира. Таким образом, в формуле абберации появляется множитель Виларсо [15] $1 - v_s \cos \alpha_s / c$, вызывающий изменение абберационной постоянной при переходе от одного участка неба к другому.

Из релятивистской формулы (4) путем несложных выкладок, ограничиваясь членами второго порядка, получим

$$\sin(\alpha' - \alpha) = \beta_l \sin \alpha_l \left(1 - \frac{\beta}{2} \cos \alpha \right). \quad (6)$$

Если ограничиваться приближением предельных значений годичной абберации, для которых $\cos \alpha_l$ близок к нулю, то в эту формулу вместо $v \cos \alpha$ можно написать $v_s \cos \alpha_s$; тогда получим, применяя те же рассуждения, что и в классическом случае,

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

По мнению Копфа, различие между обеими формулами может дать для двух соседних небесных тел, движения которых относительно Солнца заметно отличаются, величину порядка $0,07''$, лежащую в пределах возможности измерения.

Но, как заметил Эпштейн [16], различие между этими двумя формулами только кажущееся. Дело в том, что их можно сравнивать лишь тогда, когда источник света неподвижен относительно эфира, к которому мы относим движение наблюдателей. Если это условие не выполняется, то в классическую формулу для ν вводится скорость наблюдателя относительно эфира, ибо распространение света не зависит от движения источника. Но так как формулы теории относительности обладают групповыми свойствами, в релятивистскую формулу можно ввести для ν либо полную относительную скорость между наблюдателем и источником, либо любую ее часть, например ν_l . Но при этом угол α меняет свое значение. Для получения абберации в обычном определении нужно брать именно ν_l . При выводе формулы, практически применяемой для вычисления абберации, можно рассуждать следующим образом. Движения звезды и Солнца можно принять прямолинейными и равномерными. Значит, смещение положения звезды относительно Солнца равномерно и прямолинейно, а для земного наблюдателя положение звезды колеблется вокруг этой прямой вследствие годичной абберации. Для ее вычисления нужно в формулах перейти от Солнца к Земле и под ν понимать скорость Земли относительно Солнца ν_l , а под α — место звезды, отсчитанное от Солнца. Это ясно в теории относительности. Но и соображения Френеля, касающиеся наклонения телескопа и ведущие к формуле абберации, также применимы в этом случае, так как предполагается только добавление новой скорости и безразлично, находится ли первоначально система в покое или движении. Но с точки зрения наблюдателя, связанного с Солнцем, скорость света, идущего от звезды, не равна скорости света в эфире, так как Солнце движется относительно эфира со скоростью ν_s , что дает компоненту $\nu_s \cos \alpha_s$ в направлении светового луча. Значит,

$$c' = c + \nu_s \cos \alpha_s.$$

Подставляя это выражение в классическую формулу абберации, имеем

$$\sin(\alpha' - \alpha) = \frac{\nu_l}{c + \nu_s \cos \alpha_s} \sin \alpha_l,$$

откуда с точностью до членов второго порядка

$$\sin(\alpha' - \alpha) = \frac{v_l}{c} \sin \alpha_l \left(1 - \frac{v_s}{c} \cos \alpha_s \right). \quad (7)$$

Таким образом, эта формула классической теории была выведена с учетом изменения скорости света для солнечного «наблюдателя». В теории относительности скорость света в пустоте инвариантна и $c' = c$, так что вывод не зависит от скорости Солнца, и тогда

$$\sin(\alpha' - \alpha) = \frac{v_l}{c} \sin \alpha_l \left(1 - \frac{v_l}{2c} \cos \alpha_l \right). \quad (8)$$

Между формулами (7) и (8) существует различие в членах второго порядка, но оно неизмеримо.

Релятивистская теория явилась естественным завершением двухсотлетней истории развития представлений об aberrации света¹.

Увлечение света движущимися телами

Френелевский коэффициент увлечения света. Мы видели, что теория aberrации при переходе от корпускулярной к волновой теории света постепенно переросла в общую теорию оптических явлений в движущихся телах. Еще Френель в цитированном выше письме, в котором было введено понятие о коэффициенте увлечения, показал, что принятие значения $k = 1 - \frac{1}{n^2}$ позволяет объяснить

отсутствие влияния движения Земли на некоторые оптические явления, даже если признать неподвижность эфира, т. е. явно отказаться от распространения принципа относительности на электродинамику. В дальнейшем вопрос о коэффициенте увлечения становится центральным пунктом теории. Признав недостаточно обоснованными исходные предпосылки Френеля (различная плотность эфира в разных телах при одинаковой его уп-

¹ В соответствии с общим замыслом книги здесь не рассматривается трактовка aberrации в общей теории относительности. Интересующихся этим вопросом отсылаем к списку литературы, помещенному в конце книги.

ругости), последующие исследователи пытались дать динамическую интерпретацию эффекта увлечения, исходя из других моделей.

Стокс заметил, что френелевский коэффициент можно получить, если допустить, что внутри тела движется весь эфир, причем входящий в Землю или другое тело спереди эфир сразу сжимается, а выходящий позади тела расширяется. Тогда из требования неразрывности эфира на границе раздела следует, что количество эфира, протекающего в тело на единицу поверхности $n_1^2 vt$, должно равняться количеству эфира $n^2 v_1 t$, уходящего внутрь тела. Здесь v — скорость тела по отношению к внешнему эфиру; v_1 — скорость эфира внутри тела по отношению к телу; n_1^2 — плотность эфира вне тела, n^2 — внутри тела. Тогда

$$n_1^2 vt = n^2 v_1 t \quad \text{и} \quad v_1 = v \left(\frac{n_1}{n} \right)^2.$$

Так как плотность эфира в вакууме $n_1^2 = 1$,

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

$v - v_1$ — скорость внутреннего эфира по отношению к внешнему, а выражение в скобках — френелевский коэффициент. Иные динамические трактовки предлагались Беером [17], Кеттелером [18] и др.

Определенный интерес представляют с этой точки зрения работы Вельтмана [19]. Он исходит из двух допущений: 1) эфир принимает участие в движении тел, но со скоростью $v - u$; 2) движение тела не влияет на колебания эфира, вызванные распространением в нем света. Тогда движение света в пространстве можно рассматривать как сложное, состоящее из движения света в эфире, движения эфира относительно тела и движения тела в пространстве. В зависимости от того, какие компоненты учитываются, получаются тройкого рода движения: распространение света в неподвижном эфире (первая компонента), распространение света в неподвижной среде (первая и вторая компоненты) и распространение света в пространстве. Соответственно этому надо различать абсолютное движение света в эфире, относительное движение света в среде, истинное движение в пространстве.

С помощью принципа Гюйгенса можно пойти направление распространения света в каждом из трех случаев, т. е. для абсолютного, относительного и истинного лучей. Таким образом, изменения, вносимые движением тел в ход оптических явлений, сводятся к переходу из одной системы отсчета в другую, т. е. являются чисто кинематическими эффектами. Общий вывод Вельтман формулирует следующим образом: «Гипотеза Френеля (т. е. частичное увлечение. — Φ , Φ .) — это не что иное, как необходимое и достаточное условие применимости законов, следующих из волновой теории для неподвижных сред, к относительным лучам в подвижных телах».

Наряду с теоретическими работами был выполнен и ряд новых экспериментов, в которых продолжались все-таки попытки обнаружения влияния движения Земли. В 1868 г. подобный опыт провел Хек [20]. Схема опыта

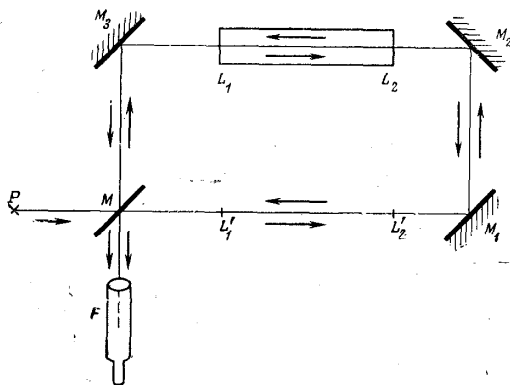


Рис. 8

такова. От источника P (рис. 7) свет направляется на полупрозрачное зеркало M . Здесь падающий пучок расщепляется на два: идущий по пути MM_2M_3 и идущий по обратному пути. L_1L_2 — трубка, заполненная водой, или стержень из прозрачного вещества. Вся установка ориентирована в направлении движения Земли. Между двумя лучами возникает разность фаз, которая меняет знак при изменении ориентировки установки на обратный. Смещение интерференционных полос наблюдалось трубой F . Для вычисления разности времен прохождения имеют значение только отрезки $l=L_1L_2$ и $l=L_1'L_2'$. Первому лу-

что требуется время

$$t_1 = \frac{l}{c_1 + u - v} +$$

а второму

$$t_2 = \frac{l}{c_1 - u + v} + \frac{l}{c - v}.$$

Здесь c_1 — скорость света в неподвижном теле, u — скорость эфира. В предположении частичного увлечения $u = kv$ (k — коэффициент увлечения). Таким образом, $c_1 \pm \pm u \mp v$ — скорость света внутри тела по отношению к Земле:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = l \left\{ \frac{1}{c_1 + u - v} + \frac{1}{c + v} - \frac{1}{c_1 - u + v} - \frac{1}{c - v} \right\} = \frac{2l}{v} \cdot \frac{\frac{u^2}{c^2} - \beta \frac{u}{c} - \frac{u}{v} + 1 - \frac{1}{n^2}}{(1 - \beta^2) \left[\left(\frac{c_1}{v} \right)^2 - \left(1 - \frac{u}{v} \right)^2 \right]}.$$

С учетом членов второго порядка имеем приближенно

$$\Delta t \approx \frac{2l}{v} \left(-\frac{u}{v} + 1 - \frac{1}{n^2} \right) n^2 \beta^2,$$

где $\beta = \frac{v}{c}$, $n = \frac{c}{c_1}$.

Разность фаз

$$\begin{aligned} \Delta \varphi = v \Delta t &= \frac{2l}{v} n^2 \beta^2 \frac{c}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{n^2} - \frac{u}{v} \right) = \\ &= \frac{2ln^2}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{n^2} - \frac{u}{v} \right) \beta. \end{aligned} \quad (1)$$

При повороте установки на 180°

$$\Delta \varphi' = -\frac{2ln^2}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{n^2} - \frac{u}{v} \right) \beta.$$

Значит, общее смещение $\Delta \varphi - \Delta \varphi' = 2\Delta \varphi$. Опыты Гека дали отрицательный результат, т. е. $\Delta \varphi = 0$. Как видно из (1), это можно было объяснить, если положить

$$u = kv = \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) v.$$

Таким образом, наличие френелевского коэффициента увлечения приводит к компенсации эффекта, который мог бы быть вызван движением Земли в опытах первого порядка.

Маскар в 1869—1874 гг. [21] исследовал дифракционный спектр, отражение, преломление, двойное преломление, вращение плоскости поляризации, после чего пришел к такому выводу: «Явления отражения света, дифракции, двойного преломления и вращения плоскости поляризации в равной мере не в состоянии выявить поступательное движение Земли, когда пользуемся светом Солнца или земного источника». Но и здесь общий вывод не был сделан решительно. Тем не менее проведение опытов по разным причинам продолжалось. Рэлей [22] (1902) и Брес [23] (1905) вновь исследовали влияние движения Земли на вращение плоскости поляризации оптически активными телами, а Брес [24] (1905) и Штрассер [25] (1907) — на изменение азимута плоскости поляризации при преломлении света. И опять результаты были отрицательными. На этом фоне не вызывали особого доверия отдельные сообщения (Ангстрем, Физо, Клинкерфус и др.) о якобы найденном положительном эффекте: в конце концов обнаруживался источник погрешностей или ошибка в интерпретации.

Опыт Физо и его повторения. Если в упомянутых опытах френелевский коэффициент увлечения вводился лишь как возможное объяснение отрицательных результатов, то в опыте, проведенном в 1851 г. Физо [26] и повторенном в 1886 г. Майкельсоном и Морли [27], а в 1914 г. — П. Зеemannом [28] с сотрудниками, коэффициент увлечения непосредственно измерялся. В отличие от упомянутых в опыте Физо изучалось увлечение света телом, движущимся относительно наблюдателя. Схема его установки (рис. 8) напоминает схему Хека; разница заключается в том, что трубки с водой расположены на обеих сторонах MM_1 и M_2M_3 , и вода может циркулировать в направлении, указанном стрелками в трубках. Стрелки вне трубок указывают направление световых лучей. У самого Физо оптическая схема была несколько иной, но это не имеет в данном случае принципиального значения для расчета смещения интерференционных полос, происходящего при переходе от неподвижной воды к движущейся. Ожидаемое смещение легко вычисляется. Скорость света

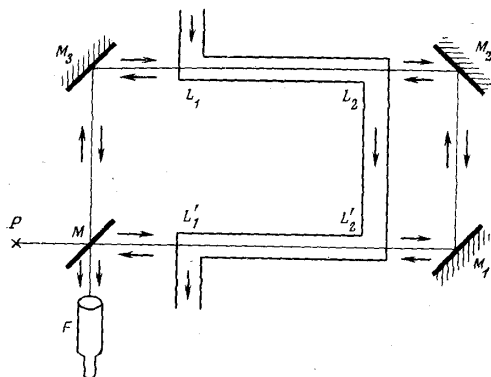


Рис. 7

в трубах по отношению к неподвижным частям установки будет $c/n + kv$ и $c/n - kv$ (k — коэффициент увлечения, v — скорость воды). Тогда разность времен прохождения будет

$$\Delta t = \frac{2l}{\frac{c}{n} - kv} - \frac{2l}{\frac{c}{n} + kv}.$$

С точностью до членов второго порядка

$$\Delta t = \frac{4lkn^2}{c^2} v.$$

Отсюда разность фаз

$$\Delta \varphi = v \Delta t = \frac{4lkn^2}{c\lambda} v. \quad (2)$$

По гипотезе Френеля $k=1-1/n^2$, а в предположении полностью увлекаемого эфира $k=1$. Физо получил $k=0,46$, что хорошо согласовывалось в пределах ошибок измерения с формулой Френеля. Повторение опыта с движущимся воздухом не дало никакого смещения, что и следовало ожидать из-за малого отличия показателя преломления воздуха от единицы. Свой отчет об опыте Физо заканчивает так: «Мне кажется, что успех этого опыта должен привести к принятию гипотезы Френеля или по крайней мере закона, который был найден для выражения изменения скорости света при движении тел». Таким

образом, опыт Физо не только подтвердил френелевское значение коэффициента увлечения, но и опроверг возможность принятия гипотезы полного увлечения эфира. В построенной на этом допущении электродинамике движущихся тел Герца опыт Физо, как и аберрацию света, так и не удалось объяснить.

Этот результат позволил Эйнштейну в 1917 г. в книге «О специальной и общей теории относительности» называть Физо «гениальным физиком». Вот что он писал: «Ответ на этот вопрос дает исключительно важный эксперимент, поставленный более половины столетия назад гениальным физиком Физо и повторенный с того времени некоторыми лучшими физиками-экспериментаторами, так что его результат является бесспорным. Этот эксперимент решает следующий вопрос. В покоящейся жидкости свет распространяется с определенной скоростью w . С какой скоростью распространяется он в трубе... если упомянутая жидкость течет по этой трубе со скоростью v ?»¹.

Подтвержденное Физо значение френелевского коэффициента увлечения легло в основу теории оптических явлений в движущихся телах Лоренца. Уже в 1886 г. в своей первой статье по этим вопросам Лоренц [29] доказывает одно положение, которое он затем использовал во всех дальнейших работах: любая теория оптических явлений в движущихся телах может одновременно объяснить аберрацию света и отсутствие влияния движения Земли на эти явления, если она содержит френелевский коэффициент увлечения.

Необходимо отметить, что сам Физо, видя в своих опытах подтверждение формулы Френеля, не считал их подтверждением довольно искусственных предпосылок, лежащих в основе вывода Френелем этой формулы. Хотя Френель пытался дать явлению частичного увлечения динамическую трактовку и полагал, что увлекается «избыток плотности эфира» в телах по сравнению с плотностью эфира в пустоте, но подобное толкование не без основания оспаривалось. Трудности возникали и при рассмотрении дисперсии и двойного преломления, ибо нельзя было понять, как для лучей разной преломляемости

¹ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. I. М., 1965, стр. 550.

одновременно увлекаются разные доли эфира. У Лоренца этот вопрос сразу приобретает ясность: увлекаются заряды, а эфир остается неподвижным.

В теории относительности результаты опыта Физо объясняются просто как следствие релятивистской формулы сложения скоростей

$$u = \frac{\frac{c}{n} \pm v}{1 \pm \frac{v}{nc}}.$$

Ограничиваясь членами первого порядка, сразу получаем

$$u = \frac{c}{n} \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v. \quad (3)$$

Хотя формула имеет прежний вид, но здесь «частичное увлечение» является следствием чисто метрических свойств и не связано с каким-либо предположением о строении вещества или свойствах эфира. Эйнштейн неоднократно указывал на важность опыта Физо для экспериментального обоснования теории относительности. В уже упомянутой книге он писал: «Правда, следует отметить, что задолго до появления теории относительности Г. А. Лоренц дал теорию этого явления и обосновал ее чисто электродинамическим путем при помощи определенных гипотез об электромагнитной структуре материи. Однако это обстоятельство несколько не уменьшает доказательную силу эксперимента Физо, как *experiments crucis*¹ в пользу теории относительности, поскольку электродинамика Максвелла — Лоренца, на которой базировалась первоначальная теория, несколько не противоречит теории относительности»².

В 1920 г. в работе «Эфир и теория относительности» Эйнштейн вновь писал: «Эта теория, называемая также теорией неподвижного эфира, в дальнейшем нашла сильную поддержку в опыте Физо, из которого можно было заключить, что эфир не принимает участия в движении тел. Опыт Физо является фундаментальным и для спе-

¹ Решающий эксперимент (лат.).

² А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. I, стр. 551.

диальной теории относительности»¹. В 1952 г. в беседе с американским физиком Р. Шенклендом Эйнштейн говорил: «Опыт Физо и его результат был настолько важен, что улучшенное повторение его в любом случае было чрезвычайно желательно»².

Первое повторение было предпринято Майкельсоном и Морли в 1886 г. Они ввели некоторые технические усовершенствования и подтвердили результаты Физо. В 1914 г. серию измерений провели Зееман с сотрудниками. Они применяли монохроматический свет, фотографировали смещения полос, приняли меры к предотвращению передачи вибрации труб интерферометру, уточнили методы определения скорости воды вдоль оси труб. Для поддержания постоянства скорости воды на все время измерений установка была включена в систему амстердамского водопровода, и давление тщательно регулировалось. Расхождения с результатами вычислений по формуле Френеля не превышали 2,6%. Зееман не ограничился опытами с водой. Специальная установка позволила измерить увлечение света движущимися твердыми телами (цилиндрами из флинта и кварца). Эти опыты позволили подтвердить не только формулу Френеля, но и выведенную Лоренцем формулу для коэффициента увлечения, учитывающую зависимость показателя преломления от длины волны (дисперсию).

Эту формулу можно получить классически из следующих соображений³. Уравнение волны по отношению к неподвижной системе отсчета

$$y = a \cos(2\pi\nu t - kx) = a \cos\left[2\pi\nu\left(t - \frac{x}{c_1}\right)\right],$$

где ν и c_1 — частота и скорость света в неподвижной системе. Для движущейся системы, пользуясь преобразованиями Галилея ($x' = x - vt$), имеем

$$\begin{aligned} y &= a \cos\left[2\pi\nu\left(t - \frac{x'}{c_1} - \frac{v}{c_1}t\right)\right] = \\ &= a \cos\left\{2\pi\nu\left[\left(1 - \frac{v}{c_1}\right)t - \frac{x'}{c_1}\right]\right\}, \end{aligned}$$

¹ Там же, стр. 683.

² Р. Шенкленд. Беседы с Альбертом Эйнштейном. В кн. «Эйнштейновский сборник 1967 г.» М., 1967, стр. 75.

³ См.: Г. А. Лоренц. Теория электронов. М., 1956, стр. 277, 435—436.

т. е. частота

$$\nu' = \nu \left(1 - \frac{v}{c_1} \right) = \nu \left(1 - \frac{nv}{c} \right);$$

$n = \frac{c}{c_1}$ — это показатель преломления для частоты ν . Поскольку $\Delta\nu = \nu' - \nu$ невелико, можно выразить показатель преломления для частоты ν' с точностью до членов второго порядка:

$$n' = n(\nu') = n(\nu) + \Delta\nu \frac{dn}{d\nu} = n - \nu \frac{nv}{c} \cdot \frac{dn}{d\nu},$$

а соответствующую ему скорость — с точностью до $(v/c)^2$:

$$c_1' = \frac{c}{n'} = \frac{c}{n - \nu \frac{nv}{c} \cdot \frac{dn}{d\nu}} = \frac{c}{n} + \frac{v}{n} \nu \frac{dn}{d\nu} = \frac{c}{n} - \frac{v}{n} \lambda \frac{dn}{d\lambda}.$$

Значит, для скорости света по отношению к неподвижным частям установки получим

$$c_1' = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) v - \frac{v}{n} \lambda \frac{dn}{d\lambda} = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right) v. \quad (4)$$

Поскольку вода обладает слабой дисперсией, Зееман для проверки формулы Лоренца провел измерения и с движущимися стержнями. С помощью кривошипно-шатунного механизма им сообщалась скорость порядка 10 м/сек. Фотографировалась интерференционная картина при движении слева направо, затем — при обратном движении, так что эффект удваивался. Высококачественные фильтры позволяли выделить три интервала длин волн: 4750 Å, 5380 Å, 8510 Å. Большая точность измерений позволила Зееману подтвердить существование дисперсионного члена в уравнении (4).

Еще до Зеемана попытку экспериментальной проверки формулы Лоренца предпринял в 1911—1912 гг. молодой немецкий физик Ф. Харрес [30]. Его диссертация не была опубликована, а сам он погиб на фронте в начале первой мировой войны. Данные Харреса были обработаны и опубликованы в 1914 г. П. Харцером [31]; установка была подробно описана Кнопфом в 1920 г. [32].

По данным Харреса (описание опытов приведено в главе II) для красного света коэффициент увлечения $k = 0,5964 \pm 0,0015$, для зеленого $k = 0,5802 \pm 0,0020$. Эти данные лучше согласуются с вычислениями по формуле Френеля, чем по формуле Лоренца. В этом факте Харцер увидел довод против теории относительности, ибо считал формулу Лоренца, якобы не подтвержденную этими опытами, релятивистской.

Анализ опытов типа Физо Эйнштейном. На работу Харцера откликнулся Эйнштейн [33]. Замечания Эйнштейна позволяют переосмыслить не только те опыты, которые непосредственно вызвали дискуссию, но и все подобные эксперименты, выполненные для измерения коэффициента увлечения начиная с классического опыта Физо в 1851 г.

Обозначим V скорость света в среде с точки зрения движущегося относительно нее наблюдателя, V' — скорость света в среде в системе, движущейся вместе с телом, v — скорость среды. Главное, что упускалось до этого, состоит в том, что скорость света относительно среды V' зависит от частоты ν' света в системе координат, движущейся вместе со средой. Если бы скорость света не зависела от частоты, то смысл V' вполне определен — это скорость света любых частот относительно среды, и тогда действительно

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

а $1 - 1/n^2$ можно считать коэффициентом увлечения.

Но если скорость V' зависит от ν' , то вышеприведенная формула не может определенно выявить этот коэффициент, ибо в силу эффекта Доплера частота ν' будет отличаться от частоты ν , воспринимаемой наблюдателем. Эта зависимость определяется, как известно, углом между направлением распространения света и направлением движения тела и отношением скорости тела к скорости света. А это означает, что конечные формулы для коэффициента увлечения будут различны в зависимости от конкретных условий, встречающихся в той или иной экспериментальной установке. Фактически выполненные опыты относятся к трем случаям.

1) Указанный угол равен $\pi/2$, тогда, пренебрегая квадратичным эффектом, $\nu' = \nu$ и

$$V = V' + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v, \quad (5)$$

т. е. в этом случае, и только в этом случае, справедлива классическая формула Френеля.

2) Направление движения совпадает с направлением распространения света в движущемся теле, т. е. указанный угол равен нулю. В этом случае, применяя принцип Допплера к свету, входящему в тело, имеем

$$v' = v \left(1 - \frac{v}{c}\right).$$

Отсюда

$$V'(v') = V'(v) + \frac{dV'}{dv} dv = V'(v) - \frac{dV'}{dv} \cdot \frac{vv}{c} = V'(v) - \frac{vv}{c} \cdot \frac{dV'}{dn} \cdot \frac{dn}{dv}.$$

Поскольку

$$\frac{dV'}{dn} = -\frac{c}{n^2} \quad \text{и} \quad \frac{dn}{dv} = -\frac{c}{v^2} \cdot \frac{dn}{d\lambda} = -\frac{\lambda^2}{c} \cdot \frac{dn}{d\lambda},$$

получаем

$$V'(v') = V'(v) - \frac{v\lambda}{n^2} \cdot \frac{dn}{d\lambda}.$$

Значит,

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

В этом случае коэффициентом увлечения можно назвать выражение

$$k = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n^2} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (6)$$

3) Направления те же, что и в предыдущем случае, но свет проходит внутри неподвижной трубы, по которой движется вода. Поэтому v есть одновременно частота света относительно неподвижной трубы. Здесь свет также входит по направлению движения тела, но сначала попадает в неподвижную воду около торцевой пластинки, а затем уже из неподвижной воды в движущуюся. Поэто-

му правильное применение принципа Допплера дает

$$v' = v \left(1 - \frac{v}{V'} \right).$$

Аналогично предыдущему случаю,

$$V'(v') = V'(v) - \frac{vv'}{V'} \cdot \frac{dv'}{dv}$$

и

$$V'(v') = V'(v) - \frac{v\lambda}{n} \cdot \frac{dn}{d\lambda}.$$

Тогда

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

Отсюда

$$k = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (7)$$

Это — формула Лоренца.

Эйнштейновская классификация позволяет точно определить, к какому случаю относится тот или другой проведенный опыт. Опыт Харресса, в котором свет входил в призму перпендикулярно направлению его движения, относится к первому случаю. Поэтому его результаты должны были подтвердить формулу Френеля; дисперсионный член здесь не входит в расчетную формулу. И опыт действительно подтвердил формулу (5) в полном соответствии, а не вопреки теории относительности.

Опыты Зеемана с твердыми телами относятся ко второму случаю, и они действительно подтвердили формулу (6). Это обстоятельство понимал Зееман, который в своей статье приводит эту формулу, указывая, что ее вывод на основе релятивистских преобразований был ему сообщен Лоренцем.

Наконец, опыты Физо, Майкельсона — Морли (1886) и Зеемана с движущейся водой относятся к третьему случаю, а следовательно, они должны были подтвердить формулу (7). Поскольку Физо и Майкельсон и Морли не ставили себе вопроса о влиянии дисперсии, они считали.

что их результаты подтверждают формулу Френеля. По всей вероятности, их установки и не обладали точностью, достаточной для выявления дисперсионного члена. Этому требованию отвечала установка Зеемана, который и подтвердил справедливость формулы Лоренца.

Поскольку эти расчеты проводились с точностью до членов первого порядка относительно v/c , все формулы совпадают с полученными из классической теории Лоренца, хотя в их содержание и вкладывается новый смысл. Однако только в рамках теории относительности стала возможной четкая постановка вопроса, которая позволила дать глубокий анализ и выявить все особенности рассматриваемой проблемы увлечения света движущимися телами.

Эффект Допплера

Открытие эффекта и его объяснение. В 1842 г. в «Трудах чешского научного общества» появилась статья профессора из Праги Христиана Допплера «Об окрашенном свете двойных звезд и некоторых других небесных светил» [34]. В ней впервые был поставлен вопрос о влиянии движения источника волн или наблюдателя на воспринимаемую прибором или глазом частоту. Предсказанный чисто теоретически эффект, названный в дальнейшем именем Допплера, относится к любым волнам независимо от их природы. Приведем вывод формулы, данный самим Допплером. Различаются два понятия: объективный цвет, определяемый интервалом времени между излучением двух последовательных импульсов (период испущенных волн), и субъективный, определяемый интервалом времени между восприятием этих двух импульсов наблюдателем (период воспринимаемых волн). При неподвижных источнике и наблюдателе оба периода совпадают; если между ними существует относительная скорость, то периоды неодинаковы. Рассматриваются два случая.

I. Наблюдатель из точки O движется к источнику Q со скоростью v (рис. 9, а). В начальный момент положение наблюдателя совпадает с началом волны в точке O . Вычисляется интервал времени T , за который конец волны, находившийся первоначально в A , достигнет

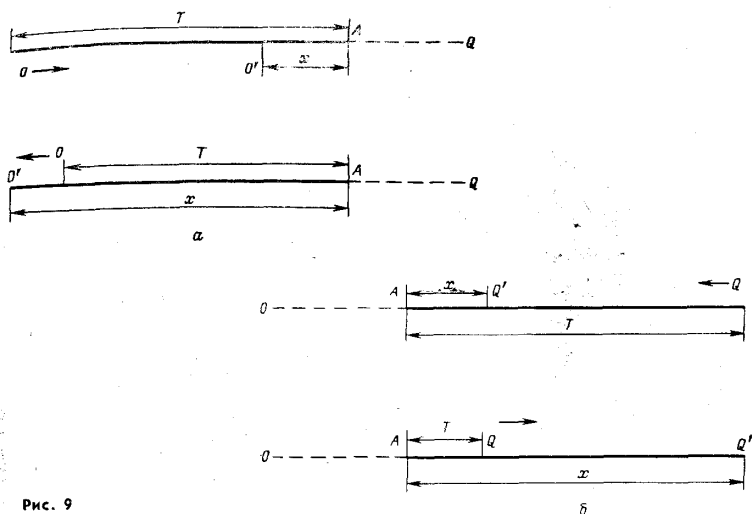


Рис. 9

наблюдателя T и будет воспринимаемым периодом волны. Очевидно,

$$vT + cT = \lambda_0 = cT_0;$$

поскольку $T = 1/v$ и $T_0 = 1/v_0$.

$$T = \frac{c}{c+v} T_0, \text{ или } v = \frac{c+v}{c} v_0 = \left(1 + \frac{v}{c}\right) v_0. \quad (1)$$

Для удаляющегося наблюдателя таким же образом получим

$$v = \left(1 - \frac{v}{c}\right) v_0. \quad (2)$$

II. Источник Q движется к наблюдателю O (рис. 9, б). Вычисляется время T между прохождением двух последовательных волн через точку A , расположенную на расстоянии одной длины волны от источника. Первая волна проходит путь QA за время T_0 ; за это время источник переместился в точку Q' , так что $QQ' = vT_0$; поэтому вторая волна должна пройти лишь путь $Q'A = cT_0 - vT_0$. Следовательно, время между прохождением двух после-

довательных волн через точку A будет $T = \frac{Q'A}{c} = \frac{c-v}{c} T_0$.

Отсюда

$$T = \left(1 - \frac{v}{c}\right) T_0 \text{ и } \nu = \frac{\nu_0}{1 - v/c}. \quad (1')$$

Для удаляющегося источника соответственно

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 + v/c}. \quad (2')$$

Таким образом, в обоих случаях сближение источника и наблюдателя приводит к увеличению частоты, удаление — к уменьшению.

Если направление скорости v составляет с направлением распространения волны угол φ , то в формулы должна входить только проекция $v_{\text{рад}} = v \cos \varphi$ и

$$\nu = \left(1 \pm \frac{v}{c} \cos \varphi\right) \nu_0 \text{ или } \nu = \frac{\nu_0}{1 \mp \frac{v}{c} \cos \varphi}.$$

В случае одновременного движения источника со скоростью u и наблюдателя со скоростью v

$$\nu = \nu_0 \frac{1 \pm u/c}{1 \pm v/c},$$

где знак перед u/c и v/c выбирается в зависимости от направления скорости. Если $u=v$ и движение происходит в одну сторону, т. е. имеет место совместное движение, $\nu=\nu_0$ и никакого эффекта нет. Если же $u \neq v$,

$$\nu = \nu_0 (1 \pm u/c) (1 \mp v/c) = \nu_0 \left(1 \pm \frac{u-v}{c} - \frac{uv}{c^2}\right),$$

т. е. согласно классической теории смещение частоты будет зависеть не только от относительной скорости $u-v$, но и от абсолютных скоростей u и v ; правда, эта зависимость порядка uv/c^2 , т. е. экспериментально она не наблюдается, хотя в принципе эффект мог бы дать метод определения абсолютных скоростей в эфире. Подчеркнем, что в ходе вывода Допплер, хотя он и не оговаривает этого, принимал, что скорость света не зависит от скорости источника, т. е. эфир неподвижен.

Формулу Допплера можно получить и другими путями, но принцип остается прежним: вычисляется число волн, приходящих к наблюдателю в единицу времени. Можно воспользоваться и инвариантностью фазы при переходе из одной системы координат в другую. Пусть система S' движется относительно S со скоростью v ; тогда инвариантность фазы дает

$$v\left(t - \frac{x}{c}\right) = v'\left(t' - \frac{x'}{c}\right).$$

Воспользуясь преобразованиями Галилея $x = x' + vt'$, $t = t'$, имеем

$$v\left(t - \frac{x' + vt'}{c}\right) = v'\left(t' - \frac{x'}{c}\right).$$

Если в начальный момент $t = 0$, $x = x' = 0$, имеем

$$v' = v(1 - v/c).$$

При перемещении наблюдателя $v = v_0$ (v_0 — испускаемая частота)

$$v' = v_0(1 - v/c).$$

При перемещении источника $v' = v_0$ и

$$v = \frac{v_0}{1 - v/c}.$$

Если скорость перемещения направлена под углом φ к прямой, соединяющей источник с наблюдателем, то в расчет надо принимать только радиальную компоненту, т. е. $v \cos \varphi$. Тогда

$$v = v_0 \left(1 \pm \frac{v \cos \varphi}{c}\right) \quad \text{или} \quad v = \frac{v_0}{1 \mp \frac{v \cos \varphi}{c}}. \quad (3)$$

Ясно видно, что если $\varphi = \frac{\pi}{2}$, то $v' = v$, т. е. в классической теории поперечный эффект Допплера равен нулю.

При рассмотрении эффекта в теории относительности можно исходить из классической формулы, но учесть изменение собственной частоты излучателя вследствие релятивистского сокращения времени. Собственная частота

движущегося источника

$$v_1 = v_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (4)$$

тогда для движущегося источника

$$v = \frac{v_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 \mp \frac{v}{c} \cos \varphi}, \quad (5)$$

а для движущегося наблюдателя

$$v \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = v_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} \cos \varphi \right) \text{ и } v = \frac{v_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} \cos \varphi \right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6)$$

Сравнивая формулы (5) и (6) при $\varphi=0$, видим, что

$$v = \frac{v_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \left(1 \pm \frac{v}{c} \right) = \frac{v_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} \right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

т. е. обе формулы совпадают точно, а не только до членов второго порядка относительно v/c . А это означает, что исчезает даже принципиальная возможность обнаружить с помощью эффекта Доплера абсолютное движение относительно эфира. При $\varphi = \frac{\pi}{2}$

$$v = v_0 \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (7)$$

т. е. релятивистский поперечный доплер-эффект отличен от нуля. Еще в 1907 г. Эйнштейн обратил внимание на принципиальное значение этого эффекта второго порядка для экспериментального обоснования специальной теории относительности¹. Как удалось выполнить этот замысел, будет изложено в главе II.

¹ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. I, стр. 49.

Получив правильные формулы для эффекта, Допплер пытался их применить к объяснению цвета двойных звезд (чем и определяется название работы). Правильная по существу идея о возможности определения скорости светил с помощью измерения открытого эффекта была им использована неправильно. Не имея точных представлений о спектральном составе света звезд и о порядке величины их скорости, Допплер допускал ряд ошибок: преувеличивал величину радиальных скоростей светил, недооценивал интенсивность ультрафиолетовой и инфракрасной части спектра, приписывал звездам произвольный собственный цвет. Эти ошибки вызвали ряд возражений и тормозили дальнейшее изучение самого явления в оптике. Одним из первых, кто оценил значение эффекта Допплера, был видный чешский математик Больцано [35]. Указав, что название работы Допплера не соответствует ее основному содержанию, Больцано обращает внимание на ее подзаголовок («Исследование одной абберационной проблемы Бредли, в котором содержится общая теория») и выдвигает на первый план общее значение нового принципа для всего учения о волнах. Статья заканчивается поистине пророческими словами: «Я с уверенностью ожидаю, что им (принципом Допплера. — Ф., Ф.) будут пользоваться для разрешения, по изменению цвета небесных тел, вопросов о том, движутся ли эти последние, куда и с какой скоростью, какие расстояния отделяют их от нас и друг от друга, равно как и для разрешения многих других вопросов».

Экспериментальное подтверждение формулы Допплера. Для акустических волн эффект Допплера был обнаружен экспериментально в 1845 г. голландским физиком Бейс-Баллотом [36] в опытах на нидерландской железной дороге. Группа музыкантов размещалась на движущейся с известной скоростью платформе; производимые их инструментами звуки воспринимались группой музыкантов, размещавшихся на перроне. После этого группы обменивались ролями: движущиеся музыканты прислушивались к звукам, доносившимся с перрона. В обоих случаях тщательно измерялась высота издаваемых и воспринимаемых звуков. Полученные данные хорошо укладывались в формулу Допплера. Повторенные в последующие годы опыты со звуком не оставили никакого сомнения в действительном существовании эффекта для акустических волн.

Сложнее обстояло дело со светом. Поскольку эффект зависит от отношения v/c , в то время в земных условиях не было никаких возможностей экспериментальной проверки применимости принципа к световым волнам. Именно поэтому Допплер пытался найти оправдание своих идей в астрономических наблюдениях. Но осуществление этого намерения оказалось неудачным, что в известной мере задержало признание принципа Допплера в оптике.

Правильнее подошел к выводу Физо. Выступая в 1848 г. в Филоматическом обществе в Париже с докладом «О явлениях, происходящих со звуком, когда звучащее тело или наблюдатель находятся в движении, и о соответствующих явлениях, происходящих со светом» [37], Физо обратил внимание, что в сплошном спектре движение не может вызывать заметных изменений и что движение должно сказываться лишь в некотором смещении спектральных линий. Таким образом, Физо ввел в обиход понятие, позже названное доплеровским смещением.

Новая фаза в применении принципа Допплера в астрофизике началась после открытия спектрального анализа и установления тождественности химических элементов на Земле и небесных телах. Сразу же возник вопрос о возможности определения радиальных скоростей звезд по доплеровскому смещению спектральных линий. Первые измерения (1862—1863) были неудачными, но уже в 1867 г. Хеггинсу [38] удалось обнаружить смещение водородной линии в спектре Сириуса по сравнению с положением той же линии в спектре гейслеровской трубки.

Отсюда он пришел к выводу, что скорость звезды относительно Земли равна 41,4 миль/сек, а по отношению к Солнцу — 29,4 миль/сек. Ему удалось наблюдать и смещения линии азота спектра туманности в созвездии Ориона. С 1875 г. измерения радиальных скоростей звезд вошли в постоянную программу Гринвичской обсерватории, а позже — и других обсерваторий, в том числе Пулковской. По мере усовершенствования техники измерений удалось определить скорости многих звезд и туманностей. Но эти результаты не могли доказать справедливости принципа Допплера для световых волн, поскольку скорости измерялись по формуле Допплера, а независимого способа определения скоростей звезд и туманностей

не было. Необходимо было найти доплеровское смещение для источника, скорость движения которого можно было определить другим способом. Такими источниками могли стать точки, расположенные на концах солнечного экватора, так как скорость вращения Солнца можно было определить по движению солнечных пятен. Первые более или менее удовлетворительные результаты были получены в 1871 г. в Потсдамской обсерватории Фогелем [39]. Он нашел, что определяемая спектральным путем линейная скорость краев диска Солнца (2 км/сек) совпадает со скоростью, определенной по движению пятен. Окончательно вопрос был разрешен измерениями Юнга [40] (1876) и Толлона [41].

Был использован и второй метод проверки принципа Доплера в рамках солнечной системы. Он состоял в спектральном определении скоростей вращения планет. Так как элементы орбиты планет были хорошо известны, представлялось возможным внести все необходимые поправки. Поскольку планеты являются не источниками, а отражателями, возник вопрос об эффекте Доплера при отражении от движущегося зеркала. В простейшем слу-

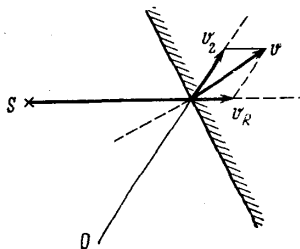


Рис. 10

чае (рис. 10), ограничиваясь членами первого порядка, можно написать, рассматривая отражатель как своеобразный ретранслятор,

$$v = v_0 \left(1 - \frac{v_R}{c} \right), \quad v' = v \left(1 - \frac{v_r}{c} \right),$$

$$v' = v_0 \left(1 - \frac{v_R}{c} \right) \left(1 - \frac{v_r}{c} \right) \approx v_0 \left(1 - \frac{v_R + v_r}{c} \right).$$

Здесь v_R — скорость планеты относительно Солнца, v_r — скорость планеты относительно Земли. Впервые формула

изменения частоты при отражении от движущегося зеркала была получена Кеттелером в 1871 г. (рис. 11).

При движении зеркала в направлении, составляющем угол α с нормалью к плоскости зеркала, скорость изображения по отношению к неподвижному предмету будет

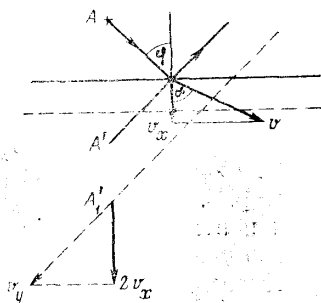


Рис. 11

$2v_x = 2vc \cos \alpha$, а в направлении наблюдателя $v_y = 2vc \cos \alpha \cos \varphi$ (φ — угол падения). Отсюда эффект Доплера

$$v = v' \left(1 \pm \frac{v}{c} \cos \alpha \cos \varphi \right). \quad (8)$$

Релятивистскую формулу для изменения частоты при отражении от движущегося зеркала Эйнштейн получил уже в своей первой работе 1905 г. Если в системе неподвижного наблюдателя частота будет v , угол падения φ , а в системе, связанной с зеркалом, соответственно v' и φ' , то, полагая, что $\alpha = 0$,

$$\cos \varphi' = \frac{\cos \varphi - \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}, \quad v' = v \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

В системе зеркала закон отражения записывается обычно

$$\cos \varphi'' = -\cos \varphi' \quad v'' = v',$$

где φ'' и v'' относятся к отраженному лучу.

Произведя обратное преобразование к системе наблюдателя, получим

$$v''' = v'' \frac{1 + \frac{v}{c} \cos \varphi''}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Подставляя значения для v'' и φ'' , имеем

$$v''' = v \frac{1 - 2 \frac{v}{c} \cos \varphi + \left(\frac{v}{c}\right)^2}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)^2}, \quad (9)$$

что с точностью до членов второго порядка совпадает с классической формулой (8). Благодаря движению зеркала может происходить изменение самого закона отражения.

Эффект Допплера позволил провести ряд других выдающихся исследований: изучение строения кольца Сатурна, выделение теллурических линий в фраунгоферовом спектре поглощения, открытие спектрально-двойных звезд, измерение скорости вращения звезд вокруг своей оси по уширению испускаемых ими линий, определение лучевых скоростей ядер и хвостов комет, определение элементов параболической орбиты комет и т. д.

Лабораторные подтверждения существования эффекта Допплера для света. Хотя благодаря астрофизическим наблюдениям удалось подтвердить применимость принципа Допплера к свету, не отпала необходимость его проверки непосредственно в лабораторных условиях. Об этом говорил выдающийся русский астрофизик А. А. Белопольский в 1894 г. на IX съезде русских естествоиспытателей и врачей.

В своем докладе на съезде¹ Белопольский кратко остановился на работах предшественников, особенно Фогеля и Дунера, подробно говорил о методах изучения спектров переменных и двойных звезд. Но нас интересует

¹ А. А. Белопольский. О принципе Допплера — Физо и его применении к изучению различных явлений в спектрах светил. «Дневник IX съезда русских естествоиспытателей и врачей», 1894, № 6, стр. 14.

здесь главным образом его отношение к принципу Доплера. Признавая ценность работ своих предшественников, доказавших верность принципа для света, исходящего от небесных тел, Белопольский подчеркнул необходимость проверки в чисто земных условиях, с источниками, скорость которых можно измерить весьма точно. Он обосновал это тем, что нам неизвестны условия, в которых возникает световое излучение на Солнце и звездах. Возможно, что смещения спектральных линий могут возникать и по другим причинам; кроме того, ему представлялось маловероятным, чтобы космическое пространство не влияло на ход световых волн. Еще в 1894 г. Белопольский дал идею установки для проверки принципа Доплера в земных условиях [42]. В работе следующего года [43] он отмечает, что первая попытка доказательства принадлежала Ангстрему [44]. Но опыты Ангстрема оказались неудачными, так как он преувеличивал значение скорости излучателя и в его распоряжении не было достаточно хорошего спектрального аппарата. Белопольский считал, что приборы астрофизической лаборатории в Пулковке вполне пригодны для намеченного им эксперимента.

Первые результаты Белопольский доложил на общем собрании Русского астрономического общества в феврале 1898 г. [45]. Окончательные результаты были опубликованы в 1900 г. [46].

Идея опыта Белопольского оригинальна. Пусть источник находится на расстоянии x от каждого из параллельных плоских зеркал (рис. 12). Тогда расстояние от источника до его изображения будет $2x$. Если луч отразится от первого зеркала и попадет на второе, получится изображение уже на расстоянии $4x$ от источника, после третьего отражения — $6x$ и т. д. Каждое последующее отражение увеличивает расстояние на $2x$. Если зеркала начнут двигаться в направлении, нормальном к их

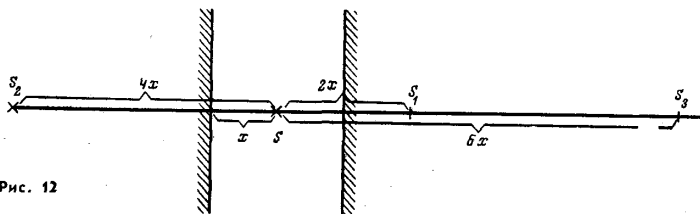


Рис. 12

поверхностям, со скоростью $\frac{dx}{dt}$, то n -е изображение будет обладать скоростью $2n \frac{dx}{dt} = v$. Рассматривая изображение как источник, получим по отношению к спектрографу n -кратно увеличенную скорость. При $\frac{dx}{dt} = 25$ м/сек и $n = 10$, $v = 500$ м/сек. Такая скорость может уже дать заметное смещение спектральных линий. Меняя направления движения зеркал на обратное, можно получить такое же смещение в обратную сторону. Расстояние между обеими смещенными линиями будет соответствовать относительной скорости в 1 км/сек.

Установка Белопольского состояла из двух колес, к каждому из которых в виде лопастей прикреплялись 8 плоских зеркал (рис. 13). С помощью регулировочных

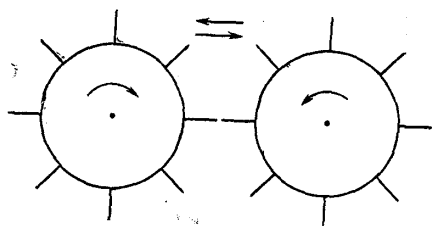


Рис. 13

винтов добивались, чтобы противостоящие зеркала обоих колес были параллельны между собой. Колеса вращались с помощью электромоторов, обеспечивающих строго постоянную скорость. Опыт проводился следующим образом. Открывалась половина коллиматорной щели и производились снимки, сначала при неподвижных зеркалах, затем при движущихся. После этого открывалась вторая половина щели, а первая закрывалась. Зеркала заставляли вращаться в обратную сторону, и снова производился снимок. Последний снимок производился опять при неподвижных зеркалах, чтобы иметь возможность вносить поправку в случае изменения внешних условий. При большом числе отражений интенсивность луча сильно падала, поэтому общее время экспозиций достигало 2 час., в течение которых заметно менялась температура. Поэтому Белопольский ограничился 6 отражениями, при кото-

рых весь опыт длился только 1 час. Так как источником света служило Солнце, благоприятными оказались только летние месяцы — июнь, июль, август. Скорость вращения менялась от 32 до 44 об/сек., что соответствовало скорости перемещения изображения порядка 240—330 м/сек., а значит, общему смещению от скорости 500—700 м/сек. Обработка результатов показала хорошее совпадение для скоростей, вычисленных по доплеровскому смещению и по числу оборотов колес.

За кажущейся простотой исходного замысла скрывались весьма тонкие и принципиальные проблемы оптики движущихся тел — отражение света от движущегося зеркала и преломление в движущейся относительно источника призме. Поэтому Белопольский во всех перечисленных выше работах так серьезно анализирует теоретические предпосылки своей работы.

В курсе астроспектроскопии, написанном по конспектам лекций, читанных в 1908—1916 гг., Белопольский подводит итог как собственных работ по доплер-эффекту в астрофизике, так и наиболее существенных результатов других авторов. И здесь большое внимание он опять уделяет вопросу об отражении света от движущихся зеркал, а также всевозможным акустическим и оптическим опытам по проверке формулы Допплера.

Достижения астроспектроскопии в конце XIX — начале XX в. подчеркивались крупнейшими русскими физиками. В 1892 г. Петр Николаевич Лебедев выступил по этому вопросу на публичном заседании Московского общества любителей естествознания [47], а Орест Данилович Хвольсон в 1895 г. написал большую обзорную статью для популярного журнала «Научное обозрение» [48]. Сам Белопольский в 1912 г. произнес речь на эту тему на торжественном собрании Академии наук¹. После изложения основной идеи Допплера он говорил:

«Принцип этот долго не мог укорениться в науке и подвергался жестокой критике со стороны чистых математиков и физиков. Однако какая-то сила заставляла другую часть ученых продолжать изыскания в этом направлении эмпирическим путем, и через полстолетия

¹ А. А. Белопольский. Современные задачи астрономии. Расстояния и движения звезд. «Известия АН» (6), 1912, 7, № 3.— «Астрономические труды», 1954, стр. 274—298.

после Допплера принцип, наконец, установился как прочный метод».

Хотя автор этих слов приписывает заслугу утверждения принципа Хеггинсу и Фогелю, прямой опыт Белопольского, выполненный в земных условиях, оказался наиболее убедительным.

Еще в отчете об опытах 1900 г. Белопольский писал, что собирается продолжать работу с усовершенствованными приборами, но ему не удалось осуществить свое намерение. Эту задачу выполнил другой русский академик — Борис Борисович Голицын.

Путь, приведший Голицына к исследованию допллер-эффекта, был иным. Еще в 1895 г. он заинтересовался актуальным тогда вопросом о влиянии температуры и давления на ширину спектральных линий. В статье, опубликованной им в этом году [49], дается подробный обзор различных теорий уширения спектральных линий, в том числе работ Липпиха, Пфаундлера, Рэлея и Эберта, обсудивших эффект с точки зрения принципа Допплера. В те годы было еще неясно, допустимо ли обобщить принцип на излучение отдельных атомов, молекул и ионов. Ссылаясь на Эберта и приводя ряд собственных соображений, Голицын выражает сомнение в обоснованности такого обобщения.

К занятиям экспериментальной спектроскопией Голицын приступил в 1905 г. [50] совместно с И. Вилипом. Между двумя работами, хотя и разделенными десятилетним периодом, имеется несомненная связь; и здесь подчеркивается огромная роль эффекта Допплера в астрофизике и опять ставится вопрос о влиянии температуры и давления на вид спектра. Исследование этого вопроса особенно существенно, если учесть большие значения этих величин на звездах. Работа выполнена в основном в 1905—1906 гг. и состоит из трех сообщений. В первых двух Голицын и Вилип не делают никаких выводов по тому вопросу, который нас здесь интересует, но третье заканчивается специальным параграфом «Теоретические соображения», в котором полученные результаты обсуждаются с точки зрения принципа Допплера.

Теперь Голицын уже признает применимость принципа к движущимся элементарным излучателям. Считая, что «носителями линейчатых спектров» являются ионы газов или паров, он при этом ссылается на три факта,

подтверждающих возможность такого применения. Первый состоит в совпадении порядка значений скорости ионов, вычисленной, с одной стороны, по доплеровскому смещению, а с другой — по данным электрического режима работы трубки. Второй — это равенство, в пределах ошибок измерений, смещения для двух наблюдений линий одной и той же спектральной серии. Третий заключается в том, что по скорости ионов, определенной по смещению, и известным условиям работы трубки можно вычислить плотность ионов; результаты оказались согласными с данными исследователей, измеривших плотность другими методами. Результаты, полученные Голицыным и Вилипом, приводили к тем же выводам, к которым пришли Штарк [51] и его сотрудники при изучении доплер-эффекта в канальных лучах.

Последняя серия измерений была проведена с помощью полученного физическим кабинетом Петербургской академии наук в 1905 г. ступенчатого эшелона Майкельсона. Сразу же по получении прибора Голицын предпринял тщательное его теоретическое и экспериментальное исследование. В опубликованной им обширной работе [52] содержатся как ранее известные, так и оригинальные результаты. Особое внимание уделялось вопросу о разрешающей способности спектрографа. В связи с этим Голицын заключает, что новое оборудование позволяет повторить опыт Белопольского со значительно большей точностью, если при этом принимать меры к строгому сохранению постоянства температуры.

И действительно, опыт был повторен при участии Вилипа в 1907 г. [53]. Была использована установка Белопольского и в основном сохранена его методика. Чтобы избежать температурных изменений, следовало максимально сократить время экспозиций, поэтому вместо Солнца в качестве источника бралась ртутная лампа Аронса, и большинство фотографий делалось после четырех отражений. Это было возможно, так как ступенчатый спектрограф имел большую разрешающую способность, чем прибор Белопольского. Все это обеспечило получение результатов с ошибкой не больше 20 м/сек., т. е. ошибка составляла всего 2,5%.

Опытами Белопольского — Голицына был дан однозначно положительный ответ на занимавший несколько десятилетий умы физиков и астрономов вопрос о существ-

вовании эффекта Доплера для света. Тем не менее и в дальнейшем подобного рода опыты повторялись. Так, в 1918 г. Майорана [54] воспользовался идеей Белопольского о получении больших скоростей отражением от движущихся зеркал (рис. 14). Второе колесо заменялось

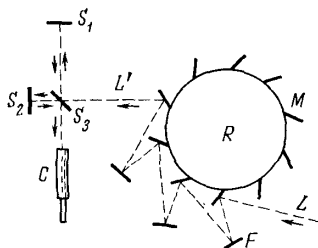


Рис. 14

рядом соответствующим образом расположенных неподвижных зеркал. Использовалась ртутная лампа; большая светосила установки позволяла с помощью интерферометра Майкельсона проводить наблюдения визуально. Тот же опыт, но с большей скоростью вращения при одном отражении, с использованием эталона Фабри — Перо, был описан Перо [55].

Большая разрешающая способность последнего интерферометра позволила Фабри и Бюиссону [56] отказаться от движущихся зеркал.

Двужущимися источниками служили крайние точки диаметра быстро вращающегося диска, освещавшегося ртутной лампой Хевитта. Интерференционные кольца сжимались при переходе от наблюдения удаляющегося края к приближающемуся. Точность измерений достигала 2%.

Отметим еще один опыт Майораны [57]. Он прикреплял ртутные дуговые лампы к стержню длиной 2 м, вращавшемуся вокруг своего центра. Допплеровские смещения наблюдались интерферометром Майкельсона, направленным касательно к описываемой лампами окружности, причем измерения приводились для особенно чувствительных к спектральным смещениям центров колец. Однако эти опыты оказались менее точными, чем предыдущие.

Эффект Доплера при излучении движущихся атомов, ионов, молекул. Если астроспектроскопические и лабора-

торные измерения не оставили сомнений в существовании оптического доплер-эффекта, то оставался открытым вопрос о том, в какой мере эффект сказывается при излучении микрообъектов. Вопрос о влиянии движения атомов и молекул на ширину спектральных линий был поставлен в 1870 г. Липпихом [58]. Полагая, что излучение обусловлено внутримолекулярными процессами, он считал невозможным допустить, что молекулы излучают разные, хоть и близкие частоты, образующие линию конечной ширины. Причиной подобного уширения может стать доплеровское смещение $\Delta\nu = \nu_0 \frac{v \cos \varphi}{c}$, а поскольку

согласно кинетической теории $\cos \varphi$ меняется от -1 до $+1$, ширина линии будет $2\nu_0 \frac{v}{c}$. Подобные же мысли вы-

сказывал и Рэлей [59], отмечавший, что учет одного лишь взаимного столкновения молекул недостаточен для объяснения экспериментально наблюдавшихся значений ширины линий. В последующие годы в большом числе экспериментальных и теоретических работ выяснилось, что ширина спектральных линий обусловлена тремя основными причинами: затуханием колебаний вследствие излучения (естественная ширина линий), доплеровским смещением, взаимодействием атомов. Еще Рэлей вывел формулу распределения интенсивности с одновременным учетом эффекта Доплера и соударений; в 1912 г. Фохт получил весьма общие формулы, учитывающие одновременно радиационное затухание и доплеровское смещение.

Основные достижения в этой области освещены в написанных в разные годы обзорах Конена (1902), Вайскопфа (1933), Собельмана (1954) [60].

Формулы распределения интенсивности внутри линии, уширение которой вызвано эффектом Доплера, полученные на основе распределения Максвелла, действительны только для теплового движения. Блэккет и Франк [61] исследовали сильное уширение линий бальмеровской серии при возбуждении атомов водорода электронными соударениями, вследствие которых скорость возбужденного атома может оказаться значительно больше скорости его теплового движения.

В начале XX в. интерес вызвали исследования Штарка и его сотрудников (а также ряда других эксперимен-

таторов) по эффекту Допплера в каналовых лучах. Поскольку каналовые лучи являются потоком быстро движущихся заряженных ионов и возбужденных атомов, в излучаемом ими свете должен обнаруживаться эффект доплеровского смещения. По характеру смещения спектральных линий можно было сделать ряд существенных выводов о свойствах каналовых частиц, механизме излучения, характере взаимодействия каналовых частиц с нейтральными атомами газа в трубке. Все эти вопросы имели немаловажное значение для исследования строения атомов. Штарк начал свои исследования в 1905 г.; эффекту Допплера в каналовых лучах было посвящено несколько сот работ на протяжении более 20 лет [62].

Главная цель, которую ставил перед собой Штарк, начиная опыты,—выявление «носителей линии», т. е. определение того, какие частицы излучают: ионы или нейтральные атомы. При этом отличали понятие «носители линий», т. е. системы, внутри которых происходили процессы, вызывающие излучение, от понятия «центры излучения», т. е. частиц, непосредственно излучающих. Приступая к опытам, Штарк не был еще уверен, что в излучении каналовых частиц будет иметь место эффект Допплера. Поэтому в его первой работе выяснялось, каким образом должен сказаться этот эффект в спектре. Если длину волны, наблюдаемую перпендикулярно трубке, обозначить λ_0 , а вдоль трубки — λ , то $\lambda_0 - \lambda = \lambda \frac{v}{c}$.

При разрядном напряжении в трубке U и заряде иона e

$$eU = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad \text{и} \quad v_0 = \sqrt{\frac{2eU}{m}},$$

где v_0 — максимальная скорость частицы. Так как частицы пробегают свободно только часть катодного падения напряжения, а позади катода теряют энергию вследствие соударений, то будут встречаться и скорости меньше максимальной. Поэтому соответствующая линия будет иметь некоторую ширину, причем интенсивность будет быстро падать от некоторого максимума до нуля в фиолетовую сторону (граница определяется скоростью v_0) и медленно в красную сторону. Уже первые опыты подтвердили теоретические ожидания, хотя был выявлен ряд особенностей, правильное толкование которых стало воз-

можным лишь после создания квантовой теории. Вообще надо сказать, что хотя эффект Допплера действительно был плодотворным средством исследования явлений, происходящих в разрядной трубке, значение всего комплекса этих опытов в то время переоценивалось. Это объяснялось как отсутствием других достаточно эффективных методов, так и неразработанностью теории атомных и молекулярных спектров. Сама интерпретация опытов в рамках доквантовых представлений не могла быть полностью удовлетворительной.

После создания квантовой механики и разработки теории спектров интерес к опытам с каналовыми лучами спал.

Обобщение принципа Допплера В. Михельсоном. В рассмотренных до сих пор случаях эффект Допплера появлялся в основном в результате относительного движения источника света и наблюдателя. Однако на примере эйнштейновского анализа опытов типа Физо и опыта Белопольского мы уже видели, что доплеровские смещения могут наблюдаться и при неизменном расстоянии между ними, если только оптические условия на пути, проходимом лучом, меняются во времени (например, если имеет место отражение или преломление на движущейся поверхности). Еще в 1899 г. русский физик В. Михельсон впервые обратил внимание на это обстоятельство в статье, опубликованной на русском языке и вскоре переведенной на английский и французский¹.

Исходя из основной формулы для эффекта Допплера

$$v = v_0 \frac{1 \pm \frac{u}{c}}{1 \mp \frac{v}{c}}$$

и разлагая ее в ряд с точностью до членов второго порядка

$$v = v_0 \left(1 \pm \frac{u}{c}\right) \left(1 \pm \frac{v}{c}\right) = v_0 \left(1 \pm \frac{u+v}{c}\right),$$

¹ В. А. Михельсон. К вопросу о правильном применении принципа Допплера. ЖРФХО, ч. физ., 1899, 31, стр. 119—125; «Astrophys. J.», 1901, 13, p. 192—198; «J. de Phys.», 1901, 10, p. 150—156.

Михельсон записывает ее в виде

$$v = v_0 \left(1 \pm \frac{1}{c} \cdot \frac{dl}{dt} \right), \quad (10)$$

где l — расстояние между источником и наблюдателем. Если u, v — скорости наблюдателя и источника, то ясно, что $u - v = \frac{dl}{dt}$.

Если свет распространяется в однородной среде, то формула (10) совпадает с обычной, а под c надо понимать скорость распространения света в данной среде. Если же встречаются неоднородности, например свет переходит из одной среды в другую, то в формулу входит оптический путь $l = l_1 n_1 + l_2 n_2 + \dots = \sum l_i n_i$, где l_i — отрезок пути, пройденный в среде с показателем преломления n_i . Тогда

$$v = v_0 \left(1 - \frac{1}{c} \cdot \frac{d}{dt} \sum l_i n_i \right) \text{ и } v = v_0 \left[1 - \frac{1}{c} \left(\sum n_i \frac{dl_i}{dt} + \sum l_i \frac{dn_i}{dt} \right) \right]. \quad (11)$$

Слагаемые вида $\frac{n_i}{c} \cdot \frac{dl_i}{dt}$ дают обычный эффект Допплера, слагаемые второго вида вызывают смещение при изменении плотности среды или отдельных ее участков со временем, даже если относительная скорость наблюдателя и источника равна нулю. Лауэ [63] получил формулу Михельсона следующим образом. Если свет пробегает отрезок l_i в среде с показателем n_i , то колебания в конце пути можно представить выражением $\sin \left[v \left(t - \frac{1}{c} \sum l_i n_i \right) + \delta \right]$. Если $\sum l_i n_i$ меняется со временем, то, поскольку в течение одного периода изменение мало, то его можно представить как

$$\sin \left\{ v \left[\left(1 - \frac{1}{c} \cdot \frac{d}{dt} \sum l_i n_i \right)_{t=\frac{x}{v}} - \left(\frac{1}{c} \cdot \frac{d}{dt} \sum l_i n_i \right)_{t=0} \right] + \delta \right\}.$$

Значит, частота меняется по закону (11).

В качестве примера Михельсон рассмотрел изменение частоты при преломлении света в движущейся приз-

ме. Пусть луч проходит через призму (рис. 15) с преломляющим углом $2r$ параллельно ее основанию, т. е. с наименьшим углом отклонения δ . За время Δt призма смещается в направлении вершины на отрезок $AA' = v\Delta t$ из положения ABC в положение $A'B'C'$. Изменение

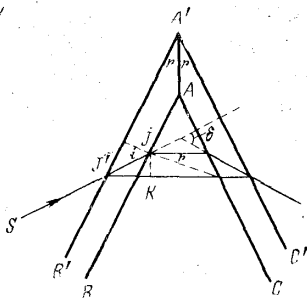


Рис. 15

пути l_1 , проходимого вне призмы, будет (знак «—» указывает на уменьшение пути)

$$\Delta l_1 = -JJ' = -AA' \frac{\sin r}{\cos i} = -2v\Delta t \frac{\sin r}{\cos i},$$

а пути l_2 , проходимого в призме,

$$\Delta l_2 = 2J'K = 2JJ' \cos(i-r) = 2v\Delta t \frac{\sin r}{\cos i} \cos(i-r).$$

Учитывая закон преломления $\sin i / \sin r = n$ и, зная, что для воздуха $n_1 = 1$, а для стекла $n_2 = n$, получим

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \sum l_i n_i &= 2v \frac{\sin r}{\cos i} [-1 + n \cos(i-r)] = 2v \sin(i-r) = \\ &= 2v \sin \frac{\delta}{2}. \end{aligned}$$

Отсюда согласно (11)

$$v = v_0 \left(1 - 2 \frac{v}{c} \sin \frac{\delta}{2} \right).$$

Идеи Михельсона привлекли к себе внимание. Венгерский астрофизик Фени [64], подробно рассмотревший их применение к явлениям в атмосфере Солнца, даже счи-

тал возможным говорить о принципе Допплера — Михельсона. В статье «О принципах Допплера — Физо и Михельсона» известный французский оптик А. Перо [65] ставит такую задачу: «Движущийся по отношению к наблюдателю источник белого света S окружен движущейся поглощающей средой. Каков спектр света, воспринимаемый наблюдателем?» Если поглощающая среда имела бы форму тела вращения и вращалась бы вокруг своей оси так, что положение граничной поверхности не менялось, то

$$\lambda_1 = \lambda_0 \left(1 - \frac{v}{c_1}\right), \quad \nu_1 = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c_1}\right),$$

где $c_1 = \frac{c}{n_1}$ — скорость света в среде, ν_0 — частота линии поглощения, v — скорость источника. Если же граничная поверхность удаляется от источника со скоростью u , то по формуле (11)

$$\nu = \nu_1 \left(1 - \frac{n_1 - n_2}{c} u\right),$$

где n_2 — показатель преломления среды, в которой находится наблюдатель. Отсюда с точностью до членов второго порядка

$$\begin{aligned} \nu &= \nu_0 \left(1 + \frac{n_1}{c} v\right) \left(1 - \frac{n_1 - n_2}{c} u\right) = \\ &= \nu_0 \left[1 + \frac{n_1(v - u)}{c} + \frac{n_2}{c} u\right]. \end{aligned}$$

В 1924 г. Перо [55] предпринял экспериментальную проверку формулы Михельсона. С этой целью он располагал 12 призм с показателем преломления $n=1,6$ и преломляющим углом $2r=70^\circ$ на краю быстро вращающегося диска. Линейная скорость призм достигала 213 м/сек. Вычисленное по этим данным относительное смещение $1/\nu \cdot \Delta\nu/\nu$ составляло $3,6 \cdot 10^{-11}$; опыты дали величину $3,4 \cdot 10^{-11}$. Отклонения в 6% были в пределах ошибок наблюдения.

Оптика движущихся тел и квантовая теория света. В период, предшествовавший созданию квантовой механики и квантовой электродинамики, когда отсутствовало

еще адекватное толкование дуализма свойств света и когда отношения между классическим и квантовым описанием физических явлений не были еще достаточно выяснены, создалась такая ситуация, когда некоторые оптические явления (интерференция, дифракция, поляризация) легко объяснялись волновой теорией света, а другие (испускание и поглощение света, люминесценция, фотоэффект и т. д.) находили оправдание только в квантовой. Тогда казалось, что если одной теории удалось бы дать удовлетворительное объяснение явления, относящегося к области другой, то это был бы решающий довод в пользу первой. Многие физики еще думали, что вопрос стоит *или-или*, хотя Эйнштейн во многих работах приводил доказательства, что подобная постановка вопроса неправомерна. Характерно в этом смысле высказывание О. Д. Хвольсона, автора одного из наиболее авторитетных и полных курсов физики начала века: «Борьба двух теорий... была бы окончена, если бы одной из них удалось завоевать область другой, т. е. если бы волновая теория смогла объяснить все явления, связанные с излучением или поглощением лучистой энергии, или если бы квантовая теория показала, как объяснить все явления, которые наблюдаются при распространении лучей и которые так полно и сравнительно просто разъясняются теорией волновой. Непрерывно делаются попытки то с одной, то с другой стороны проникнуть в чужую область. О полной удаче, об окончательно достигнутых результатах пока говорить не приходится»¹.

Известную роль здесь сыграли и оптические явления в движущихся телах. Не представляло труда объяснить с помощью фотонов явления аберрации света, даже частичного увлечения. Естественно объяснялись и законы отражения света от движущегося зеркала, тесно связанные с понятием давления излучения. Но, как отмечал Зоммерфельд², казалось почти невозможным трактовать с квантовой точки зрения эффект Допплера, обусловленный взаимным сближением или удалением волновых поверхностей. Именно здесь квантовой теории удалось вторгнуться в область типично волновых явлений. «Об

¹ О. Д. Хвольсон. Курс физики. Том дополнительный. физика, 1914—1920 гг., ч. II. М.—Л., 1926, стр. 14.

² А. Зоммерфельд. Оптика. М., 1953, стр. 117.

одной, до сих пор, пожалуй, единственной, вполне удачной попытке мы скажем подробнее; мы имеем в виду объяснение на основании квантовой теории принципа Допплера», — писал Хвольсон.

В работе 1922 г. Шредингер [66] получил релятивистскую формулу для эффекта Допплера, исходя из боровского условия частот. Работа начинается с рассмотрения простейшего случая, когда направление излучения совпадает с направлением движения излучающей частицы. При написании условия квантового перехода, связанного с излучением света, необходимо учитывать, что понятие разности энергий, а значит, и понятие несмещенной частоты теряют свою однозначность, если атом до и после излучения не покоится в той же системе отсчета. Каждому боровскому стационарному состоянию соответствует определенная энергия E в системе отсчета, относительно которой центр тяжести излучателя покоится.

Пусть E_1 и E_2 — значения энергии до и после излучения. Соответствующие массы покоя равны E_1/c^2 и E_2/c^2 . Систему отсчета, в которой измеряется скорость атома до излучения (v_1) и после излучения (v_2), Шредингер называет спектрометром. В этой системе боровское условие частот дает

$$h\nu = \frac{E_1}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} - \frac{E_2}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}},$$

а закон сохранения количества движения

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{v_1 E_1}{c^2 \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} - \frac{v_2 E_2}{c^2 \sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}}.$$

Путем несложных преобразований приходим к выражению, удобному для дальнейших рассуждений,

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{\varphi_1 \varphi_2}} \cdot \frac{E_1^2 - E_2^2}{2h \sqrt{E_1 E_2}}, \quad \text{где } \varphi_1 = \sqrt{\frac{c - v_1}{c + v_1}},$$

$$\varphi_2 = \sqrt{\frac{c - v_2}{c + v_2}}.$$

Несмещенную частоту ν_0 вводим при условии $v_1 = v_2 = 0$:

$$\nu_0 = \frac{E_1^2 - E_2^2}{2h \sqrt{E_1 E_2}}.$$

Тогда

$$\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2}} \quad \text{и} \quad \nu = \nu_0 \sqrt{\frac{c + v_1}{c^2 - v_1^2} \cdot \frac{c + v_2}{c^2 - v_2^2}}.$$

Если направление движения атома соответственно до и после испускания составляет с направлением излучения углы α_1 и α_2 , то эта формула легко обобщается и получаем

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{c + v_1 \cos \alpha_1}{c^2 - v_1^2} \cdot \frac{c + v_2 \cos \alpha_2}{c^2 - v_2^2}}.$$

Пренебрегая изменением скорости молекулы при испускании ($v_1 = v_2$), получаем обычные релятивистские выражения для эффекта

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} \quad \text{и} \quad \nu = \nu_0 \frac{1 + \frac{v}{c} \cos \alpha}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Поскольку изменение скорости атома при излучении мало, влияние квантовой поправки на ширину спектральной линии нельзя обнаружить экспериментально.

Несколько позже Дирак [67] показал, что этот результат получается в четырехмерном пространстве — времени, если боровское условие частот рассматривать как четырехмерное векторное соотношение.

Экспериментальное обоснование специальной теории относительности оптическими опытами

История экспериментального обоснования специальной теории относительности — поучительная во многих отношениях глава истории современной физики. В плане теоретическом она стимулировала постановку и решение ряда проблем и выпятила роль теоретической интерпретации при анализе результатов измерений; в плане экспериментальном — привела к созданию ряда высокоточных приборов, например интерферометра Майкельсона; в плане философском — способствовала выяснению ряда методологических вопросов (например, о роли «решающего эксперимента», об относительности понятия «экспериментальное подтверждение»); в плане психологическом и науковедческом — дала обширный материал для анализа психологии восприятия научных открытий; в плане историко-научном — позволила по-новому рассмотреть некоторые аспекты отношения теории и эксперимента в истории становления новых физических концепций. Естественно, что при постановке и решении всех этих вопросов историю экспериментального обоснования нельзя оторвать от истории теории относительности в целом.

Сомневаться сегодня в справедливости специальной теории относительности — все равно что сомневаться в существовании ядерной энергии после длительной работы атомных электростанций или в реальности ускорителей элементарных частиц, уже давших науке совершенно уникальные данные. Тем не менее фундаментальность понятий и представлений теории относительности, ее постулатов и следствий приводит к непрекращающимся до нашего времени попыткам ее пересмотра с тех или иных позиций. При этом острее критики часто направляется на экспериментальные основы этой теории. Ответной реакцией является постановка новых опытов, осуществление которых связано не только с внедрением в прак-

тику измерений усовершенствованных приборов, но и с использованием по мере их открытия новых эффектов. Примером может служить использование лазеров и эффекта Мессбауэра.

Что следует понимать под опытом, подтверждающим теорию относительности (здесь и далее речь идет только о специальной теории относительности)? Часто в качестве таковых признают только те опыты, трактовка которых с точки зрения классической теории Лоренца и теории относительности приводит к различным результатам, причем опыт подтверждает справедливость именно релятивистских расчетов. Если встать на эту точку зрения, то опыт Майкельсона, например, является подтверждением специальной теории относительности, если ее сопоставляют с электронной теорией без гипотезы сжатия, и не является таковым, если сопоставление идет с теорией Лоренца, включающей гипотезу сжатия. А опыты, результаты которых оцениваются как доказательство независимости скорости света от скорости источника, вообще не попадут в эту категорию, поскольку электродинамика Лоренца, построенная на допущении неподвижного эфира, тоже приводит к этому выводу. А ведь подобные опыты подтверждают второй постулат и позволяют сделать выбор между специальной теорией относительности и некоторыми вариантами баллистических теорий. Наконец, в эту категорию не попадут все опыты первого порядка относительно v/c , выявляющие влияние поступательного (Физо, Майкельсон, Зеeman) или вращательного (Саньяк, Харресс, Майкельсон — Гейль) движения тел на характер происходящих в них оптических явлений, ибо здесь теории Лоренца и Эйнштейна также приводят к одинаковому результату. «Этот опыт,— писал Лауэ,— не может помочь осуществить выбор между ними. Несмотря на это, его выполнение было бы очень желательно, потому что оптика движущихся тел не настолько богата точными экспериментами, чтобы каждое расширение ее экспериментальных основ не приносило ей пользу»¹. За 50 лет, прошедших со дня написания этих слов (статья Лауэ относится к 1911 г.), положение значительно изменилось, и подобные опыты давно уже проведены,

¹ М. Лауэ. Статьи и речи. М., «Наука», 1969, стр. 58.

показав неправильность исходной идеи Стокса о полнотой увлекаемом эфире и основанной на ней электродинамики движущихся тел Герца.

Когда мы говорим о полноте экспериментального обоснования, нужно иметь в виду не отдельный опыт и даже не отдельную группу опытов, а всю совокупность опытов, результаты которых соответствуют постулатам специальной теории относительности и следствиям из нее. И тут не играет решающей роли, могут ли служить эти результаты критерием выбора между альтернативными теориями или нет. Важно, что ни одна из дорелятивистских или ультрарелятивистских теорий не в состоянии столь же просто и изящно, без привлечения *ad hoc* дополнительных гипотез объяснить всю совокупность экспериментальных данных.

Из множества опытов, сюда относящихся, в данной главе будут рассматриваться только те, осуществление которых связано с оптическими явлениями в движущихся телах ¹.

Влияние вращения на распространение света

Общее рассмотрение. После того как в знаменитых опытах Майкельсона — Морли выявилось отсутствие «эфирного ветра», некоторые физики, в том числе и сам Майкельсон, склонны были вернуться к идее Стокса об увлечении эфира движущимися телами, хотя явление абберации света и опыты типа Физо противоречили этой концепции. Они надеялись, что удастся все-таки согласовать некоторым образом теорию Стокса с этими явлениями. Но тут необходимы были новые опыты.

В 1904 г. Майкельсон [1] предложил новый интерференционный опыт, также предназначенный для выяснения вопроса об увлечении эфира движущимися телами. В предложенном им опыте два когерентных луча должны пробегать на Земле замкнутый путь в противоположных направлениях. Если эфир увлекается движущейся Землей, то не следует ожидать какой-либо разницы времен

¹ Опыты типа Физо, в которых выявлялось влияние поступательного движения тел на распространение света, описаны в главе I.

прохождения света в обоих направлениях. Если же эфир неподвижен, то должна возникнуть разность времен прохождения, ведущая к смещению интерференционных полос. Первоначально формула смещения была получена Майкельсоном для контура прямоугольной формы в предположении, что стороны прямоугольника расположены перпендикулярно и вдоль параллелей (причем формула ошибочно содержала коэффициент 2 вместо 4). В 1911 г. теория такого опыта рассматривалась Лауэ как с точки зрения теории относительности, так и с точки зрения электродинамики Лоренца и Кона. Как и следовало ожидать, во всех трех случаях получались совершенно одинаковые результаты [2].

Лауэ рассматривает несколько упрощенную установку (рис. 16). Плоскость вращается с угловой скоростью ω вокруг перпендикулярной к ней оси, неподвижной в системе отсчета K_0 . Установка состоит из $n-1$

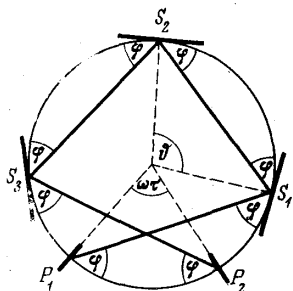


Рис. 16

зеркал S , расположенных касательно к окружности с центром в точке пересечения оси вращения установки с плоскостью окружности, и одной полупрозрачной пластинки P , расположенной вдоль радиуса, которая в начале пути разделяет, а в конце пути соединяет полученные когерентные пучки. (Чертеж дан для $n=4$. Ход луча представлен в системе K_0 , причем P_1 —положение пластинки в момент ухода луча, P_2 —при возвращении, а S_1, S_2, S_3 —положение зеркал в моменты отражения.) При этом $n-1$ точек, в которых помещены зеркала, вместе с точкой, в которой находится пластинка, образуют правильный n -угольник. Скорость установки отно-

сительно системы K_0 для всех точек плоскости не изменяется по абсолютной величине, а следовательно, в этой системе отсчета все отрезки имеют постоянную длину.

Возникает вопрос: существует ли расположение зеркал, при котором оба пучка, исходящих от полупрозрачной пластинки, возвращаются в исходную точку? Луч, идущий по направлению вращения, пробегает в системе K отрезки, большие сторон n -угольника, поскольку за время прохождения луча от одного зеркала к другому последние передвигаются на некоторый отрезок. Но все эти отрезки одинаковы и образуемый ими n -угольник остается правильным, так как зеркала, расположенные по касательным к направлению движения, не меняют угла отражения. Аналогичным образом можно рассматривать и второй луч. Следовательно, такое расположение зеркал и пластинки обеспечивает возвращение пучков в одну точку.

Однако в обычных условиях центр окружности не покоится, а плоскость, в которой проводится опыт, не может быть выбрана перпендикулярно оси вращения Земли. Средняя точка имеет поступательное движение в системе K_0 , неподвижной относительно Солнца; это движение складывается из двух компонент: движения центра тяжести Земли и вращения Земли вокруг своей оси. Первая компонента за время проведения опыта может считаться неизменной, а в теории относительности постоянная скорость поступательного движения не влияет на положение интерференционных полос. Вторая компонента меняется за время τ одного пробега максимум на $\omega R\tau^2$, где R — радиус Земли. Это изменение составляет величину порядка 10^{-5} см/сек. и может не учитываться; опыты же являются аналогом знаменитого опыта Фуко с маятником. Если поступательное движение Земли не может быть обнаружено никакими механическими или оптическими средствами, ее вращательное движение может быть доказано в механике опытом Фуко, в оптике — опытами описанного типа.

Опыты Харреса и Саньяка. Идея Майкельсона была осуществлена на опыте в несколько видоизмененном виде лишь в 1911—1912 гг. Харресом [3]. Работа Харреса являлась диссертационной и не была опубликована, так как он погиб на фронте. Поэтому его данные стали известны из статьи Харцера [4], опубликованной в 1914 г.

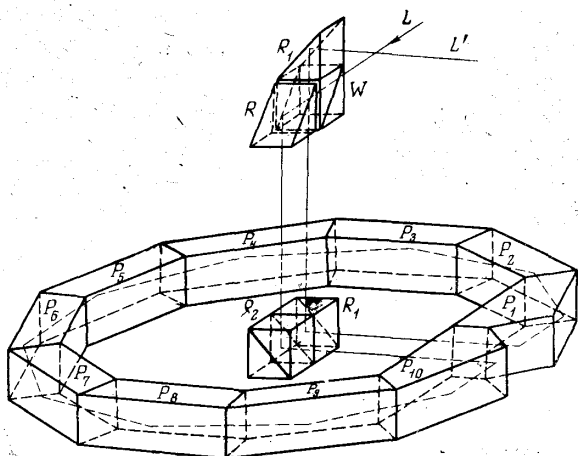


Рис. 17

Экспериментальная часть была подробно описана Кнопфом лишь в 1920 г. [5].

Непосредственной целью Харреса была экспериментальная проверка формулы Лоренца для коэффициента увлечения. Так как для воды дисперсия мала, Харрес взял в качестве движущегося тела стекло. Основную часть его установки составляли десять плотно сдвинутых друг к другу стеклянных призм (рис. 17). Полученная таким образом система, близкая по форме к стеклянному кольцу, была прикреплена к тяжелой пластинке. В центре кольца располагалось призмное приспособление, в котором свет разделялся на два пучка. Оба пучка входят через внутренние грани под прямым углом в стеклянное кольцо и благодаря полному внутреннему отражению проходят через него одинаковые пути в противоположных направлениях, после чего выходят вновь перпендикулярно тому направлению, по которому они проходили кольцо. Вышедшие из кольца пучки после отражения в центральном призмном приспособлении направлялись в интерферометр.

Вся система приводилась в быстрое вращение со скоростью 1500 об/мин. Вращение вызывало смещение интерференционных полос, которое фиксировалось визуальным наблюдением и фотографированием. Применение

светофильтров позволяло пользоваться для опытов различными участками спектра. Принимались специальные меры для устранения влияния температуры и других факторов, могущих внести ошибки в измерения. Но в выводе расчетной формулы и обработке данных Харрес допустил ряд ошибок, исправленных впоследствии Харцером. Последний учел искривление хода луча во вращающейся системе, а также изменение законов отражения и преломления в движущихся телах, но не учел влияние пути, проходимого лучом в воздухе. Но фактически эти исправления не могли сказаться при соблюдавшейся у Харреса точности наблюдений. Пересчет данных по формуле Харцера дал следующие результаты для коэффициента увлечения: для красного света $K = 0,5964 \pm \pm 0,0015$, для зеленого $K = 0,5208 \pm 0,0020$.

Наиболее подробное рассмотрение теоретических вопросов, связанных с опытами Харреса, принадлежит Лауэ [6]. Последний показал, что, хотя все опыты, связанные с вращательными системами, следовало бы рассматривать с точки зрения общей теории относительности, применение специальной теории дает вполне удовлетворительные результаты. Это тем более оправдано, что даже нерелятивистская трактовка приводит к тем же формулам.

Хотя опыты Харреса были поставлены позже, они являются своеобразным переходным мостом от опытов по увлечению эфира поступательно движущимся телом к явлениям во вращающихся системах.

В связи с этим рассмотрим опыты Саньяка 1913 г. [7]. Его установка ближе всего подходит к схеме, намеченной Лауэ. Горизонтальный круг диаметром 50 см равномерно вращался со скоростью около 120 об/мин. На круге были укреплены на разных расстояниях три зеркала и одна пластинка, раздваивавшая световой пучок и направлявшая полученные лучи по и против направления вращения прибора. На круге были укреплены также интерферометр с фотографирующим устройством и источник света. Вращение происходило попеременно по и против часовой стрелки. Снятие показаний производилось двумя методами: сравнением положения центральной полосы при движущемся приборе с положением микрометрических линий, расположенных в фокальной плоскости коллиматора при неподвижном приборе, и измерением смещения

центральных полос в двух фотографиях, соответствующих вращениям в обе стороны. Вторым методом оказался более удобным. Смещение центральной полосы при изменении направления вращения выражается, как показал Лауэ, формулой

$$\Delta = \frac{4\omega S}{c\lambda},$$

где ω — угловая скорость вращения круга, λ — длина волны, S — площадь, охватываемая контуром, по которому проходит свет, т. е. в данном случае площадь квадрата. У Саньяка $S = 860 \text{ см}^2$, $\lambda = 4360 \text{ \AA}$, что давало $\Delta = 0,079$. Экспериментально же был получен результат $\Delta = 0,077$.

Скорость вращения в опыте Саньяка не могла быть большой, так как все приборы вращались вместе с зеркалами и при больших скоростях могли бы деформироваться.

Опыты Саньяка, как и Харреса, подтверждают естественное следствие теории относительности, что во вращающейся относительно Земли системе оптические явления происходят иначе, чем в системе, связанной с Землей. Эти опыты отличаются лишь тем, что у Харреса большую часть своего пути свет проходил внутри стекла, тогда как у Саньяка свет проходил только по воздуху. Тот факт, что у Харреса источник и интерферометр неподвижны, а у Саньяка движутся вместе с установкой, не играет роли для положения интерференционных полос. Дело в том, что в обоих опытах влияние вращения на разность хода лучей сказывается только за время от разделения начального пучка на два пучка до их воссоединения. Все остальные части пути не вносят никакой разности хода, а поэтому безразлично, движутся они или покоятся.

Так как у Саньяка вследствие малой скорости вращения установки смещения были небольшими, а у Харреса имелся большой разброс данных, опыты необходимо было повторить. В 1925—1928 гг. опыты этого типа были проведены Погани [8], который самым тщательным образом учитывал все факторы, могущие каким-либо образом влиять на величину смещения полос. Зеркала делались из различных материалов, затем заменялись призмами, металлическими зеркалами из сталей различных марок; была значительно усовершенствована механическая часть

установки. Прочность механической основы и вывод источника света и интерферометра из вращающейся части позволили довести скорость вращения до 20—33 об/сек. Площадь, охватываемая контуром, равнялась 1250 см². При таких условиях смещение должно было равняться 0,906 полосы. Эксперимент дал 0,920, т. е. на 1,2—2% больше, причем отклонения в отдельных измерениях не превышали 2—3%. Подтвердив правильность предыдущих результатов, опыты Погани еще раз доказали, что эфир не увлекается вращением тел. Но вместе с тем они не могли разрешить вопроса о том, будет ли эфир увлекаться движением Земли в целом.

Опыт Майкельсона — Гейля. Наконец, в 1923 г. Майкельсон решил осуществить свою первоначальную идею, используя в качестве вращающегося тела Землю. Первая серия опытов была проведена на открытом воздухе на Маунт-Вильсон. Но даже при самых благоприятных атмосферных условиях интерференционные полосы были расплывчатыми и не могли служить основой для каких-либо выводов о поведении эфира. Майкельсон прекратил свои опыты и лишь в 1925 г. совместно с А. Гейлем приступил к созданию новой установки [9].

Чтобы обеспечить постоянство интерференционной картины, опыт решено было провести в трубах, из которых выкачан воздух. Хотя к этому времени было доказано, что форма контура не играет никакой роли и направление труб может быть произвольным, Майкельсон расположил трубы в виде четырехугольника, ориентированного вдоль параллелей и меридианов (рис. 18). Общая

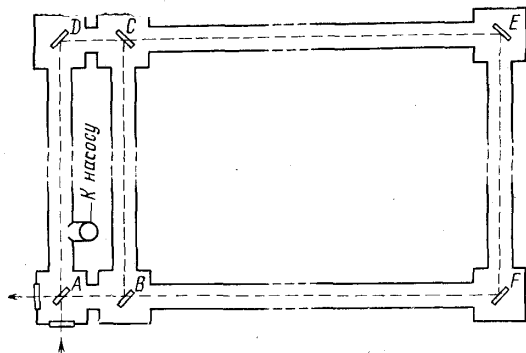


Рис. 18

длина труб составляла 1904 м; они огибали контур площадью 0,208 км². Источник света давал монохроматический свет с длиной волны 5700 Å. Ожидаемое смещение полос составляло $0,236 + 0,002$ полосы. Среднее значение из 269 наблюдений составило $0,235 + 0,005$. Принимая во внимание сложность наблюдений, следует признать полученный результат вполне убедительным доказательством справедливости приведенной выше формулы.

Опубликованные Майкельсоном и Гейлем отчеты весьма лаконичны; поэтому трудно составить себе полное представление о применяемой ими методике измерений. Для измерения смещения полос необходимо было бы сравнивать положение полос с тем положением, которое бы они имели в отсутствие вращения Земли. Но из формулы вытекает, что смещения не будет и в случае, когда охватываемая контуром площадь практически равна нулю. Для осуществления такого малого контура в общую систему труб была введена пятая труба, которая располагалась параллельно трубе, образующей меньшую сторону прямоугольника, близ нее. Для измерений нужно было сравнить положение полос в обоих случаях, т. е. при прохождении света по малому и большому контурам. Но переход к большому контуру отражался бы на положении полос, даже если бы эфир увлекался Землей.

Майкельсону и Гейлю необходимо было устранить смещение полос, вызванное самой заменой контуров. Для этого они поступили следующим образом. Наблюдатель видит два изображения источника света — по одному от каждого из лучей, пробегающих контур в противоположных направлениях, — и между ними интерференционную картину. Когда введен малый контур, посередине между изображениями источника находится центральная полоса. Введение большого контура смещает и изображение источников, и интерференционную картину, причем последняя смещается еще и вследствие вращения Земли. Поэтому центральная полоса уже не оказывается на середине между изображениями источников. Смещение центральной полосы от этой середины и определит измеряемый эффект [10].

Результаты опытов Харреса, Саньяка и Майкельсона — Гейля оказались достаточно убедительными, и идея о возможности построения теории, основанной на допущении увлекаемого эфира, была окончательно остав-

лена. Тем не менее открытие квантовых генераторов позволило еще раз повторить опыт этого типа со значительно большей точностью. Установка Мачека и Дэвиса [11] состояла из гелиево-неонового кольцевого газового лазера с четырьмя резонаторами длиной 1 м, образующими стороны квадрата (рис. 19), в углах которого располагались плоские зеркала. Через одно из зеркал излучение направлялось в резонаторы по и против часовой

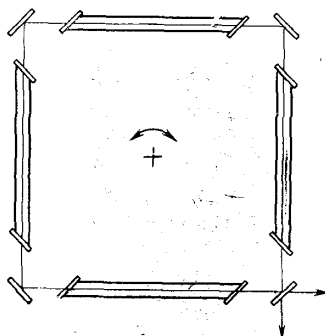


Рис. 19

стрелки. Оба пучка после обхода всего контура попадали на катод фотоумножителя. При вращении всей установки наблюдались биения с частотой от 1 до 40 кГц, в зависимости от угловой скорости. Так как разница оптических путей в опытах описываемого типа равна

$$\Delta = \frac{4\omega S}{c},$$

то относительное смещение частот

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta}{P} = \frac{4\omega l^2}{c \cdot 4l} \quad \text{и} \quad \delta\nu = \frac{\omega l \nu}{c} = \frac{\omega l}{\lambda},$$

где l — сторона квадрата.

Опыт показал, что частота биений действительно пропорциональна угловой скорости ω , причем в пределах ошибок измерений экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими. Поскольку лазеры позволили измерить относительную разность частот порядка

10^{-12} , точность измерений была на несколько порядков выше, чем в предыдущих опытах этого типа.

Сохраняя три трубки кольцевого лазера заполненными активной средой и заполняя четвертую движущимся веществом (кварц, CSi_4 , воздух), авторы [12] использовали эту же установку для измерения френелевского коэффициента увлечения. Результаты также хорошо согласуются с теорией.

Опыт Майкельсона, его аналоги и повторения

Наибольшую известность среди оптических опытов с движущимися телами приобрел опыт Майкельсона, описание которого сейчас встречается в любом вузовском курсе физики. И хотя роль этого опыта в генезисе теории относительности часто гипертрофировалась, рассмотрение истории его проведения и теоретического истолкования представляет несомненный интерес. Исследователи, неоднократно возвращаясь к фактическому повторению опыта [1], искали не только возможности улучшения экспериментальной техники, но и принципиально новые решения, которые бы позволили ставить опыт в новых вариантах. Поскольку в результатах опыта Майкельсона долгое время видели единственное экспериментальное подтверждение теории относительности, дискуссии вокруг теории опыта одновременно затрагивали основы теории относительности в целом.

Время и результаты проведения опытов представлены в приложенной таблице. Рассмотрение таблицы и анализ многочисленных работ, посвященных опыту Майкельсона, за время с 1881 по 1971 г. позволяют разделить весь 90-летний период истории этого опыта на четыре основных этапа.

Первый этап (1880—1905) начинается с опубликования знаменитого письма Максвелла к Тодду и потсдамских опытов Майкельсона и завершается опытами Морли и Миллера, последние наблюдения которых хронологически совпадают с возникновением теории относительности. С точки зрения техники эксперимента этот этап характеризуется увеличением точности наблюдений, достигаемой в основном за счет удлинения плеч интерферо-

Опыт Майкельсона и его повторения

Исследователь	Год	Место	Длина пути, см	Смещение		Предел соро- сти эфиро- го вет- ра, км/сек.
				ожидае- мос	наблю- даемое	
Майкельсон	1881	Потсдам	120	0,04	0,01	10
Майкельсон и Морли	1887	Кливленд	1100	0,40	0,005	7
Морли и Мил- лер	1902—1906	»	3220	1,13	0,007	3,5
Миллер	1921	Маунт-Вильсон	3200	1,12	0,04	—
Он же	1922—1924	Кливленд	3200	1,12	0,015	—
Миллер (с сол- нечным светом)	1924	»	3200	1,12	0,007	3,5
Томашек (с вне- земным источником)	1924	Гейдельберг	860	0,3	0,01	6
Миллер	1925—1926	Маунт-Вильсон	3200	1,12	0,044	—
Кеннеди и Тогн- дайк	1926	Пассадена	200	0,07	0,001	2
Пикар и Стаэль	1926	Воздушный баллон	280	0,13	0,0034	9
Те же	1926—1927	Брюссель и Маунт- Риги	280	0,13	0,003	9
Иллингворт	1927	Пассадена	200	0,07	0,0002	1
Майкельсон, Пиз и Пирсон	1929	Маунт-Вильсон	2590	0,9	0,005	5
Иоос	1930	Иена	2100	0,75	0,001	1,5
Аналоги опыта Майкельсона						
Эссен	1955	Тедингтон	—	—	—	0,24
Таунс и Сидер- хольм	1958	Нью-Йорк	—	—	—	0,033
Чемпни и Мун	1961	—	—	—	—	0,017
Таунс с сотрудни- ками	1964	Массачузетский технологический институт	—	—	—	0,03
Чемпни, Изаак, Кан	1963	—	—	—	—	0,005

метра (от 120 до 3220 см), а с теоретической — попытка-
ми истолкования отрицательных результатов опытов.
Эти попытки шли по трем основным направлениям:
утверждения недоказательности опытов вследствие не-
точности теоретических расчетов, не учитывающих всех
влияющих на интерференционную картину факторов,
объяснения отрицательных результатов в рамках теории
Стокса — Планка об увлечении эфира и, наконец, введе-
ния контракционной гипотезы Фитцджеральда — Лорен-
ца. Наиболее плодотворным оказалось последнее на-
правление, позволившее Лоренцу создать достаточно

стройную теорию (особенно второй вариант) электромагнитных и оптических явлений в движущихся телах. Проверка этой теории фактически и послужила стимулом для повторения опытов в 1902—1905 гг.

Второй этап (1905—1920) начинается с первой работы Эйнштейна по специальной теории относительности и условно заканчивается 1920 г.—последним «спокойным» годом, предшествовавшим нашумевшим опытам Миллера. Этот этап характеризуется полным отсутствием экспериментальных работ, но зато активизацией теоретической мысли, обусловленной появлением теории относительности. Теоретические работы опять-таки можно объединить в три группы. Первая, наиболее существенная, охватывает работы, посвященные детальному анализу характера получаемой интерференционной картины, тщательному рассмотрению влияния отдельных факторов (ширины пучка, положения зеркал и разделительной пластинки, отражения от движущихся зеркал, ориентировки прибора в пространстве, монохроматичности света). Благодаря этим работам удалось установить правомерность первоначальной, несколько упрощенной трактовки Майкельсона, а следовательно, и доказательной силы опытов. Ко второй группе относятся работы, связанные с так называемой баллистической теорией. И хотя работы этой группы встречаются и на следующем этапе, уже на данном удалось показать, что ряд явлений с трудом объясняется этой теорией. К тому же основная дискуссия здесь шла не непосредственно об этом опыте, а в связи со вторым постулатом теории относительности.

Наконец, к третьей группе относятся немногочисленные попытки сохранить в принципе старые эфирные теории, вводя в них новые гипотезы. И если в начале периода релятивистское объяснение рассматривалось только как одно из возможных, то к концу благодаря отчасти успехам общей теории относительности оно оказалось и более рациональным, и наиболее обоснованным. Различия в точках зрения постепенно, с одной стороны, сглаживаются, а с другой — обостряются, выявляя два сформировавшихся направления: релятивистское и антирелятивистское.

Третий этап (1921—1930) начинается с первых положительных результатов Миллера и заканчивается последним повторением опытов Иоосом в Иене. К этому пери-

оду относится наибольшее число работ. Общей их характерной особенностью является отражение сформировавшейся в предыдущие годы коллизии «за или против теории относительности». Все остальные различия взглядов оказались несущественными по сравнению с этой основной проблемой. Обсуждение результатов часто повторяемых опытов, аналогичных майкельсоновскому, потребовало даже созыва специальной конференции, состоявшейся на Маунт-Вильсон в 1927 г. с участием Майкельсона, Лоренца, Миллера, Кеннеди, Эпштейна, Хедрика и др., но и здесь выявились две противоположные точки зрения. Попытки примирить отрицательные результаты большинства экспериментов с противоположными данными Миллера оказались малоуспешными. Общая борьба релятивизма и антирелятивизма по существу методологических и физических проблем поглотила и споры вокруг опытов типа Майкельсона. С чисто экспериментальной точки зрения описываемый этап отличается повышением точности установки не за счет удлинения плеч, а за счет увеличения разрешающей способности отсчетного прибора (введение полутеневого метода Кеннеди, применение фотографирования) и устранения помех (применение инертных газов, термостата).

Четвертый этап (начало 1931 г.) характерен резким уменьшением числа работ. Но дело, естественно, не в статистике, а в падении интереса к обсуждаемой проблеме. Опыт Майкельсона перестает занимать центральное место в физике, появляются другие экспериментальные обоснования теории относительности. Отголоски предыдущих споров еще эпизодически встречаются в физической литературе, но принципиально новых идей не было высказано, и поэтому они особого внимания к себе не привлекали. В этом несомненно сказалась сила теории относительности. Только в 50-х годах, после появления приборов, основанных на совершенно других идеях (резонаторы, эффект Мессбауэра, индуцированное излучение), возникла возможность проведения опытов, не повторяющих схему Майкельсону, но являющихся его аналогами в смысле интерпретации результатов.

Приведенная периодизация позволяет раскрыть историческое значение экспериментального осуществления и теоретического толкования опытов типа Майкельсона на всех этапах. Рассмотрим их несколько подробнее.

Первые варианты опыта и его теория. В статье «Эфир» в Британской энциклопедии Максвелл писал: «Единственный практически возможный способ прямого определения скорости эфира по отношению к солнечной системе заключается в сравнении значений скорости света, выведенных из наблюдений затмений спутников Юпитера, когда Юпитер виден с Земли приблизительно в противоположных точках эклиптики»¹. Эту мысль он развил несколько подробнее в написанном незадолго до смерти письме к астроному Тодду: «Я говорил, что подобного рода наблюдения могут кое-что добавить к другим методам определения величин, относящихся к скорости света, но это, насколько я знаю, единственный метод для получения некоторых сведений о направлении и величине скорости Солнца относительно светоносной среды... 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*»² (курсив наш.— Ф. Ф.).

Казалось, что в данном случае действительно встретилась неразрешимая экспериментальная задача, так как необходимо было измерить эффекты порядка $(v/c)^2 = (30/300000)^2 = 10^{-8}$. Но в том же 1880 г., когда было опубликовано письмо Максвелла, молодой Майкельсон, работавший в Берлине у Гельмгольца, построил прибор, позволявший проводить измерения с той точностью, которая и была необходима для выявления движения Земли относительно эфира, так называемого эфирного ветра. Устройство широко теперь известного интерферометра Майкельсона следующее.

Тонкий пучок света от источника света максимально монохроматического падает на плоскопараллельную пластинку M с полупосеребренной задней поверхностью (рис. 20). При этом часть света (примерно половина) отражается, направляясь к плоскому зеркалу S_1 , вторая часть проходит к такому же зеркалу S_2 . Отражаясь от

¹ Д. К. Максвелл. Статьи и речи. М., «Наука», 1968, стр. 200.

² «Nature», 1880, 21, p. 315.

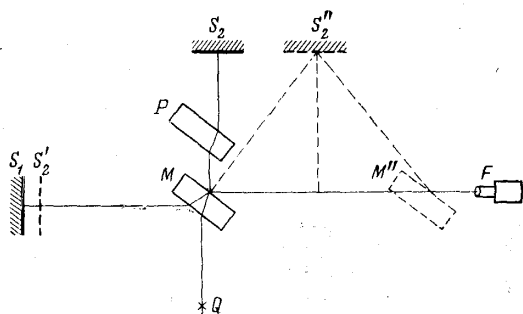


Рис. 20

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 проходят толщу 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 наклона (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 ($\sim 6 \cdot 10^{-5}$ см), можно было надеяться наблюдать даже очень тонкие эффекты порядка $\left(\frac{v}{e}\right)^2 = \beta^2$.

Идея Майкельсона заключалась в том, чтобы обнаружить смещение интерференционных полос, обусловлен-

ное 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 — соответственно 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'' — положение 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

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

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 разности времен

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

(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 $\lambda = 6,10^{-5}$ см. Значит,

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

Такую величину можно было уже обнаружить.

В первых опытах, проведенных Майкельсоном [2] 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: при длине плеч первого интерферометра 1,2 м ожидаемое смещение равнялось 0,040 полос, а наблюдаемое — 0,034. Майкельсон не делает никаких экстраполяций там, где речь идет об анализе экспериментальных данных; к выводу об отсутствии эфирного ветра его привела скорее физическая интуиция. Как показал Лоренц [3], в перво-

начальном расчете Майкельсона была допущена ошибка, в результате которой величина ожидаемого смещения оказалась в 2 раза больше действительно следующей из теории. Если внести эту поправку, то ожидаемый результат будет того же порядка, что и ошибка измерения.

В 1887 г., отчасти по настоянию Томсона и Рэлея, Майкельсон в сотрудничестве с Морли повторил опыт в Кливленде [4]. На этот раз был принят ряд дополнительных мер по улучшению результатов. Для устранения влияния внешних вибраций и изгибов, вызванных вращением установки, интерферометр был установлен на квадратной каменной плите (рис. 22) со стороной 1,5 м и толщиной 0,25 м, покоящейся на деревянной кольцеобразной подставке, плавающей в сосуде со ртутью. Для увеличения смещения, длина пути с помощью системы зеркал была увеличена до 11 м (рис. 21). Поддерживая непрерывное равномерное вращение и отмечая положение центральной интерференционной полосы через промежутки, равные $\frac{1}{16}$ времени оборота (5 мин.), получили хорошо согласованные результаты. Статистическая обработка данных позволяла исключать периодические смещения. Общее смещение после полного поворота равнялось 0,005 и во всяком случае было меньше 0,01 (ошибка измерения) при ожидаемом смещении 0,3. Теперь результаты были более убедительными, они подтверждали отсутствие эфирного ветра со скоростью, превышающей 5—7 км/час.

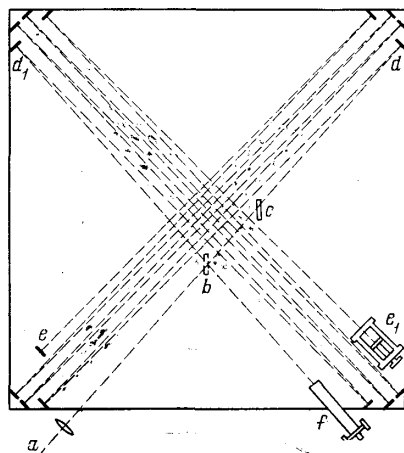


Рис. 21

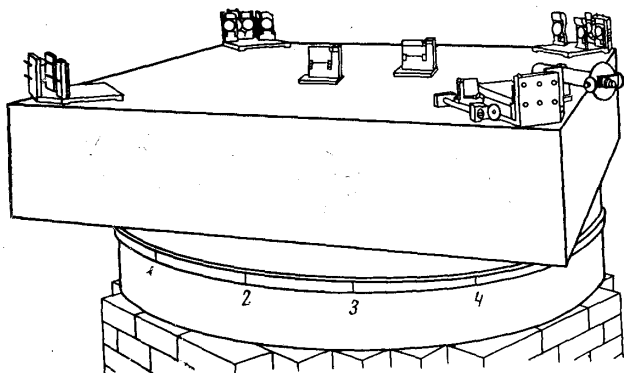


Рис. 22

Сам Майкельсон тогда не представлял себе, с какими глубокими изменениями основных физических представлений будет связана интерпретация результатов его опытов, и отрицательные результаты показались ему разочаровывающими. Позднее он напишет: «Рассмотренный опыт приведен нами не столько для ознакомления с решением задачи, сколько с целью показать пример применения световых волн для решения возникающих задач... Этот опыт имеет для меня исторический интерес, так как именно для решения указанной задачи был изобретен интерферометр. Вероятно, всякий согласится, что произведенная нами работа в достаточной степени вознаградила нас за отрицательный результат опыта тем, что привела к изобретению интерферометра»¹.

Если Майкельсон смотрел на результаты своих опытов как на неудачу, то иначе оценил их Лоренц [5]—творец классической электронной теории, которой эти результаты явно противоречили. Отвергая высказанное Майкельсоном предположение о необходимости возврата к теории увлекаемого эфира Стокса, Лоренц писал: «Можно ли на основании этого результата принять, что эфир принимает участие в движении Земли и что, следовательно, теория аберрации Стокса верна? Трудности, на которые наталкивается эта теория при объяснении абер-

¹ А. А. Майкельсон. Световые волны и их применение. М.—Л., 1934, стр. 128—129.

рации, представляются мне слишком значительными для того, чтобы я мог согласиться с этим взглядом и, напротив, не попытался бы устранить противоречие между теорией Френеля и результатом Майкельсона. В самом деле, это удастся посредством одной гипотезы, которую я уже высказал некоторое время тому назад и к которой, как я позже узнал, пришел и Фитцджеральд» [5].

Попытки объяснения результатов опытов Майкельсона — Морли. Гипотеза, о которой пишет Лоренц, вводила знаменитую «контракцию Фитцджеральда — Лоренца» размеров тел в направлении движения. Ход мыслей Лоренца был следующим [6]. Разница времен прохождения путей перпендикулярными световыми пучками в интерферометре Майкельсона $l/c \beta^2$, обусловленная влиянием движения Земли, может быть компенсирована, если геометрическая длина пути, на прохождение которого затрачивается больше времени, вследствие движения уменьшается на величину $l/2 \beta^2$, т. е. в отношении $1 : \sqrt{1 - \beta^2}$. Тогда (считая $L_1 \approx L_2 = l$)

$$t_1 = \frac{2l}{c} \sqrt{1 - \beta^2} \cdot \frac{1}{1 - \beta^2} = \frac{2l}{c \sqrt{1 - \beta^2}} = t_2,$$

и вращение прибора никак не будет влиять на положение интерференционных полос, что и соответствует данным Майкельсона и Морли.

Лоренц обосновывал свою гипотезу тем, что поступательное движение может изменить взаимодействие между молекулами или атомами, а так как размеры и форма твердых тел обусловлены величиной этих взаимодействий, то, следовательно, должно иметь место и изменение размеров. При такой трактовке могло возникнуть предположение, что величина сжатия зависит от химического состава движущегося тела. Для проверки этого обстоятельства Морли и Миллер, начиная с 1902 г., предприняли ряд повторений опытов, результаты которых были опубликованы в 1905 г. [7].

Чтобы проверить предполагаемую зависимость сжатия от химического состава тела, в их новой установке каменное основание было заменено сначала деревянным, затем стальным. Поскольку длина оптического пути по каждому плечу была доведена до 32,2 м, смещение должно было равняться 1,13 полосы. При наблюдениях учи-

тивалось не только орбитальное движение Земли вокруг Солнца, но и предполагаемое движение солнечной системы к созвездию Геркулеса со скоростью 16,7 км/сек. Для наблюдения выбиралось такое время, когда комбинация обоих движений должна была дать максимальный эффект. Тем не менее общий вывод из всех опытов подтверждал отсутствие эфирного ветра, во всяком случае со скоростью больше 3,5 км/сек. Морли, Миллер и Лоренц восприняли эти результаты как подтверждение «сжатия», но первые считали необходимым повторить опыт на некоторой высоте, чтобы устранить возможные сомнения. Осенью 1905 г. прибор был перенесен на холм Эвклид в Кливленде (высота 870 футов над уровнем моря). Несколько серий измерений дали смещение, равное $\frac{1}{10}$ ожидаемого, но результаты не были опубликованы, так как вскоре работы были прекращены.

Данное Лоренцем объяснение отрицательных результатов опытов Майкельсона привлекло наибольшее внимание и оказалось более перспективным, однако уже на первом этапе появился ряд работ, авторы которых в той или иной форме оспаривали достоверность результатов Майкельсона — Морли и тем самым отрицали необходимость введения гипотезы сжатия. Так, Сазерленд [8] считал, что точность выполнения опыта не позволяет делать каких-либо решающих выводов, ибо вследствие конечности ширины световых пучков отдельные лучи пучка после отражения от зеркала окажутся непараллельными, и интерференционная картина исказится. Хикс [9] обратил внимание на необходимость учета изменения угла отражения и длины волны вследствие того, что отражение света происходит от движущегося зеркала, а также угла падения при движении источника вместе с установкой. Кроме того, он считал, что данные опытов были неправильно обработаны и нельзя определить среднее значение по наблюдениям, проведенным в разные дни. В своих ответах Лодж, Картмел, Морли и Миллер [10] показали, что если даже согласиться с этими замечаниями, то они не отразятся на правильности интерпретации опытов, поскольку вносят поправки лишь высших порядков малости.

Опыт Майкельсона и теория относительности. Второй этап начинается знаменитой статьей Эйнштейна 1905 г. «К электродинамике движущихся тел», в которой была

изложена практически вся специальная теория относительности. Вопрос о роли опытов Майкельсона — Морли в подготовке умов к переходу от классической электронной теории с ее неподвижным эфиром к специальной теории относительности, с одной стороны, и о роли этих опытов в генезисе идей самого Эйнштейна — с другой, довольно сложен.

Во многих учебных пособиях и популярных изданиях создание теории относительности прямо связывается с отрицательными результатами опыта Майкельсона — Морли. Однако эта точка зрения не соответствует историческому ходу событий; особенно подробно вопрос анализируется в опубликованных недавно статьях американского историка физики Д. Холтона [11], в которых приводится написанное в феврале 1954 г., ранее неизвестное письмо Эйнштейна американскому историку Давенпорту. Оно является ответом на прямой вопрос о влиянии Майкельсона на зарождение теории относительности.

Дорогой мистер Давенпорт!

Уже до работы Майкельсона было хорошо известно, что в пределах точности эксперимента не наблюдалось влияние движения координатной системы на физические явления и соответственно на их законы. Г. А. Лоренц показал, что это может быть объяснено на основе его формулировки максвелловской теории во всех случаях, когда можно пренебречь вторыми степенями скорости системы (т. е. в эффектах первого порядка).

Однако из теории следовало ожидать, что такая независимость не будет иметь место для эффектов второго и более высоких порядков. Величайшей заслугой Майкельсона было то, что он сумел совершенно определенно показать в одном случае, что ожидаемого эффекта второго порядка *de facto* не существует. Эта работа Майкельсона, замечательная в равной степени как по смелости и ясности постановки задачи, так и по той изобретательности, с которой была достигнута необходимая, крайне высокая точность измерений, составляет непреходящий вклад в науку. Этот вклад явился сильнейшим аргументом за то, что «абсолютного движения» не существует, т. е. в пользу принципа относительности, который никогда со времени Ньютона не подвер-

гался сомнению в механике, но казался несовместимым с электродинамикой.

Когда я развивал свою теорию, результат Майкельсона не оказал на меня заметного влияния. Я даже не могу припомнить, знал ли я о нем вообще, когда я писал свою первую работу по специальной теории относительности (1905 г.). Объяснить это можно просто тем, что из общих соображений я был твердо убежден в том, что никакого абсолютного движения не существует, и моя задача состояла только в том, чтобы сочетать это обстоятельство с тем, что известно из электродинамики. Отсюда можно понять, почему в моих исследованиях опыт Майкельсона не играл никакой роли или, по крайней мере, не играл решающей роли.

Я не возражаю против опубликования этого письма. Я готов также дать дополнительные разъяснения, если они потребуются.

С искренним уважением
*Альберт Эйнштейн*¹.

Физик Шенкленд, описывая свою встречу с Эйнштейном 4 февраля 1950 г., писал: «Когда я поинтересовался, как он познакомился с опытом Майкельсона — Морли, он рассказал, что это произошло благодаря статьям Лоренца, но только после 1905 г. «Иначе,— сказал он,— я упомянул бы о нем в моей статье»². Во время встречи 24 октября 1952 г. Эйнштейн говорил: «На это не так просто ответить; я не помню точно, когда впервые узнал об опыте Майкельсона. Я не сознавал, что он влиял на меня непосредственно в те семь лет, когда теория относительности была моей жизнью. Видимо, я считал само собой разумеющимся, что опыт верен»³. Затем Эйнштейн добавил, что в 1905—1909 гг. он много думал об этом опыте и обсуждал его с Лоренцем и другими физиками.

В многочисленных оригинальных и обзорных статьях по теории относительности Эйнштейн неоднократно останавливался на экспериментальных основах этой теории,

¹ Цит. по: Д. Холтон. Эйнштейн и «решающий эксперимент». «Успехи физических наук», 1971, 104, стр. 298.

² Р. Шенкленд. Беседы с Альбертом Эйнштейном. В кн. «Эйнштейновский сборник 1967 г.» стр. 59.

³ Там же, стр. 74.

но никогда не утверждал, что тот или другой отдельный опыт оказал на него решающее влияние. Свою знаменитую статью 1905 г. он начинает не со ссылки на опыт; он говорит, что «электродинамика Максвелла в современном ее виде приводит в применении к движущимся телам к асимметрии, которая несвойственна, по-видимому, самим явлениям»¹. Эта асимметрия заключалась в том, что при рассмотрении взаимодействия движущихся магнита и проводника с током должны строго разграничиваться два случая, когда движется либо одно, либо другое из этих тел, хотя наблюдаемое явление должно зависеть от их относительного движения. Дальше он писал: «Примеры подобного рода, как и *неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно «светоносной среды»*», ведут к предположению, что не только в механике, но и в электродинамике никакие свойства явлений не соответствуют понятию абсолютного покоя, и даже, более того, к предположению, что для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, справедливы те же самые электродинамические и оптические законы, как это уже доказано для величин первого порядка»².

Выделенные нами слова неоднократно служили поводом для построения различных догадок о том, какие опыты имел в виду Эйнштейн — первого или второго порядка относительности v/c . Но, вообще говоря, независимо от ответа на этот вопрос, можно с уверенностью сказать, что отдельный опыт не мог бы быть решающим для Эйнштейна, который в 1917 г. в работе «О специальной и общей теории относительности» писал: «Теории развиваются и выражаются как объединение большого числа отдельных опытных фактов... Теория черпает свое подтверждение в том, что она связывает большое число отдельных эмпирических фактов, и в этом состоит ее справедливость»³. Подводя итог всему, что в разное время говорил Эйнштейн по поводу взаимоотношения между его теорией и опытом Майкельсона, Холтон пишет: «...когда Эйнштейн пишет или говорит об истоках

¹ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. I, стр. 7.

² Там же.

³ Там же, стр. 593.

теории относительности в страдательном залоге, в ответ на прямой вопрос или по обязанности, например в публичной лекции, он останавливается на значении, которое имел опыт Майкельсона для дальнейшего развития и принятия теории другими физиками. Но когда он пишет или говорит о влиянии опыта на него самого — в явном виде и в первом лице единственного числа, Эйнштейн всегда говорит, что влияние на него самого было «незначительным», «косвенным» или «довольно косвенным», «не имеющим решающего значения»; тут же он добавляет: «Я был достаточно убежден в справедливости принципа относительности еще до того, как я узнал об этом эксперименте и его результатах». Поэтому следует учитывать, что Эйнштейн по-разному оценивает влияние на науку в общественном смысле и науку в личном смысле»¹.

И действительно, многие физики писали о том, что именно простота объяснения теорией относительности отрицательного результата опыта Майкельсона и Морли заставила их принять эту теорию, несмотря на трудности восприятия тех новых представлений, которые она внесла в физику. Другая причина, заставлявшая соединить судьбу опытов с теорией Эйнштейна, — дидактическая. Авторы первых учебников и общих обзоров, стремясь обосновать эту теорию, ссылались чаще всего именно на опыт с эфирным ветром, одним из наиболее потрясающих по красоте, наглядности и точности достижений экспериментальной физики того времени. Такой прием должен был облегчить восприятие парадоксальности с точки зрения «здравого смысла» выводов новой теории. Постепенно их стали считать генетически связанными, поскольку позднейшие авторы уже не занимались специальными историческими исследованиями.

Таким образом, хотя для самого Эйнштейна результаты опытов Майкельсона и Морли не сыграли решающей роли, несомненно, что в период, непосредственно предшествующий созданию теории относительности, их противоречие теории Лоренца подготовило умы к необходимости принятия некоторых радикальных изменений в фундаментальных понятиях. После создания теории

¹ Д. Холтон. Эйнштейн и «решающий эксперимент», стр. 302.

относительности эти опыты оказались в глазах большинства тесно связанными с теорией: отрицание доказательной силы опытов рассматривалось одновременно как отрицание правильности релятивистской точки зрения и наоборот.

Именно последнее обстоятельство и заставляло на протяжении многих лет постоянно возвращаться к тщательному анализу всех деталей проведения опыта, всех факторов, могущих в той или иной степени влиять на результаты. Возникавшие в связи с этим дискуссии способствовали уточнению первоначальной, несколько упрощенной теории опыта.

Дискуссии о доказательной силе опыта. Хронологически первой работой (1909) в этом направлении была статья Кола «Об опыте Майкельсона» [12]. Работа состояла из двух частей. В первой части автор рассматривает влияние движения зеркала на ход отраженного луча. Если вести расчеты с точностью до $(v/c)^2$, то оказывается, что угол отражения отличается от угла при неподвижном зеркале. Это отличие Кол называет зеркальной аберрацией.

Во второй части работы полученные результаты прилагаются к установке Майкельсона, причем утверждается, что допущение Майкельсона о том, что смещение полос Δx связано с изменением разности фаз $\Delta\varphi$ соотношением $\Delta x = \Delta\varphi \frac{d}{\lambda}$, где d — ширина полосы, не всегда верно. Выявляется, что если принять это допущение, то лучи, дающие уже вторую полосу, не могут достигнуть объектива трубы. Кол считает, что в трубе будет наблюдаться дифракционная картина на щели коллиматора, поэтому никаких смещений полос не будет. Все это приводит его к общему выводу, что опыт Майкельсона нельзя считать доказательным. Вопрос о движении эфира мог бы быть решен, если бы наблюдалось изменение яркости полос, отрицаемое абсолютной теорией и вытекающее из теории относительности.

Доводы Кола вызвали появление важной статьи Лауэ «Доказателен ли опыт Майкельсона?» [13]. В ней подробно раскрывались некоторые обстоятельства, играющие существенную роль в теории интерференционных явлений, наблюдавшихся Майкельсоном, но оставшихся недостаточно выясненными в его отчетах. В первую

очередь необходимо было выяснить, получаются ли в интерферометре полосы равного наклона или равной толщины. Если допустить, что оба зеркала строго параллельны, то в фокальной плоскости трубы видна интерференционная картина в плоскопараллельном зазоре S_1S_2' , образованном первым зеркалом и изображением второго. Это будут полосы равного наклона — концентрические кольца. Разность хода обоих лучей равна $(L_1 - L_2) \cos \alpha$, где L_1 и L_2 — длины плеч, измеренные вдоль среднего луча, α — угол между направлением лучей и нормалью к разделительной пластинке. Отсюда вытекает, что разность хода не может никогда равняться нулю, ибо если $L_1 = L_2$, то S_1 и S_2' совпадают и вообще никакой интерференционной картины не будет. Если же S_1 и S_2' непараллельны и образуют клин, то получаются локализованные на зазоре полосы равной толщины, параллельные грани клина. Если же, кроме того, $L_1 = L_2$, то S_1 и S_2' пересекаются и образуется двойной клин. Тогда в середине поля зрения образуется полоса, соответствующая нулевой разности хода. Эта полоса минимальной освещенности не смещается при изменении длины волны использованного света. Если менять длину плеч L_1 и L_2 , произойдет смещение двойного клина, а следовательно, и интерференционных полос на величину, пропорциональную $L_1 - L_2$.

Что в опыте Майкельсона получаются именно полосы равной толщины, ясно из описания интерферометра, данного в книге Майкельсона «Световые волны и их применение», и из статей Морли и Миллера, в которых прямо говорится, что наблюдались параллельные полосы, а не концентрические кольца. Они механически меняли длину плеч и получали требуемые теорией смещения полос. Так как изменение скорости света вследствие движения эфира эквивалентно изменению длин плеч, этим уже доказана способность прибора реагировать на это движение.

Применяя эти выводы к возражениям Кола, Лауэ показал, что его ошибка состоит в том, что интерференционные полосы считались равного наклона; их возникновение объяснялось дифракцией на коллиматорной щели, что не следует из опубликованных отчетов Майкельсона и Морли. Если бы последнее было верно, то действи-

тельно никакого смещения полос не было бы. Единственное изменение было бы в яркости картины, но это ничего не имеет общего с опытом Майкельсона. Что касается зеркальной абберрации, то, согласно теории неподвижного эфира, она имеет место, следствием чего явилось бы сдвоение источника даже при $L_1 = L_2$. Но расстояние между обоими источниками так мало, что его наблюдать в данном случае нельзя.

Обсуждение опытов Майкельсона началось вновь после выступления Будде на собрании немецких естествоиспытателей и врачей в Карлсруэ в 1911 г. [14]. Он выдвинул три основных возражения. Первое касалось вопроса о величине и направлении скорости Земли относительно эфира. В первых опытах Майкельсона учитывалось только орбитальное движение Земли; Морли и Миллер учитывали также и движение солнечной системы. Но последнее рассматривается по отношению к среднему положению некоторой «неподвижной» звезды. Однако сама звезда обладает некоторой скоростью в эфире, о величине и направлении которой тогда ничего нельзя было сказать. Следовательно, и вектор скорости Земли в эфире содержит неизвестную компоненту; это приводит к тому, что однократное выполнение опыта не может быть доказательным.

Для устранения случайного влияния третьей компоненты нужно несколько серий наблюдений, выполненных в разные времена года.

Второе возражение касается метода подсчета разности фаз двух интерферирующих лучей. Обычно при этом подсчете оперируют с абсолютными длинами путей, пройденных светом. Но разность фаз зависит от числа длин волн, укладываемых на длине пути. Это число в неподвижных системах действительно пропорционально самому пути, поэтому можно брать отношение l/λ . Но в движущихся системах необходимо учитывать эффект Допплера, меняющий длину волны, а следовательно, и написанное отношение. Это эффект первого порядка относительно v/c и пренебрегать им нельзя.

Третье возражение касается учета толщины разделительной плоскопараллельной пластинки. Отношение толщины пластинки к длине плеча интерферометра порядка v/c , поэтому, по мнению Будде, следует учитывать вносимое ею изменение фазы.

Не приводя здесь расчетов Будде, остановимся подробнее на поставленных им вопросах, оставаясь в рамках теории неподвижного эфира.

Первое возражение в принципе верно. Но если брать всю совокупность опытов, проведенных в разное время Майкельсоном, Майкельсоном и Морли, Морли и Миллером, становится чрезвычайно маловероятным, чтобы во всех случаях установка была так расположена, чтобы неизвестная компонента могла компенсировать остальные, тем более что не было обнаружено даже $1/10$ ожидаемого смещения.

Более существенно второе замечание, детально рассмотренное в работе Лауэ «К теории опыта Майкельсона» [15]. Во-первых, Лауэ обосновывает принятое им при расчете разности фаз положение о том, что свет проходит некоторый отрезок s , движущийся со скоростью v , с относительной скоростью $c_r = c - v$ (рис. 23). Рассмотрим систему (x, y, z, t) , покоящуюся относительно неподвижного эфира, и систему (ξ, η, ζ, t) , связанную с первой уравнениями

$$\xi = x - vt, \quad \eta = y, \quad \zeta = z.$$

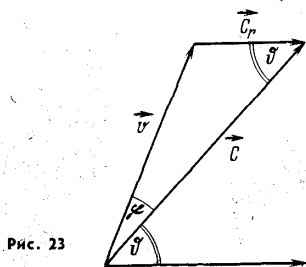


Рис. 23

Координаты конца отрезка s в последней системе будут $(0, 0, 0)$ и (ξ_P, η_P, ζ_P) .

В системе (x, y, z, t) периодический член в уравнении плоской волны будет $e^{iv[t - \frac{1}{c}(ax + \beta y + \gamma z)]}$, где α, β, γ — соответствующие направляющие косинусы, причем $\alpha = \cos \vartheta$, где ϑ — угол между скоростью c и осью x . Тогда

$$e^{iv[t - \frac{1}{c}(ax + \beta y + \gamma z)]} = e^{iv[t(1 - \frac{av}{c}) - \frac{1}{c}(\alpha\xi + \beta\eta + \gamma\zeta)]}.$$

В начальной точке колебание представлено выражением

$$e^{iv \left[t \left(1 - \frac{av}{c} \right) \right]},$$

а в конечной —

$$e^{iv \left[t \left(1 - \frac{av}{c} \right) - \frac{1}{c} (\alpha \xi_P + \beta \eta_P + \gamma \zeta_P) \right]}.$$

Если обозначить угол между c и v через ψ , то имеем

$$\alpha \xi_P + \beta \eta_P + \gamma \zeta_P = s \cos \psi, \quad \cos \psi = \frac{1}{c_r} (c - v \cos \vartheta) = \frac{c - av}{c_r}.$$

Подставляя в предыдущее выражение, получим

$$e^{iv_r \left(t - \frac{s}{c_r} \right)},$$

где введено обозначение

$$v_r = v \left(1 - \frac{av}{c} \right);$$

v_r — относительная частота, соответствующая принципу Допплера. Значит, действительно фазовая скорость прохождения отрезка s будет c_r .

Рассмотрим теперь отражение луча в зеркале. Будем считать, что луч отражается точно назад и его скорость равна c_r' . Тогда обратная волна может быть представлена

$$\text{в нулевой точке } e^{e(v_r t + \delta)}, \text{ а в точке } P — e^{i[v_r(t + \frac{s}{c_r'}) + \delta]},$$

где δ предстоит еще вычислить. Сохранение относительной частоты следует из линейности граничных условий. Они выполняются, как показал Абрагам, только, если

$$e^{i \left[v_r \left(t + \frac{s}{c_r'} \right) + \delta + \varepsilon \right]} = e^{iv_r \left(t - \frac{s}{c_r} \right)}.$$

Здесь ε — скачок фазы при отражении, которым Будде пренебрегает. Тогда

$$\delta = -v_r s \left(\frac{1}{c_r} + \frac{1}{c_r'} \right),$$

и для отраженной волны в нулевой точке имеем выражение

$$e^{iv_r \left[t - s \left(\frac{1}{c_r} + \frac{1}{c'_r} \right) \right]}.$$

А это значит, что фаза затрачивает время $s \left(\frac{1}{c_r} + \frac{1}{c'_r} \right)$ для прохождения отрезка s в обоих направлениях, как и берется обычно в теории опыта Майкельсона.

Наконец, третий верный способ заключается в том, что отрезок s делят на относительную длину волны $\lambda_n = \frac{2\pi s}{v_n}$. Тогда выражение $2\pi s \left(\frac{1}{\lambda_r} + \frac{1}{\lambda'_r} \right) = v_r s \left(\frac{1}{c_r} + \frac{1}{c'_r} \right)$ дает непосредственно разность фаз в нулевой точке. Так как v_r при отражении не меняется, λ_r меняется пропорционально c_r .

Будде берет четвертый способ. Он делит каждый абсолютный путь луча l_n на соответствующую длину волны $\lambda_n = \frac{2\pi s}{v_n}$. Сумма этих отношений и должна дать

изменение фазы волны при прохождении туда и обратно в нулевой точке, причем v_n и λ_n меняются по принципу Допплера. Но эта сумма не связана с разностью фаз; утверждение Будде о том, что $l_n/\lambda_n = t_n/\tau_n$ верно, но в данном случае каждый интервал времени t_n нужно делить не на относящийся к нему период τ_n , а на конечный период τ или τ_r (различие между τ и τ_r в опытах второго порядка не сказывается).

Будде обосновал свой метод расчета схемой, в которой было указано расположение двух цугов волн, исходящих из одной точки, проходящих разные абсолютные пути и после некоторых изменений длины волны встречающихся в одной точке. Поэтому он делит l_n/λ_n и находит сумму. Если один цуг, например, содержит 166 волн, а другой 166,5, то разность фаз равна π . Но его чертеж может дать лишь пространственное распределение колебаний в один определенный момент, а не периодические явления, происходящие в одной точке, которые и необходимо рассчитать. Кроме того, абсолютный ход луча смещается вместе с прибором. Правильная интерпретация

чертежа состоит в том, чтобы пути рассматривать как относительные, но в этом случае каждый отрезок s нужно делить на λ_r и затем складывать. Этот способ дает тот же результат, что и при делении t_n на τ или τ_r , а не на τ_n .

Кроме того, Лауэ обратил внимание, что полученная Будде формула для отношения длин волн до и после отражения от движущегося зеркала $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 1 - 2\frac{v}{c} \cos \alpha \cos \varphi +$

$+ 2\frac{v^2}{c^2} \cos^2 \varphi$ (α — угол падения, φ — угол между скоростью

v и нормалью к зеркалу) в членах второго порядка отличается от верной формулы Абрагама даже для угла $\alpha = 45^\circ$. А справедливость формулы Абрагама, полученной на основе дорелятивистских представлений без применения теории относительности, подтверждается и в теории относительности.

Третье возражение связано с тем, что Будде просмотрел некоторые важные детали устройства интерферометра. Из приведенного в его статье чертежа видно, что обе поверхности разделительной плоскопараллельной пластинки отражают одинаково. Поэтому, по Будде, в конце лучи идут параллельно на некотором расстоянии. Но на самом деле только одна поверхность сильно отражает, причем эта поверхность посеребрена так, чтобы интенсивность отраженного и проходящего лучей была примерно одинакова. Причина некоторого несовпадения лучей в конце пути состоит не в этом, а в том, что зеркала не строго перпендикулярны и наблюдаются полосы равной толщины. Отражение на второй поверхности незначительно. Это необходимо было для того, чтобы сделать незаметными появляющиеся на самой пластинке полосы равного наклона. При таком устройстве пластинки один луч пробегает пластинку после разделения дважды, а второй — ни разу. Образованная этим разность фаз устраняется введением компенсационной пластинки той же толщины. Это обстоятельство полностью снимает и третье возражение Будде. При этом Лауэ выясняет одну весьма принципиальную особенность. Будде принимает, что показатель преломления стекла равен отношению скорости света в вакууме к скорости света в стекле, даже если последнее находится в движении, и считает, что относительная скорость света в стекле равна $2/3 (c - v)$, так

как $n = 3/2$. Но Лауэ показывает, что это верно только для покоящихся тел.

Повторение классического варианта опыта. Перейдем теперь к третьему этапу (1921—1930). Хотя вопросу об «эфирном ветре» в этот период было посвящено около 150 работ, с теоретической точки зрения они особенного интереса не представляют, так как почти все были сосредоточены на обсуждении положительных результатов опытов Миллера, достоверность которых весьма спорна. Это было показано и в ходе дискуссий в 1925—1927 гг. и в последнее время в обстоятельном анализе, сделанном группой сотрудников технологического института в Кливленде (Case Institut of Technology) [16], где проводились опыты самим Миллером.

В феврале 1921 г. прибор, которым пользовались Морли и Миллер в 1905 г., был установлен на Маунт-Вильсон. Первые измерения, проведенные в марте-апреле, дали смещения порядка 0,04 ширины полосы, что соответствовало эфирному ветру со скоростью 10 км/сек. [17]. Возникло подозрение, что смещения вызваны изменением температуры и магнитострикцией в стальном основании вследствие вращения в магнитном поле Земли. Поэтому кожух прибора был покрыт пробковой защитой, а стальное основание заменено бетонным. Опыты в декабре не дали надежных результатов, и Миллер отметил в записной книжке: «Все эффекты, очевидно, вызваны прибором. Это конец!». Установка была разобрана и перенесена в Кливленд.

Первые сообщения Миллера не вызвали особых откликов. Утверждения о том, что они опровергают теорию относительности, появились лишь в малораспространенных журналах. К тому же было показано, что обнаруженный эффект мог быть вызван изменением температуры в 0,001—0,01°.

В 1922 и 1923 гг. измерения проводились в Кливленде и отклонений, превышающих 0,01 полосы, не наблюдалось. В 1924 г. прибор был возвращен на Маунт-Вильсон, где опять наблюдались периодические смещения порядка 0,04 полосы. Все эти годы Миллер ничего не публиковал, и лишь в 1925 г. появился обзор опытов последних лет [18]. Основной вывод формулировался следующим образом: «Существует определенное смещение интерференционных полос, такое, какое было бы вызвано

относительным движением Земли и эфира на Маунт-Вильсон со скоростью примерно 10 км/сек., т. е. около одной трети орбитальной скорости Земли. При сравнении этого результата с прежними наблюдениями в Кливленде напрашивается мысль о частичном увлечении эфира, которое уменьшается с высотой. Думается, что пересмотр кливлендских наблюдений с этой точки зрения должен показать, что они находятся в согласии с подобными предложениями, и привести к заключению, что опыт Майкельсона — Морли не должен давать нулевого результата в точном смысле слова и, по всей вероятности, никогда такого результата не давал». Толкование положительных результатов как следствие неполного увлечения эфира приводило к признанию зависимости эффекта от высоты, т. е. наличию вертикального градиента скорости [19].

Сообщение Миллера об опытах 1925 г. ознаменовало начало настоящей борьбы вокруг основ теории относительности, тем более что по времени оно совпало с обсуждением ряда вопросов, по которым существовали разногласия: независимости скорости света от движения источника, отклонения светового луча в поле тяготения, абберации света.

В 1926 г. Миллер опубликовал новые данные [19], в определенной степени противоречащие старым (в частности, отрицалась зависимость эффекта от высоты). Из новых работ можно было якобы сделать вывод, что эффект всегда наблюдается в северо-западном направлении, что соответствует движению солнечной системы к апексу в созвездии Дракона (прямое восхождение 262° , склонение $+65^\circ$), причем, так как орбитальная скорость Земли (30 км/сек.) не сказывается при чувствительности установки до 1,5 км/час, приходилось допускать, что скорость движения солнечной системы порядка 200 км/сек. В 1927 г. Миллер подтвердил свои выводы. В книге «Экспериментальные основания теории относительности» С. И. Вавилов писал: «Толкование Миллера не согласуется с его наблюдениями, которые остаются голым фактом, требующим объяснения... Исследования Миллера ясно обнаружили гипертрофию интерферометра Морли — Миллера. Этот прибор слишком чувствителен ко всяким ничтожным внешним причинам...» Результаты опытов Миллера нужно было проверить и экспериментально.

Еще в 1922 г. Кеннеди предложил некоторые видоизменения в установке Майкельсона, которые удалось осуществить в 1926 г. [20]. Отметив недостатки установки Миллера и неоднозначность его данных, он подчеркнул чрезвычайную подверженность результатов влиянию температуры. Поэтому Кеннеди сокращает длину оптического пути до 4 м, причем вся оптическая часть была покрыта непроницаемым для воздуха металлическим кожухом, наполненным гелием. Так как показатель преломления гелия значительно меньше, чем воздуха, то влияние температуры и давления уменьшается. Но тогда нужно было чем-то компенсировать снижение чувствительности установки. Это достигалось, во-первых, применением монохроматического и поляризованного света, что улучшало видимость полос, но главным образом введением ступенчатого зеркала, у которого одна половина выступает над второй на небольшую часть длины волны. Вследствие этого в трубе интерферометра поле видимости разделено на две половины, и в каждой видна система полос, причем в общем случае они имеют разную интенсивность. Если добиваться одинаковой интенсивности при определенном положении полос, то сдвиг полос приводит к нарушению равенства интенсивностей, что легко наблюдать. Теоретически можно было бы наблюдать разность хода порядка $5 \cdot 10^{-5} \lambda$, но практически порядка $10^{-3} \lambda$. Повышение чувствительности регистрирующего прибора вполне компенсировало уменьшение величины самого ожидаемого эффекта. Однако опыты Кеннеди, проведенные в лаборатории Милликена в Пассадене и на Маунт-Вильсон, при ожидаемом смещении 0,07 полос дали только 0,001, т. е. скорость эфирного ветра не превышала 2 км/сек. При этом они проводились в моменты, когда, по Миллеру, эффект должен был быть максимальным. В 1927 г. с установкой Кеннеди, усовершенствованной так, что она позволяла обнаружить эфирный ветер скорости порядка 1 км/сек, проделал серию опытов Иллингворт [21], но результат снова был отрицательным.

Ряд остроумных и смелых опытов осуществили бельгийцы Пикар и Стаэль. Чтобы окончательно рассеять иллюзии о возможном существовании ветра в свободном эфире, они подняли на воздушном шаре небольшой интерферометр Майкельсона с длиной оптического пути 280 см, помещенный в термостат. Весь шар медленно

вращался двумя моторами. Автоматическая регистрация смещений на движущуюся фотопленку позволяла провести измерения с точностью до тысячных долей ширины полосы. На высоте 2500 м смещения составили не более $\frac{1}{28}$ вычисленных, т. е. эфирный ветер не превышал 9 км/сек. Заметных смещений не было и на высоте 4500 м.

Чтобы проверить точность установки, Пикар и Стаэль повторили свои опыты в земных условиях, в Брюсселе и на горе Риги в Швейцарии. Результат — эфирный ветер меньше 2,5 км/сек. Отвечая противникам теории относительности, они в одной из своих статей не без сарказма писали, что «во всяком случае над Брюсселем эфирного ветра нет». Последние свои результаты бельгийцы опубликовали в 1928—1929 гг. [22].

Наконец, в 1930 г. в Германии опыт Майкельсона был повторен Иоосом [23]. Построенный фирмой Цейс интерферометр позволял измерить скорость эфира 1,5 км/сек, но даже столь малая скорость не была обнаружена.

Несколько особняком стоят опыты, выполненные в 1926—1929 гг. самим Майкельсоном в сотрудничестве с Пизом и Пирсоном [24]. Их целью была проверка высказанного Штрембергом и использованного Миллером положения о том, что солнечная система движется к точке в созвездии Дракона со скоростью 200—300 км/сек. Точность этих опытов была несколько меньше, но они показали, что смещения в 15 раз меньше того значения, которое должно было наблюдаться при движении Земли в эфире с указанной скоростью.

Здесь нет необходимости разбирать многочисленные работы этого периода, направленные против теории относительности, авторы которых любыми путями стремились сохранить старые представления. Все эти работы не сыграли никакой роли в науке. Для обсуждения положения, создавшегося в физике в связи с положительными результатами опытов Миллера, 4 и 5 февраля 1927 г. в обсерватории Маунт-Вильсон была созвана конференция, в которой принимали участие Майкельсон, Лоренц, Миллер, Кеннеди, Хедрик, Эпштейн, Штремберг, Бейтмен и др. [25].

В своем докладе Майкельсон, кратко остановившись на истории своих опытов, подчеркнул, что они не могут быть согласованы с результатами Миллера. По его мне-

нию, последние не имеют ничего общего с эфирным ветром и в крайнем случае могут свидетельствовать только о движении солнечной системы в целом. Опыты Кеннеди внушают больше доверия. Его поддержал Лоренц, который отметил, что согласно теории относительности эффект Миллера вообще не может быть объяснен наличием какого-либо движения в эфире. Он отметил большую ценность опытов Кеннеди, а также Пикара и Стаэля. В этом же смысле выступали Кеннеди и Эпштейн.

В выступлении Миллера положительный эффект объяснялся движением солнечной системы в целом. Основные доводы противников теории относительности были подытожены Хедриком. Дав краткий обзор работ, в которых приводятся возражения против общепринятой теории, он ссылается на теории Хикса и Риги. Хедрик дал свое доказательство формулы Риги, принятие которой приводит к тому, что опыт Майкельсона перестает быть решающим между классической и релятивистской теориями. Вместе с тем Хедрик пытался приспособить к этой формуле результаты Миллера.

Возражая Хедрику, Лоренц отметил, что на недочеты теории Риги указывалось еще раньше. В частности, было показано, что если точно вести расчеты, даже исходя из теории Риги, то результаты получаются совпадающими с формулами теории относительности. Таким образом, конференция на Маунт-Вильсон еще раз выявила два сложившихся к этому времени в науке основных направления в толковании результатов опытов Майкельсона и Миллера. Сторонники теории относительности (Лоренц, Кеннеди, Эпштейн) считали, что теория относительности достаточно обоснована экспериментально всеми приведенными опытами, а результаты Миллера обусловлены побочными причинами. Противники теории относительности (Миллер, Хедрик) хоть и неявно, но высказывались против этого, считая опыты Майкельсона недоказательными. Сам Майкельсон, хотя и говорил, что ему трудно отойти от теории эфира в смысле Стокса — Планка, признавал, что в результате проведенных опытов она уже отставлена. Материалы конференции появились в печати в 1928 г. и способствовали укреплению теории относительности. Правда, неудачные попытки примирения результатов Майкельсона и Миллера были и позже, но они имели мало успеха.

К 1930 г. интерес к опытам Миллера резко снизился, ибо стало ясно, что причину надо искать в неучтенных возмущениях. К тому же общие успехи теории относительности показали, что фундамент этой теории уже не зависит от опытов. Как отметил Свэн [26], ядро специальной теории относительности — инвариантность уравнений электродинамики к преобразованиям Лоренца — не имеет ничего общего с вопросом о том, приведут ли опыты с эфирным ветром к положительному результату или нет. Этим фактически подтвердился приведенный нами ранее тезис Эйнштейна, что опыты Майкельсона сами по себе не могли привести к теории относительности. Многочисленные дискуссии показали, что нельзя говорить об этом опыте, как о решающем для судеб релятивизма.

После 1930 г. опыт Майкельсона, во всяком случае в его первоначальных вариантах, уже не повторялся. Основной интерес сместился уже в сторону других явлений, позволяющих экспериментально подтвердить справедливость специальной теорией относительности: тонкая структура спектральных линий, эффект Комптона, время жизни мезонов, эффект Допплера второго порядка, ускорение элементарных частиц, ядерные реакции. Хотя отдельные рецидивы антирелятивизма, связанные с попытками опровержения доказательной силы опытов майкельсоновского типа, еще встречались, но использовавшаяся аргументация была и не оригинальной, и не новой, поэтому эти работы не привлекли к себе особого внимания.

Современные аналоги опыта Майкельсона. Лишь после двадцати с лишним лет затишья физики вернулись к проведению опытов, являющихся аналогом опыта Майкельсона, но построенных на совершенно другой основе.

В 1954 г. Ферт Литман предложил повторить опыт типа майкельсоновского со стоячими электромагнитными волнами. Полый резонатор длины l (в виде трубки с двумя идеально отражающими торцами) питается микроволновым генератором. Обозначив собственную частоту резонатора ν и период T , получим условие резонанса $nc/\nu = 2l$ (в отсутствие эфирного ветра), откуда $\nu = \frac{nc}{2l}$.

По классической теории время прохождения волн вдоль трубки будет $l/c - v$, а обратно — $l/c + v$. Тогда ус-

ловие резонанса $nT_1 = \frac{2lc}{c^2 - v^2}$ и $v_1 = v \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$. Если трубка перпендикулярна скорости Земли, то условие резонанса $nT_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}}$ и $v_2 = v \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Таким образом, при повороте резонатора на 90° (генератор остается в неизменном положении) собственная частота должна меняться в $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ раз. Эссен указал, что при расче-

те резонансной частоты необходимо учитывать ее зависимость не только от длины трубки, но и от поперечного сечения. Хотя в принципе предлагаемая схема, учитывая существующие в настоящее время способы измерения, может дать большую точность, чем предыдущие оптические опыты, однако недостаточная острота резонансной кривой практически снижает точность до ранее достигнутой. Более обещающим является включение резонатора в качестве стабилизатора в схему самого генератора. Тогда появилась бы возможность сравнивать его частоту с частотой стандартного кварцевого генератора с точностью до 10^{-8} , в то время как ожидаемое смещение порядка $5 \cdot 10^{-7}$; хотя на точность измерения могут влиять отклонения в условиях в цепи и наиболее сильно — механические вибрации при вращении резонатора, авторы надеялись улучшить точность в 10 раз.

Опыт был осуществлен Эсеном в 1955 г. в национальной физической лаборатории в Теддингтоне (Англия). Цилиндрический резонатор длиной 16,866 см и диаметром 8,075 см, настроенный на частоту 9200 мгц, вращался в горизонтальной плоскости со скоростью 1 об/мин. При вращении на 360° частота должна была меняться непрерывно, проходя дважды через минимум и дважды через максимум. Специально исследовалось влияние магнито-стрикции, и принимались меры для устранения влияния температуры. Несмотря на некоторую вибрацию шестерен и неравномерное ускорение вращения, Эссен считает, что при эффекте смещения $3 \cdot 10^{-9}$ собственной частоты ему удалось доказать, что если эфирный ветер и существует, то он составляет не более 0,008 орбитальной скорости Земли (0,24 км/сек) [27].

Другие новые технические возможности повышения

точности опытов типа Майкельсона — Морли появились благодаря высокой стабильности частоты квантовых генераторов. Мёллер [28] впервые обратил внимание на возможность использования мазеров, работающих на пучке молекул аммиака. Пусть два таких генератора расположены на вращающейся рейке таким образом, чтобы их резонаторы были горизонтальны, а возбужденные молекулы аммиака двигались бы навстречу друг другу с тепловыми скоростями.

Частоты излучения с учетом доплеровского смещения могут быть выражены, по теории неподвижного эфира, формулой

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

где $\vec{e}$ — единичный вектор в направлении излучения, $\vec{u}$ — скорость молекул, $\vec{v}$ — скорость установки в эфире, ν_0 — частота при $v=0$. Так как молекула движется перпендикулярно направлению своего излучения, т. е. $\vec{e} \perp \vec{u}$, в вышеприведенной формуле члены, содержащие $(\vec{e} \vec{u})$, равны нулю и получаем

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{\vec{v} \vec{u}}{c^2} \right). \quad (\text{A})$$

Поскольку молекулы в обоих генераторах движутся навстречу друг другу, второй член войдет с разными знаками и относительное смещение частот будет

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = 2 \frac{\vec{v} \vec{u}}{c^2}.$$

При повороте всей установки на 180° эффект удваивается. Для $u=0,6$ км/сек., $\nu=2,4 \cdot 10^{10}$ и $v=30$ км/сек., $\Delta \nu/\nu=8 \cdot 10^{-10}$, смещение частоты $\Delta \nu=20$ гц.

В проведенных в 1958 г. опытах Таунса и его сотрудников [29] первоначальная разница в частотах мазеров (частота биений) была установлена в несколько десятков герц, причем оси мазеров были ориентированы в направлении запад — восток. После одной минуты непрерывных измерений установка поворачивалась на 180° , и в новом положении частота биений вновь регистрировалась.

В течение 20 мин. проводилось 16 подобных измерений; такая процедура повторялась ежедневно на протяжении 12 час., за которые Земля поворачивалась на 180° . Первая серия опытов, выполненных в будний день, дала изменение измеряемого эффекта около $1/20$ гц за сутки. Вторая, выполненная в субботу, когда местные помехи незначительны, — $1/50$ гц, причем они никак не были связаны с ориентацией установки. Точность измерений соответствовала относительной стабильности генераторов 10^{-12} за минуту.

Таким образом, эффект оказался в 1000 раз меньше искомого, т. е. скорость «эфирного ветра» не превышает $1/30$ км/сек. Важно отметить, что эксперименты указанного типа с молекулярными генераторами первого порядка относительно v/c (хотя в формулу входит $1/c^2$), а излучаемая частота независима от длины резонатора.

Таунсом был предложен еще один аналог опыта Майкельсона — Морли с использованием лазеров. Опыт был осуществлен под его руководством группой физиков Масачузетского технологического института в 1964 г. [30].

Частота излучения лазера с плоско-параллельными резонаторами определяется формулой

$$\nu = \frac{\nu_m Q_m + \nu_c Q_c}{Q_m + Q_c},$$

где ν_m — частота перехода, ν_c — резонансная частота резонатора, $Q_m = \frac{\nu_m}{2\Delta\nu_m}$, $Q_c = \frac{\nu_c}{2\Delta\nu_c}$, $\Delta\nu_m$ — полуширина ли-

нии излучающего вещества при половинной мощности, $\Delta\nu_c$ — полуширина линии резонатора при тех же условиях. Если $Q_m \ll Q_c$, частота ν будет определяться в основном частотой перехода ν_m ; если $Q_m \ll Q_c$ — частотой резонатора ν_c . В последнем случае

$$\nu \approx \nu_c = \frac{nc}{2L};$$

здесь n — целое число, L — расстояние между пластинками резонатора. При оси резонатора лазера, параллельной скорости эфира, частота лазера

$$\nu'_c = \frac{nc}{2L} (1 - \beta^2),$$

при перпендикулярной

$$\nu_c'' = \frac{nc}{2L} (1 - \beta^2)^{1/2};$$

относительная разность частот

$$\frac{\nu_c'' - \nu_c'}{\nu_c} = \frac{1}{2} \beta^2.$$

При повороте всей установки на 90° разность удваивается и будет составлять β^2 . При $v=30$ км/сек и $\nu_c = 3 \cdot 10^{14}$ гц. $\Delta\nu$ будет порядка $3 \cdot 10^6$ гц, что легко наблюдать. На точность эксперимента будут влиять сдвиг частот из-за спонтанного излучения и изменения L из-за тепловых флуктуаций. Важно изолировать установку от всех возможных механических вибраций.

Экспериментальная установка (рис. 24) состояла из двух газовых лазеров (He—Ne), расположенных перпендикулярно. Полупосеребренная разделительная пластинка направляла оба луча на фотоумножитель, после чего биения регистрировались непрерывно. Влияние механических вибраций устранялось сложной системой подвески оборудования. Вся платформа с оборудованием подвешивалась четырьмя резиновыми канатами к металличе-

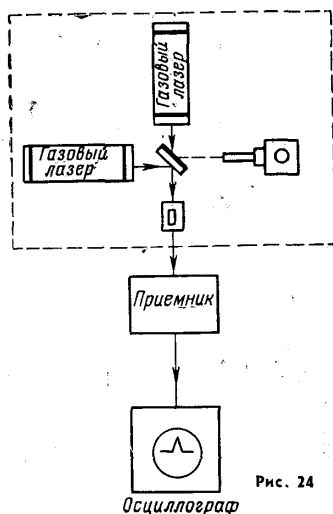


Рис. 24

ческой пластинке, которая в свою очередь висела на бериллиево-медной проволоке, укрепленной к балке. Этим достигалась почти полная механическая изоляция установки от здания, и воздушные акустические волны уже сказывались сильнее.

Вся установка вращалась мягким резиновым приводом на 90° примерно за 20 сек. Влияние местных помех (например, магнито-стрикции) исключалось проведением опытов в разное время суток. Записи проводились несколько минут через каждые полчаса в

течение примерно 6 час. После тщательной обработки всех данных оказалось, что полученное смещение частот составляет $3 \cdot 10^3$ гц, т. е. только $1/1000$ смещения, соответствующего скорости «эфирного ветра» при орбитальном движении Земли.

Другая схема обнаружения «эфирного ветра» с помощью молекулярных квантовых генераторов была предложена в 1958 г. Г. М. Страховским [31]. Основная идея состоит в измерении разности фаз колебаний двух несинхронизированных молекулярных генераторов, удаленных на расстоянии L , порядка нескольких метров. Разность фаз генераторов $\varphi = 2\pi \frac{L}{\lambda}$. При повороте всей установки на 180° эта разность фаз по теории относительности не должна меняться, а по классической теории $\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = 2\beta$. При $\lambda = 1,25$ см, $L = 12,5$ м, $\beta = 10^{-4}$, $\Delta\varphi = 0,4$ п. При стабильности частоты 10^{-12} и времени поворота около 10 сек. эффект вполне наблюдаем. Этот опыт первого порядка относительно v/c , причем в знаменателе скорость света фигурирует в первой степени.

За последние годы был предложен ряд новых вариантов использования квантовых генераторов в опытах первого и второго порядка [32], но, по-видимому, в их проведении нет уже особой необходимости, поскольку в них скорее всего не удастся превзойти ту точность, которая была достигнута в опытах с использованием эффекта Мессбауэра.

Если возбужденное атомное ядро испускает γ -квант, оно испытывает отдачу, вследствие чего энергия кванта несколько отличается от энергии, соответствующей разности энергетических уровней ядра, что препятствует резонансному поглощению испускаемых квантов другими ядрами этого же элемента. В 1958 г. немецкий физик Мессбауэр обнаружил, что в некоторых случаях, когда атомы входят в состав кристаллической решетки твердого тела, импульс отдачи распределяется по всей решетке как целого, а поскольку ее масса очень большая, энергия отдачи незначительна и частота кванта равна частоте перехода и становится возможным резонансное поглощение.

Так как линии, соответствующие этим ядерным переходам, могут быть очень узки, эффект Мессбауэра

позволяет с большой точностью измерить смещения частот, вызванные различными причинами¹.

В последние годы эффект Мессбауэра стал применяться для прецизионных измерений во многих областях физики. С его помощью, в частности, оказалось возможным измерить и ряд релятивистских эффектов (красное смещение спектральных линий, эффект Допплера второго порядка). В 1961 г. Чемпни и Мун проделали следующий опыт [33]. Источник γ -квантов (ядра Co^{57} , введенные в фольгу Fe^{56}) размещался на конце короткого стального цилиндра, который укреплялся на трубчатом роторе. На другом конце цилиндра помещался поглотитель (железная фольга, содержащая 2% Fe^{57}). Вся система вращалась внутри стеклянного сосуда, из которого был откачан воздух. Счетчик γ -излучения ставился за специальным окошком в сосуде. Было найдено, что интенсивность γ -лучей, регистрируемых при скорости вращения 600 об/сек, в среднем всего на $(0,8 \pm 2,0)$ больше, чем при скорости 100 об/сек, тогда как если бы скорость вращения меняла бы частоту излучения (относительное изменение $2\beta^2$), то при большей скорости вращения скорость счета γ -квантов должна была увеличиться на 9,4%, так как смещение ослабило бы поглощение и в счетчик попадало бы больше γ -квантов.

Непосредственной целью опыта была проверка релятивистской формулы для красного смещения в ускоренно-движущейся системе (см. стр. 135), т. е. формулы

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

где R_1 , R_2 — расстояния излучателя и поглотителя до центра, ω — угловая скорость. В условиях описываемого опыта $R_1 = R_2$, а значит, $\Delta\nu/\nu = 0$, что и было доказано. Но, как показал Меллер [34], эти опыты можно рассматривать как аналог майкельсоновского. Действительно, согласно теории относительности, воспринимаемая поглотителем частота $\nu = \nu_a$ (излучения), тогда как по теории неподвижного эфира ν_a определяется формулой (А) (стр. 106). В условиях опыта Чемпни и Муна угол между ско-

¹ Подробнее об эффекте Мессбауэра и его применениях см.: Г. Вертгейм. Эффект Мессбауэра. М., 1966.

ростями u и v во время вращения менялся от нуля до 360° , так что скалярное произведение (uv) , а вместе с ним и v_a постоянно меняются. Это изменение частоты должно нарушать резонансное поглощение, что было бы обнаружено счетчиком. Полученные данные свидетельствуют о том, что в опыте не обнаруживается движение установки, т. е. Земли, относительно эфира по крайней мере со скоростью больше 17 м/сек ($\sim 5,7 \cdot 10^{-4}$ орбитальной скорости Земли). Как отмечал Меллер, здесь существенно еще то обстоятельство, что отрицательный результат опыта Чемпни и Муна нельзя объяснить гипотезой сжатия, а следовательно, он противоречит теории Лоренца, даже дополненной этой гипотезой.

В 1963 г. Чемпни, Изаак и Кан повторили опыт уже со специальной целью обнаружения эфирного ветра [35]. Рассмотрим весь процесс с точки зрения волновой теории света, полагая эфир неподвижным. Пусть в момент $t_1=0$ источник Q испускает максимум (рис. 25);

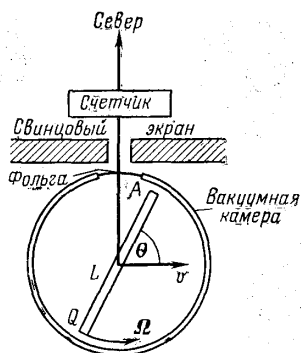


Рис. 25

второй максимум испускается через один период $T=1/v$ в момент $t_2=1/v$. Первый максимум достигнет поглотителя в момент $\tau_1 = \frac{l}{c - v \cos \theta}$, где l — длина стержня,

v — скорость эфирного ветра, θ — угол между направлением эфирного ветра и стержнем в момент излучения. За время T стержень поворачивается на угол $\Delta\theta = \omega T = \omega/v$ (ω — угловая скорость вращения стержня), так что второй максимум достигнет поглотитель в момент

$\tau_2 = \frac{l}{c - v \cos (\theta + \Delta\theta)}$. Период сигналов на поглотителе

$T_0 = \tau_2 - \tau_1$, откуда

$$T_a = \frac{1}{v_a} = \frac{l}{c - v \cos(\theta + \Delta\theta)} - \frac{l}{c - v \cos \theta},$$

что в первом приближении дает

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{l\omega}{c^2} v \sin \theta,$$

или, учитывая, что $l\omega = u$ есть линейная скорость, получаем при $\theta = 90^\circ$.

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

Центрифуга вращалась попеременно со скоростями 20 и 1230 об/сек. Никаких колебаний в числе квантов, регистрируемых счетчиком в течение суток, не было обнаружено, в том числе, когда направление наблюдения менялось на обратное. Отсюда с учетом высокой чувствительности установки был сделан вывод об отсутствии эфирного ветра со скоростью, превышающей 5 м/сек ($1,7 \cdot 10^{-5}$ орбитальной скорости Земли). Таким образом, за период с 1881 г. до настоящего времени предел скорости эфирного ветра был уменьшен в 2000 раз.

Что же доказывают результаты опыта Майкельсона? На этот вопрос разные авторы давали разные ответы. Обычно принято считать, что он показал отсутствие эфирного ветра, т. е. что не существует какой-то преимущественной системы отсчета, связанной с эфиром, и что принцип относительности справедлив и для оптических и вообще для электродинамических явлений. Другие подчеркивали главным образом, что фактически опыт Майкельсона доказывает изотропность пространства, т. е. равенство скоростей света по всем направлениям от источника (время, необходимое свету, чтобы пройти прямой и обратный путь вдоль покоящегося относительно Земли твердого стержня, не зависит от пространственной ориентации этого стержня). Существует и такая трактовка: опыт Майкельсона подтверждает существование в природе некоторой предельной скорости.

При этом, однако, надо иметь в виду, что трактовка результатов любого опыта существенно зависит от того,

какие теоретические представления лежат в основе используемых рассуждений. В зависимости от того, какие исходные положения считать заведомо верными, можно прийти к разным выводам относительно функции опытов Майкельсона в логической структуре кинематики той или иной теории, например специальной теории относительности. Наиболее интересной, на наш взгляд, представляется следующая постановка вопроса¹.

Ищутся формулы преобразования от неподвижной к движущейся равномерно системе отсчета, причем на эти преобразования накладываются только самые общие требования, не содержащие специальных постулатов. Получаются формулы, содержащие три неизвестных параметра, определение которых возможно по результатам экспериментов. Оказывается, что соответствующие математические выражения, полученные постулированием результатов трех опытов — Майкельсона — Морли, Кеннеди — Торндайк и Айвса — Стилуэлла, позволяют определить указанные параметры так, что искомые преобразования приобретают вид преобразований Лоренца. А это означает, что совокупность трех названных опытов составляет полную систему, обеспечивающую подтверждение специальной теории относительности.

Независимость скорости света от скорости источника

Баллистическая (эмиссионная) теория. Результаты опыта Майкельсона и его аналогов чаще всего трактовались как свидетельство отсутствия неподвижной системы отсчета (эфира), другими словами, как подтверждение принципа относительности, т. е. первого постулата специальной теории относительности. Не входя здесь в обсуждение споров вокруг правомерности такой интерпретации, вспомним, что результаты опытов типа майкельсоновского легко объяснялись и так называемой баллистической (эмиссионной) теорией. В основе этой теории, первый вариант которой был предложен швейцарским физиком Ритцем [1], лежало предположение о

¹ H. Robertson. Postulate versus observation in the special theory of relativity. «Rev. Mod. Phys.», 1949, 21, p. 378—382.

том, что движение источника оказывает влияние на скорость света, испущенного этим источником. Баллистическая теория была выдвинута, чтобы избежать такой ломки представлений, к которой с необходимостью приводило одновременное принятие обоих постулатов специальной теории относительности, т. е. принципа относительности и независимости скорости света от скорости источника. Если в теории Лоренца отказывались от первого, сохраняя второй, то в баллистической теории сохранялся принцип относительности, но отвергался постулат постоянства скорости света в любой инерциальной системе отсчета. Отрицание этого положения приводило не только к необходимости отказа от эфира как неподвижной среды, в которой распространяется свет, но и к вынужденному пересмотру уравнений Максвелла в пустоте. Баллистическая теория встретила трудности при объяснении ряда явлений: опытов типа Физо, эффекта Допплера, спектроскопически-двойных звезд и др. В поисках ответа на эти вопросы было разработано даже несколько вариантов баллистических теорий, отличающихся своими выводами относительно скорости света после отражения от движущегося зеркала. По Ритцу, свет после отражения распространяется так, будто он исходит из некоторого центра, движущегося со скоростью источника и в том же направлении; по Томсону и Стюарту [2], скорость света складывается со скоростью излучения реального источника, а по Толмэну [3] — со скоростью самого зеркала.

В беседе с Шенклендом Эйнштейн говорил, что он еще до 1905 г. размышлял о возможности баллистической теории, но отказался от этой мысли, так как не мог придумать дифференциальное уравнение, решение которого давало бы волны со скоростью, зависящей от движения источника.

И все же довольно длительное время баллистическая теория противопоставлялась теории относительности, ибо не требовала коренного пересмотра основных представлений о пространстве и времени (даже в наши дни иногда появляются отголоски прежних споров, о чем речь впереди). Баллистическая теория не сыграла особой роли в развитии современной физики, но дискуссии, развернувшиеся вокруг нее, выявили необходимость постановки прямых экспериментов по доказательству независимости

скорости света от скорости источника — второго постулата специальной теории относительности.

Но осуществить их было нелегко, ибо в опытах с замкнутыми путями света теории Лоренца, Ритца и Эйнштейна дают одинаковые результаты, если измерения проводить с точностью до величин первого порядка относительно v/c [4]. Значит, и в этом случае необходимо было достигнуть точности порядка $(v/c)^2 \approx 10^{-8}$. Еще в 1912 г. итальянский физик Ла Роза обратил внимание, что этому требованию удовлетворяет опыт, проведенный по схеме Майкельсона — Морли, но с источником света, движущимся относительно остальных частей установки с достаточно большой скоростью. Такими источниками могли быть Солнце, звезды и другие светящиеся небесные тела.

Опыт был осуществлен в 1923 г. Томашеком [5]. В его опыте поочередно наблюдалась интерференционная картина, полученная с помощью земного и внеземного (Солнце, Луна, Юпитер, Сириус, Арктур) источников. Никакой разницы при этом не наблюдалось. Наблюдавшиеся смещения полос составляли не более $1/8$ теоретически ожидаемых.

Другая возможность выбора между рассматриваемыми теориями основана на опытах первого порядка, но с разомкнутым путем света. Такой вариант можно было

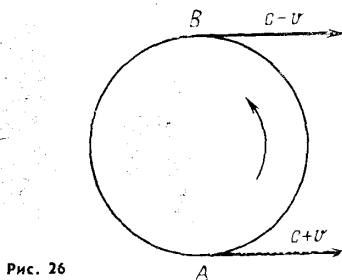


Рис. 26

осуществить при астрономических наблюдениях двойных звезд. Этот вопрос был детально рассмотрен голландским астрономом де Ситтером в 1913 г. [6]. Основная идея заключается в следующем (рис. 26). Если верна теория Ритца, то свет, идущий от звезды, находящейся в положении А (т. е. приближающейся к Земле), приходит на

Землю через время $L/c+v$ после излучения, а из положения B (т. е. удаляющейся от Земли) — через время $L/c-v$ (L — расстояние до Земли). Если обозначить T период полуобращения, то на Земле интервал между двумя наблюдениями будет $T + \frac{2Lv}{c^2}$ при движении звезды от B к A и $T - \frac{2Lv}{c^2}$ при движении звезды от A к B .

При больших скоростях движения звезды оба слагаемых одного порядка, так что в видимом с Земли движении звезд должны были бы наблюдаться отклонения от законов Кеплера. Отсутствие таких наблюдаемых отклонений свидетельствовало против гипотезы о сложении скорости звезды со скоростью испускаемого ею света. Учитывая фактическую точность имевшихся астрономических наблюдений, де Ситтер показал, что если скорость света c' в системе наблюдателя представить суммой $c' = c + kv$, то можно утверждать, что $k < 0,02$ (по теориям Лоренца и Эйнштейна $k=0$, по Ритцу $k=1$). Все эти данные «позволяют почти с достоверностью считать правильным положение о постоянстве скорости, а теории истечения Ритца и других признать ведущими к непреодолимым затруднениям»¹.

Прямые экспериментальные подтверждения второго постулата теории относительности. И все же вопрос о прямой экспериментальной проверке независимости скорости света от скорости источника не был снят. Исторически первой попыткой в этом направлении был опыт Майораны [7]. С помощью интерферометра Майкельсона с неравными плечами измерялись смещения интерференционных полос при замене неподвижного источника движущимся. Если скорость света не зависит от скорости источника, то длина волны меняется согласно обычной формуле для эффекта Доплера и сдвиг Δ полос составит

$$\Delta = \frac{l}{\lambda} \cdot \frac{v}{c},$$

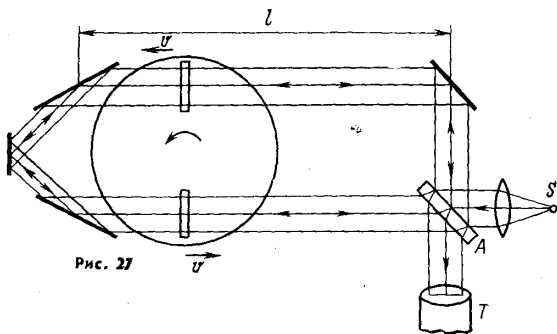
где l — разность хода обоих лучей, v — скорость источника. В качестве движущихся источников применялись ртутные дуговые лампы, прикрепленные к концу стерж-

¹ В. Паули. Теория относительности. М.—Л., 1947, стр. 18.

ня длиной 2 м, вращавшегося вокруг оси, проходящей через его центр. В опыте $v=79,77$ м/сек, $l=232$ мм, $\lambda=0,546$ мк, что дает $\Delta=1,113$ полосы. При изменении направления вращения смещение удвоится и $\Delta=2,226$ полосы. Опыт дал $\Delta=0,238$, что с точностью порядка 5% (по оценке Майораны) согласуется с расчетными данными. Недостатком схемы Майораны было использование на пути луча разделительной пластинки; это позволяло утверждать, что измеряется скорость света, испускаемого не источником, а пластинкой, которая не двигалась относительно трубы интерферометра.

В опыте М. А. Бонч-Бруевича измерялась разница времен прохождения определенного расстояния световыми лучами, исходящими от противоположных краев солнечного диска. Вследствие вращения Солнца разница скоростей обоих лучей согласно баллистической гипотезе должна была бы составлять 3,5 км/сек, что в условиях опыта соответствовало разности времен $75 \cdot 10^{-12}$ сек. Измерения после статистической обработки дали величину примерно в восемь раз меньшую. Окончательный результат сводился к тому, что вероятность справедливости постулата независимости скорости света в 10^{45} больше, чем баллистической гипотезы [8]. Но, как и в случае опыта Майораны, против доказательной силы опыта можно было высказать то возражение, что на пути лучей в установке использовались неподвижные зеркала, отражаясь от которых свет мог изменить свою скорость.

Новая волна опытов началась в 1962 г., после того как американский физик Кантор [9] опубликовал результаты опытов, якобы противоречащих теории относительности. Суть опыта заключается в следующем (рис. 27).



Свет от источника S расщепляется в полупрозрачной пластинке A на два пучка, проходящих через интерферометр в противоположных направлениях (с помощью соответствующим образом расположенных зеркал). На пути лучей размещаются две очень тонкие прозрачные пластинки, укрепленные на одном диаметре диска, причем часть светового пучка проходит через пластинки, а часть — над пластинками. При неподвижном диске в трубе T обе интерференционные картины соответствуют неподвижному источнику. При вращении диска (для скорости 61 об/сек линейная скорость центра пластинок равнялась 4690 см/сек) лучи, проходящие сквозь пластинки, дают интерференционную картину, соответствующую движущимся пластинкам, рассматриваемым, по замыслу Кантора, в качестве вторичных источников. Наблюдение велось в свете лампы, вспышки которой синхронизированы с моментами, когда окошки движутся вдоль и против луча. Пренебрегая ввиду малой толщины пластинок (тысячные доли дюйма) эффектом увлечения света движущимися телами, можно было ожидать следующие результаты: если скорость источника не оказывает влияния на скорость света, то никакого смещения между обеими картинами не должно быть; если же $c' = c \pm kv$ (v — линейная скорость пластинки), то возникнет смещение интерференционных полос, которое при справедливости гипотезы Ритца ($k=1$) должно равняться 0,74. Кантор получил значение 0,5, что соответствовало $k=2/3$. По мнению Кантора, этот результат опровергает теорию относительности, во всяком случае качественно.

Естественно, что этот результат вызвал сразу же множество откликов. Дальнейший ход событий напомнил ситуацию 20-х годов, наступившую после опубликования результатов Миллера. Противники теории относительности (не удивительно ли, что они сохранились после 50 лет блестящей истории этой теории?!) поспешили прямо или косвенно объявить о ниспровержении «кумира» [10], другие авторы пытались исправить расчеты Кантора так, чтобы согласовать его результаты со специальной [11] или общей теорией относительности [12]. А наиболее трезвые мыслители предложили повторить опыты и лишь затем делать какие-то выводы. И такие опыты были проделаны как со светом видимого спектра, так и с γ -излучением.

Оригинальная идея, лежащая в основе опытов Джемса и Стернберга [13]. Если, как полагал Кантор, $c' = c + kv$, т. е. вторичные источники передают часть своей скорости проходящему через них свету, то, поскольку при вращении различные точки пластинки имеют различную линейную скорость и свет вследствие этого становится неоднородным по скорости, фронт волны должен повернуться на некоторый угол $\theta = k\omega x/c$ (ω — угловая скорость диска, x — расстояние от диска до места наблюдения). В условиях опыта при $k=1$ $\theta=20''$, а при $k=2/3$ (число, полученное Кантором) $\theta=13,3''$. Хотя применявшийся телескоп позволял измерить углы порядка $0'',5$, никакого изгиба не было обнаружено, в полном соответствии с теорией относительности ($k=0$). С учетом ошибок измерения k во всяком случае меньше 0,025.

Ротц [14] вводил движущуюся равномерно стеклянную пластинку на пути одного из трех лучей в интерферометре Цернике. Хотя точность установки позволяла определить смещение полос порядка 0,005, никакого влияния движения стекла на скорость света не было обнаружено.

Весьма точными были опыты Бабкока и Бергмана [15], использовавших схему Кантора (рис. 28). Они ввели ряд усовершенствований: увеличили длину плеч интерферометра, меняли направление вращения диска, улучшили синхронизацию вспышек лампы с положением пластинок, уточнили способ измерения скорости пластинок.

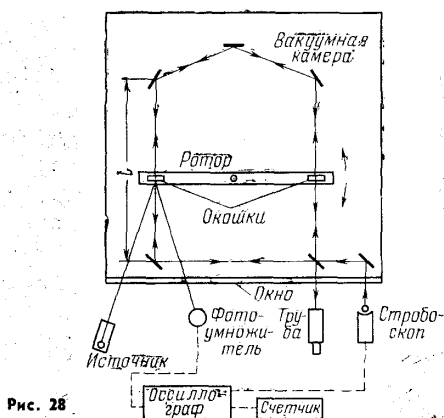


Рис. 28

Было учтено еще одно обстоятельство. Фокс [16] высказал предположение, что на результаты опыта может оказывать влияние среда, через которую проходят световые лучи (обычно воздух). По его мнению, фотоны поглощаются молекулами воздуха и вновь излучаются, но уже со скоростью c относительно воздуха, так что влияние скорости первичного источника исчезает. Во избежание подобных возражений вся оптическая часть установки была помещена в вакуумную камеру. При $k=1$ смещение должно было равняться 2,9; при $k=2/3$ $\Delta=1,9$. Опыт дал $\Delta=0,0120 \pm 0,006$; это означало, что $k < 0,006$. Подобные опыты проводились также с использованием лазеров [17], причем скорость пластинки доводилась до 63 м/сек, но результат оставался прежний: коэффициент k мало отличался от нуля. Для устранения возможности переизлучения света атомами среды был поставлен опыт [18] с отражением света от движущегося зеркала в условиях высокого вакуума (10^{-6} мм рт. ст.). Наконец, в специально поставленном опыте было показано, что положительные результаты Кантора могли быть обусловлены температурными эффектами [19].

К оптическим опытам нужно отнести и наблюдения Диккенса и Мейлина [20], пытавшихся найти зависимость скорости света от скорости источника по методу, предложенному Динглером. Он состоит в сравнении aberrации света, идущего от быстро разбегающихся внегалактических туманностей и от близких звезд, радиальная скорость которых относительно Солнца ничтожна. Наблюдения проводились одновременно 26-дюймовым рефрактором обсерватории Херстмонсо и 74-дюймовым рефлектором в Претории (Южная Африка). В обоих случаях разница в aberrации не превышала ошибок измерений; отсюда авторы пришли к выводу, что если красное смещение действительно обусловлено эффектом Допплера, а значит скорость разбегания туманностей порядка 20 000 км/сек, то их наблюдения отрицают зависимость скорости света от скорости источника.

Опыты с γ -квантами. Другой способ избежать возможное вмешательство молекул воздуха состоит в использовании вместо видимого света слабо поглощаемых жестких γ -квантов. Существующие экспериментальные методы ядерной физики позволяют провести подобные опыты с достаточной точностью. Источниками фотонов

большой энергии могут быть: γ -излучение возбужденных ядер, аннигиляция электронно-позитронной пары, распад π -мезонов и др. Все эти опыты проводились в 1963—1964 гг.

В эксперименте группы шведских физиков [21], проведенном в Нобелевском физическом институте, измерялось различие в скорости γ -квантов, испускаемых движущимися и покоящимися атомными ядрами. С этой целью мишень из углерода C^{12} и мишень из кислорода O^{16} бомбардировались α -частицами с энергией 14 Мэв, выходящими из циклотрона. В результате получались возбужденные ядра C^{12*} и O^{16*} с некоторой скоростью отдачи. Различие между ними заключается в том, что возбужденные ядра C^{12*} на уровне 4,43 Мэв обладают малым временем жизни (период полураспада $6,5 \cdot 10^{-14}$ сек.) и успевают излучить γ -квант до своей остановки, тогда как ядра O^{16*} на уровне 6,13 Мэв живут значительно дольше (период полураспада $1,2 \cdot 10^{-11}$ сек.) и излучают γ -квант уже после остановки. Измерения доплеровского смещения показали, что ядра C^{12*} в момент излучения обладали средней скоростью $v = (1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} c$, а ядра O^{16*} действительно покоились. Мишени располагались одна за другой на расстоянии 30 см друг от друга и их можно было менять местами. Первый, контрольный, приемник регистрировал разницу моментов пролета γ -квантов от обеих мишеней на расстоянии 1 м (примерно вдоль линии полета α -частиц), второй, основной, — на расстоянии 5 м. В первом положении α -частицы попадали сначала на углеродную мишень, во втором — на кислородную. Если скорость γ -квантов не зависит от скорости источника, то разница между моментами прибывания γ -квантов во второй приемник при двух положениях мишеней ($\tau_1 - \tau_2$) будет такой же, как на контрольном ($\Delta_1 - \Delta_2$), т. е. $\delta = (\tau_1 - \tau_2) - (\Delta_1 - \Delta_2) = 0$. Если же скорости источника v и γ -кванта складываются, то кванты, испускаемые ядрами углерода, пройдут путь S между приемниками быстрее, и разница при первом положении уменьшится:

$$\tau_1 = \Delta_1 - \left(\frac{S}{c+v} - \frac{S}{c} \right),$$

а при втором увеличится:

$$\tau_2 = \Delta_2 + \left(\frac{S}{c+v} - \frac{S}{c} \right).$$

Тогда

$$\begin{aligned}\delta &= (\tau_1 - \tau_2) - (\Delta_1 - \Delta_2) = -2 \left(\frac{S}{c+v} - \frac{S}{c} \right) = \\ &= \frac{2Sv}{c(c+v)} \approx \frac{2Sv}{c^2}.\end{aligned}$$

В условиях данного опыта

$$\delta = \frac{2 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^{-2}c}{3 \cdot 10^8 c} \approx 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ сек.}$$

Среднее значение, полученное при измерениях, было

$$\delta = (-0,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-9} \text{ сек.,}$$

что подтверждало справедливость второго постулата теории относительности.

Саде [22] измерял время пролета двух γ -квантов, получаемых в процессе аннигиляции летящего позитрона с электроном ($+e + -e \rightarrow 2\gamma$). Когда позитрон попадает в вещество, он тормозится и сталкивается с покоящимся электроном, образуя два γ -кванта. Этот процесс называется аннигиляцией. Если до аннигиляции позитрон успел остановиться, то полученные γ -кванты разлетаются в противоположные стороны, т. е. под углом 180° . Но часть позитронов успевает аннигилировать до торможения, тогда кванты разлетаются под определенным углом, зависящим от импульса позитрона. (Это можно выразить иначе: в системе центра масс позитрона и электрона кванты разлетаются под углом 180° , а в лабораторной системе отсчета — под меньшим углом, измеряемым импульсом позитрона.) В опыте Саде источником позитронов служил радиоактивный Si^{64} . Пучок позитронов направлялся на мишень из органического стекла, где происходила аннигиляция. Приемники располагались на одинаковых расстояниях (60 см) от мишени по направлениям, составлявшим угол в 20 и 135° с направлением полета позитронов, чем выделялись γ -кванты, возникшие при аннигиляции позитронов с определенной скоростью ($0,89 c$). При таких условиях скорость центра масс, т. е. источника γ -квантов, составляла примерно $0,6 c$. Специальная электронная схема позволяла измерить разницу во времени регистрации γ -квантов приемниками с точ-

ностью $0,2 \cdot 10^{-9}$ сек. Если второй постулат верен, то γ -кванты достигнут приемников одновременно; в противном случае к скорости c нужно прибавить проекцию скорости источника в направлении наблюдения, и тогда разность времен будет порядка $2 \cdot 10^{-9}$ сек. В пределах ошибок измерения никакой разницы не было зарегистрировано. Точность была порядка 10%.

Еще в 1961 г. Россер [23] предложил использовать γ -кванты, получаемые при распаде нейтральных π^0 -мезонов. Опыт был осуществлен на Женевском ускорителе протонов [24]. π^0 -Мезоны высокой энергии получались бомбардировкой бериллиевой мишени ускоренными протонами с импульсом около 19 Гэв/с. Получаемые при распаде $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ фотоны обладали энергией порядка 6 Гэв. Несмотря на большую скорость π^0 -мезонов — источника γ -квантов — было установлено, что коэффициент k в выражении $c' = c + kv$ не может быть больше $(-3 \pm 13) \cdot 10^{-5}$, другими словами, скорость источника не отражается на скорости испускаемых им фотонов. Несколько меньшая точность была получена в опыте Филиппаса и Фокса [25],

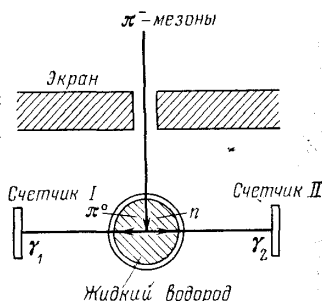


Рис. 29

где π^0 -мезоны получались бомбардировкой жидкого водорода пучком выходящих из циклотрона π^- -мезонов (рис. 29). При этом происходила реакция



(p — протон, n — нейтрон). Выделяемая в реакции энергия уносится мезоном и нейтроном, причем скорость мезона достигает $0,2 c$. Регистрировались распады, в которых один квант летит в направлении движения π^0 -мезона, а второй — в противоположном. Максимальная разность времени полета γ -квантов до счетчиков наблюдалась бы

при направлении разлета, указанном на рис. 29. В пределах точности, допускаемой использованными приборами (8%), не была обнаружена зависимость скорости γ -квантов от скорости источника.

Проведенный обзор позволяет утверждать, что второй постулат специальной теории относительности достаточно надежно обоснован экспериментально.

Эффект Допплера II порядка

Эффект Допплера в канальных лучах. Как уже было показано (стр. 44), релятивистское рассмотрение эффекта Допплера дает для частоты при наблюдении перпендикулярно направлению распространения луча величину

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (1)$$

Отмечаемое наблюдателем уменьшение частоты, излучаемой источником, движущимся перпендикулярно оси спектрального прибора, является непосредственным следствием релятивистского замедления часов. Если рассматривать движущийся атом, колеблющийся с собственной частотой ν_0 , как часы, то, поскольку в системе наблюдателя период колебания

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

частота $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$, или, разлагая в ряд и ограничиваясь членами второго порядка,

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

Таким образом, экспериментальное подтверждение существования отличного от нуля поперечного доплер-эффекта II порядка было бы одновременно подтверждением эйнштейновской формулы для замедления часов. На реальную возможность проведения подобных опытов со светом, излучаемым канальными лучами, указал Эйнштейн [1] после ознакомления с результатами исследований Штарка по доплер-эффекту в канальных лучах. Он обратил внимание на то обстоятельство, что в принципе

точность, достигаемая при измерениях в опытах с канальовыми лучами, вполне достаточна для обнаружения

$$\Delta\nu = \frac{\nu_0}{2} \beta^2,$$

но установка Штарка и его сотрудников, не будучи специально приспособленной для этой цели, не обладала точностью, необходимой для получения надежных результатов. Кроме того, трудность возникала при определении собственной частоты излучения ν_0 , но здесь на помощь могло прийти то обстоятельство, что в спектре излучения можно было достаточно явно выделить частоты, принадлежащие покоящимся излучателям (неподвижным часам), от частот, излучаемых движущимися ионами (т. е. движущимися часами).

В связи с этим заслуживает упоминания следующий исторический факт. В 1906 г. на 78-м собрании немецких естествоиспытателей в Штутгарте с докладом «Применение телеобъектива к эффекту Допплера в канальных лучах» [2] выступили Б. Штрассер и М. Вин. Целью их работы было определение скорости канальных частиц на отдельных участках разрядной трубки, что существенно для суждений о механизме явлений, происходящих в трубке. Используя идею, высказанную еще раньше Рау [3], они внесли в установку зеркало, позволившее обратить эффект. Выступая в дискуссии по этому докладу, тюрингенский физик Ганс обратил внимание, что, судя по фотографиям, представленным докладчиками, смещение линий, полученных при движении канальных частиц к спектрографу и от него, по величине одинаково. Но это не вытекает из теории а ргіогі. Строгая теория (имелась в виду нерелятивистская), развитая с учетом членов второго порядка, дает зависимость смещения не только от относительной скорости источника и наблюдателя, но и от абсолютной скорости каждого из них в эфире (см. стр. 42). Но эти скорости неизвестны, если неизвестна скорость установки (т. е. Земли) в эфире. Точные замеры спектрограмм могли бы выявить член второго порядка, и по разнице смещений можно было бы определить величину этой неизвестной скорости. Тут же Ганс говорил, что если теория относительности (которую он называет принципом относительности Лоренца, Эйнштейна и Планка) верна, то подобная постановка вопроса лишена смыс-

ла. Докладчики резонно ответили Гансу, что точность их опытов была недостаточна для обнаружения членов второго порядка относительно v/c .

Действительно, установка Штрассера и Вина не могла выявить квадратичный эффект, но, хотя теория относительности оказалась верной, постановка вопроса не была лишена смысла, поскольку именно из этой теории строго вытекает некоторая асимметрия в смещении частот, причем именно второго порядка. Запишем релятивистскую формулу эффекта Доплера для длины волны

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

При движении источника под углами $\varphi=0$ и $\varphi=\pi$ (противоположные направления) имеем соответственно

$$\lambda_1' = \lambda \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta} > \lambda \text{ и } \lambda_2' = \lambda \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1+\beta} < \lambda.$$

Если бы смещения λ_1' и λ_2' от λ были симметричны, т. е. $\lambda_1' - \lambda = \lambda - \lambda_2'$, то среднее положение для двух смещенных линий совпадало бы с положением несмещенной линии λ . Но простой расчет дает

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1' + \lambda_2'}{2} - \lambda = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta} + \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1+\beta} \right) - \lambda = \frac{\lambda\beta^2}{2}. \quad (2)$$

Отсюда видно, что теория относительности предсказывает несколько большее смещение в красную сторону, чем в фиолетовую, в отличие от классической теории, где

$$\lambda_1' = \lambda(1-\beta), \lambda_2' = \lambda(1+\beta) \text{ и } \Delta\lambda = \frac{\lambda_1' + \lambda_2'}{2} - \lambda = 0.$$

Дело обстоит таким образом, что на симметричные красное и фиолетовое смещения, обусловленные продольным эффектом Доплера, накладывается независимое от направления движения красное смещение второго порядка, обусловленное поперечным эффектом. Последний и вызывает асимметрию, которую необходимо было экспериментально обнаружить. Уже в начале века не представляло особых трудностей получение канальных частиц со скоростями порядка 10^7 — 10^8 см/сек, причем сложность измерения этих скоростей не могла быть серьезной по-

мехой для осуществления опытов. Существенно было другое. Наряду со смещением спектральной линии наблюдается ее расширение, вызванное распределением скорости частиц в значительном интервале. К тому же было практически очень трудно установить с достаточной точностью направление наблюдения под прямым углом к скорости движения каналовых частиц, а малейшее отклонение дает продольную компоненту, покрывающую искомый поперечный эффект. Таким образом, хотя исторически проблема оказалась связанной с доплеровским смещением, наблюдаемым на быстро движущихся каналовых частицах, работы Штарка и его последователей не наталкивали на идею решающего опыта для проверки формулы (1).

Хотя соответствующий эксперимент не удавалось поставить, возможность его осуществления живо обсуждалась. Так, Шульц в 1923 г. [4] предлагал найти тот угол φ_0 , при котором релятивистская теория предсказывала нулевой эффект вследствие компенсации продольного эффекта, благодаря которому при $\varphi=0$ происходит смещение в фиолетовую сторону, поперечным, для которого при $\varphi=\pi/2$ смещение происходит в красную сторону. Значит, в этом случае

$$\lambda' = \lambda \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta \cos \varphi_0} = \lambda, \quad \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta \cos \varphi_0} = 1$$

и

$$\cos \varphi_0 = \frac{1 - \sqrt{1-\beta^2}}{\beta}.$$

При $v=2 \cdot 10^8$ см/сек $\varphi_0=89^\circ 48' 33'', 14$. Но практического пути к осуществлению опыта Шульц не указал. Существенно было его замечание, что расчеты, проведенные на основании баллистической теории Ритца, приводят к другим результатам, а значит, опыт мог бы дать критерий для выбора между баллистической теорией и теорией относительности. В связи с этим интересно привести выдержку из письма 1908 г. самого Ритца известному немецкому физику-экспериментатору Пашену: «Я хочу предложить Вам задачу, имеющую большое значение для вопроса о принципе относительности, а следовательно, и для всей электродинамики. По теории относительности Лоренца — Эйнштейна длина волны, излучаемая движущимся атомом, должна меняться по принципу Доплера

не только в направлении движения; и при наблюдении перпендикулярно направлению скорости v должно существовать смещение к красному в отношении $\frac{\lambda}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 \dots$

Нельзя бы сделать так, чтобы дать точный ответ на вопрос о существовании эффекта? Если эффект существует, то покончено с нашим универсальным временем, с параллелограммом скоростей и всей кинематикой» [5].

Но даже такой искусный мастер эксперимента, как Пашен, не смог бы ответить на поставленный вопрос. В дальнейшем дель Лунго и Шерцер [6] своими расчетами вновь подтвердили принципиальную возможность обнаружить поперечный эффект с помощью каналовых лучей, а позже, после появления ускорителей элементарных частиц, Гюйе [7] предлагал использовать для этой цели свечение пучка положительных ионов, ускоренных в циклотроне.

Опыты Айвса — Стилуэлла. В 1937 г. с серией работ выступил Айвс [8]. С точки зрения электронной теории Лоренца он рассмотрел изменения, которые должны наблюдаться в излучении движущихся атомов по сравнению со спектром, полученным от покоящихся атомов, и наметил установку, с помощью которой можно было бы наблюдать эффекты второго порядка. Уже в следующем году им были опубликованы результаты первых опытов, выполненных совместно с Стилуэллом [9].

В основе установки Айвса лежала конструктивная идея Рау [10]. Последний ставил себе задачу обнаружить продольное доплеровское смещение в полосатом спектре, обусловленном излучением молекул. Трудность заключалась в том, что в полосе линии расположены столь тесно, что нельзя было с уверенностью распознать смещение. Требовалось либо значительно увеличить разрешающую способность спектрографа, либо найти новый метод выделения смещенных линий. Максимально достигнутая в это время разрешающая способность не решала задачу; тогда Рау предложил следующий способ выделения смещенных линий. Коллиматор спектрографа устанавливался перпендикулярно направлению движения каналовых частиц (рис. 30), так, чтобы ось трубки и щель были параллельны. Внутри разрядной трубки вносился цилиндрический стеклянный стержень A перпендикулярно световому лучу. В отсутствие стержня в спек-

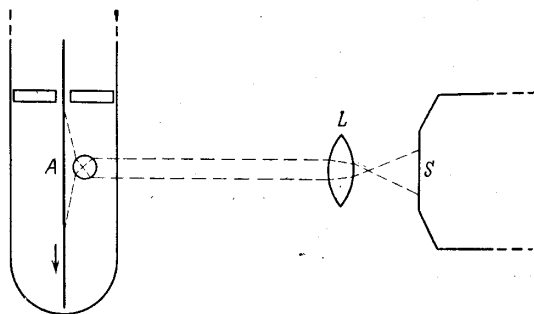


Рис. 30

трограф попадает свет, идущий перпендикулярно оси трубки, а потому не дающий смещения. При наличии стержня окажутся несмещенными те линии, которые образует свет, проходящий через центр стержня. Но в этом случае благодаря преломлению в стержне до спектрографа доходят и такие лучи, которые излучаются канальовыми частицами не перпендикулярно направлению их движения. Чем меньше угол между осью трубки и испускаемым световым лучом, а значит, тем больше продольное доплеровское смещение. Верхние лучи дают смещение в красную сторону (направление излучения совпадает с направлением движения канальных лучей), нижние — в фиолетовую сторону (направления противоположны). Поэтому в спектре смещенные линии окажутся наклонными по отношению к прямым несмещенным. По наклону смещенные линии теперь легко отличить от несмещенных.

Используя идею Рау и внося дополнительное вогнутое зеркало, позволившее видеть эффект второго порядка при прохождении света в противоположные стороны, Айвс смог впервые установить правильность предсказания Эйнштейна о существовании эффекта второго порядка.

Приведем основные детали расположения аппаратуры. В наполненной водородом трубке (рис. 31) между оксидной нитью *A* и алюминиевым электродом *B* происходит дуговой разряд при не очень высокой разности потенциалов (порядка 100 в). Ионизированные вылетающими из нити электронами молекулы водорода H_2 и H_3

через отверстия в электроде *B* попадают в ускоряющее поле между первым и вторым (*C*) электродами, разность потенциалов которых составляла несколько тысяч вольт. Давление поддерживалось низким, чтобы при прохождении ускоряющего поля ионы водорода не сталкивались между собой. Благодаря такому устройству удавалось

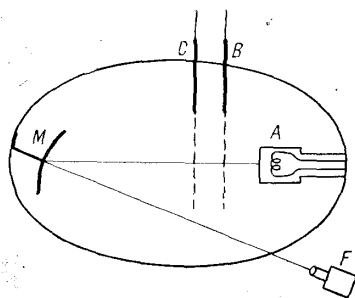


Рис. 31

получить весьма однородный по скорости поток каналовых частиц. При диссоциации ионов получались нейтральные атомы, излучение которых (линии серии Бальмера) и наблюдалось. Для измерений использовался спектрограф, изготовленный «чародеем физического эксперимента» знаменитым Робертом Вудом. Через систему отверстий во втором электроде, в точности повторяющей отверстия в первом, свет попадал на вогнутое зеркало *M* и, отразившись, на щель спектрографа, расположенную в центре кривизны зеркала. Направление наблюдения составляло с направлением движения частиц угол порядка 7° и совпадало с осью зеркала. Таким образом, на спектрограф попадало излучение, идущее как по направлению движения излучателей, так и против него, и появлялась возможность проверки формулы (2).

Промер полученных спектрограмм производился очень тщательно на компараторе Аббе, и авторы оценивали достигнутую ими точность в определении длины волны в $0,0025 \text{ \AA}$. Скорость частиц определялась как по приложенному напряжению, так и по продольному доплеровскому смещению. Поскольку оптический спектр каналовых лучей помимо линий, соответствующих атомам водорода, дает и множество линий молекулярного спектра, ускоряющий потенциал необходимо было подо-

брать так, чтобы смещенные линии попадали между полосами молекулярного спектра.

При напряжении 6788 в значение $\lambda\beta^2/2$, вычисленное по напряжению, должно было равняться 0,0116 Å, вычисленное по продольному смещению — 0,0109 Å; опыт дал 0,011 Å. При напряжении 11566 в соответственно получалось 0,0198; 0,0203; 0,0205. Таким образом, в пределах ошибок наблюдения опыт подтвердил релятивистскую формулу (2). Как это ни парадоксально, Айвс рассматривал теорию своего опыта в рамках классической электронной теории Лоренца (что для 1938 г., по выражению В. Л. Гинзбурга, было «полнейшим анахронизмом» [11]); последовательно релятивистскую трактовку этих опытов дал Джонс [12].

Анализируя достоинства и недостатки установки Айвса, Джонс отметил ряд возможных источников погрешностей. Положение основной линии, от которой измерялись смещения, предполагалось совершенно неизменным. Эта линия должна принадлежать атомам газа, возбужденным в трубке при столкновении с каналовыми частицами. Но при этом сами атомы могут иметь компоненту скорости вдоль направления распространения света, что вызовет доплеровское смещение. Поэтому Джонс считал, что для получения несмещенной линии необходимо использовать автономный источник.

На некоторые недостатки установки Айвса указал Оттинг [13]. Использование широкого недостаточно светосильного пучка каналовых частиц требовало продолжительного времени освещения, поскольку применялся дифракционный спектрограф, полученные спектрограммы не фотометрировались, и, наконец, применение вогнутого зеркала приводило к нелинейной зависимости от $\cos\varphi$, так как пучок имел конечную ширину.

Чтобы избежать этих ошибок, Оттинг воспользовался установкой, созданной Биллингом по идее Эйнштейна [14]. Светящийся каналовый луч находится в фокальной плоскости линзы L , которая направляет свет в интерферометр Фабри — Перо S_1S_2 , из которого свет идет в зрительную трубу F , установленную на бесконечность. Пусть светящаяся частица пробегает вдоль оси трубки K со скоростью v , испуская свет частоты ω . Зеркала интерферометра в начале параллельны и при однократном отражении удлиняют путь света на Δ . Длина пути света от

атома, находящегося в точке P_2 , до наблюдателя будет s , а длина пути света, испускаемого в точке P_1 , после прохождения интерферометра будет $s + \Delta$. Вследствие конечности скорости света наблюдатель в определенный момент t видит атом не в точке O , где он в этот момент находится, а в точках P_1 и P_2 , где он находился в моменты $t_1 = t - \frac{s + \Delta}{c}$ и $t_2 = t - \frac{s}{c}$. В фокальной

плоскости объектива возникают два изображения, V_1 и V_2 . Расстояние D между P_1 и P_2 равно $D = \frac{v\Delta}{c}$ види-

мое из линзы L под углом $\beta = \frac{v\Delta}{cf}$, где f — фокусное расстояние линзы. Разность фаз между колебаниями светового вектора в V_1 и V_2 $\varphi = \frac{\omega\Delta}{c}$. Если теперь наклонить

зеркало S_2 на угол $\beta/2$, то точка P_1 также отобразится в V_2 и изображения совпадут. Когда атом пробегает вдоль K , угол α , под которым плоские волны проходят интерферометр, меняется; поэтому меняется и разность хода $\Delta = \Delta_0 \cos \alpha$ и разность фаз $\varphi = \frac{\omega\Delta_0 \cos \alpha}{c}$. При интер-

ференции обоих лучей вдоль прямой Z появятся темные и светлые места. Если одну частицу заменить однородным по скорости пучком частиц, то максимумы и минимумы интерференционных картин для всех частиц совпадут и общее изображение канального луча будет изоборуждено интерференционными полосами. Поскольку интерференционные методы позволяют очень точно измерить длину волны, Оттинг внес в установку Биллинга дополнительное зеркало, позволившее вести наблюдения и при распространении света в обратном направлении, а значит, обнаружить асимметрию смещений, определяемую формулой (2). Кроме того, Оттинг воспользовался более интенсивной бальмеровской линией $H\alpha$, тогда как у Айвса промеривалось смещение линии H . При напряжении в трубке 11680 в вычисленное по формуле (2) смещение равнялось 0,027 Å, измеренное — 0,026 Å; при напряжении 13890 в соответственно 0,033 Å и 0,035 Å.

Вторая серия опытов, проведенных с более однородным по скорости пучком частиц, дала такие же результаты [15].

В 1941 г. Айвс и Стилзуэлл [16] видоизменили свою установку, чтобы получить большие скорости частиц без опасности разрушения трубки. Для этого они ввели в трубку несколько последовательных электродов, причем при общем напряжении более 40 000 в напряжение между соседними электродами было меньше критического для пробоя. Кроме того, специально исследовалось влияние тех факторов, на которые указывали Джонс и Оттинг. В 1962 г. Мандельберг и Уиттен [17] повторили опыт Айвса и Стилзуэлла с более современными средствами и использовали лучшую методику отработки данных измерений, но никаких принципиально новых решений не внесли. Использовался пучок атомов водорода, движущихся со скоростью $2,8 \cdot 10^8$ см/сек. Обработка результатов дала для показателя степени в релятивистском выражении $(1-\beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ величину — $(0,498 \pm 0,025)$. Если в опытах Айвса и Оттинга погрешность достигала 10—15%, то здесь она была значительно меньше.

Измерение поперечного доплер-эффекта с помощью эффекта Мессбауэра. Совершенно новые возможности проверки формулы поперечного доплеровского смещения, т. е. релятивистского замедления времени, появились после открытия эффекта Мессбауэра (см. стр. 109). Частота, испускаемая без отдачи ядрами Fe^{57} в металлическом железе, может быть определена столь точно, что возникла возможность провести измерения влияния гравитационного поля на частоту излучения. Однако в первых опытах, предпринятых Паундом и Ребкой, получались довольно значительные флуктуации результатов. Оказалось, что главный источник погрешностей был обусловлен неучтенной разностью температур между источником и поглотителем. На эффект температурной зависимости красного смещения частоты γ -излучения впервые указал Джозефсон [18]. При столь прецизионных измерениях даже весьма малая разность температур может оказать влияние. Действительно, благодаря тепловому движению атомов в твердом теле происходит доплеровское смещение частоты (учитывая члены первого и второго порядков):

$$\nu_0 - \nu = \nu_0 \left(\frac{v}{c} \cos \varphi + \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (3)$$

Поскольку при тепловом движении атомов частота изменения направления скорости порядка 10^{17} — 10^{18} , то за время жизни ядерного уровня в изотопах, используемых при опытах с эффектом Мессбауэра, это изменение происходит столь много раз, что среднее значение $v \cos \varphi$ будет равно нулю и линейный эффект Допплера скажется лишь в небольшом уширении линии. Тогда из (3) останется

$$\frac{\overline{\Delta v}}{v_0} = \frac{\overline{v^2}}{2c^2}, \quad (4)$$

где $\overline{v^2}$ —средняя квадратичная скорость ядер-излучателей. Наличие определяемого формулой (4) поперечного доплер-эффекта в прецизионных опытах должно учитываться. Обозначая U энергию решетки на единицу массы, имеем

$$\frac{m\overline{v^2}}{2} = \frac{1}{2} mU \quad \text{и} \quad \frac{\overline{\Delta v}}{v_0} = \frac{U}{2c^2}.$$

Изменение относительного смещения с температурой

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\overline{\Delta v}}{v} \right) = \frac{1}{2c^2} \cdot \frac{\partial U}{\partial T} = \frac{c_p}{2c^2}, \quad (5)$$

где c_p —теплоемкость при постоянном давлении. Значит, увеличение или уменьшение температуры меняет величину квадратичного доплеровского смещения. При высоте башни, где проводились опыты, в 22 м разница температур между верхней и нижней частью в 1°C приводит к смещению частоты γ -квантов примерно такого же порядка, как и гравитационное смещение.

Для проверки формулы (5) Паунд и Ребка [19] измеряли температурную зависимость энергии γ -квантов по поглощению излучения, испускаемого ядрами Co^{57} , поглотителем, обогащенным Fe^{57} . Небольшое смещение частоты, обусловленное различием температур излучателя и поглотителя, измерялось с помощью преобразователя,двигающего источник вперед и назад по отношению к поглотителю. Они писали: «Поскольку экспериментальные данные согласуются с расчетной кривой, то наш результат может рассматриваться как экспериментальное доказательство квадратичного эффекта Доппле-

ра с использованием теплового движения атомов, а не движения по кругу»¹. Подобные опыты, но с ядрами Sn^{119} , находящимися на метастабильном уровне, провели Бойл и др. [20] с тем же результатом.

Вторая группа опытов, также связанная с измерением гравитационного смещения с помощью эффекта Мессбауэра, основана на другом круге идей. Если источник и поглотитель разместить на диске, вращающемся с угловой скоростью ω , на расстояниях соответственно R_1 и R_2 , то гравитационное смещение вызывается уже не гравитационным полем, а эквивалентной ему ускоренно-движущейся системой. По Эйнштейну, в поле тяготения с потенциалом Φ относительное смещение

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

Эквивалентный потенциал для ускоренной системы будет $R\omega/2$, значит,

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{R_2^2 - R_1^2}{2c^2} \omega^2. \quad (6)$$

Если этот опыт рассматривать в системе отсчета, связанной с ускоренно-движущимся поглотителем, то имеем дело с «псевдогравитационным» смещением, т. е. с принципом эквивалентности и общей теорией относительности. Если же его рассматривать в инерциальной системе источника, то дело сводится просто к квадратичному доплер-эффекту. Действительно, если в формулу (1') подставить $v = \omega R$, получим

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{R^2 \omega^2}{c^2} \right) \text{ и } \frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{R_2^2 - R_1^2}{2c^2} \omega^2.$$

В опытах Хея и др. [21] измерялось смещение энергии γ -квантов, испускаемых ядрами Fe^{57} в ускоренной системе. Источник Co^{57} был нанесен на поверхность железного цилиндра с радиусом 0,8 см. К внутренней поверхности второго цилиндра радиусом 13,28 см, концентрич-

¹ Сборник «Эффект Мессбауэра». М., 1962, стр. 307.

ного первому, приклеивалась железная фольга, обогащенная Fe^{57} . Оба цилиндра жестко скреплялись, и вся система вращалась со скоростью 500 об/сек. Определялась зависимость числа квантов, испускаемых Fe^{57} после резонансного поглощения, от угловой скорости. Подтверждена с уверенностью порядка 95% формула (6).

В линейно ускоренной системе подобный опыт осуществил Беммель [22]. Источник и поглотитель, расположенные на расстоянии d друг от друга, одновременно движутся с ускорением a вдоль оси, проходящей через их центры. Роль разности потенциалов играет величина ad , поэтому

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{ad}{c^2}. \quad (7)$$

Для достижения необходимого ускорения источник и поглотитель закреплялись на синхронно-колеблющихся пьезоэлектрических вибраторах с частотой 10 Мгц. Обнаруженный сдвиг частот соответствовал теоретически ожидаемому.

Наиболее точные опыты этого типа принадлежат Кюндигу [23]. Источник Co^{57} , внедренный в железо, располагался в центре ротора, а поглотитель — железо, обогащенное изотопом Fe^{57} , — на расстоянии 9,8 см от него. Скорость вращения достигала 600 об/сек. Для каждого значения скорости снималась полная линия резонансного поглощения, что позволило повысить точность измерений. Результаты подтверждают формулу (6) с точностью до 1,1%.

Скорость света

Скорость распространения электромагнитных волн — одна из фундаментальных физических констант. Особо важное значение она приобрела в теории относительности.

В древности и в средневековье вопрос о том, конечна или бесконечна скорость света, не мог быть связан с трактовкой каких-либо опытов или достоверных наблюдений. Аристотель, а вслед за ним и многие философы древности считали, что свет распространяется мгновенно, и это представление было господствующим. В I в. н. э. Дамиак в сочинении «Оптика» писал: «Распространение света глаз и света солнца до самых внешних границ небесной сферы происходит мгновенно, потому что как свет солнца, после того как оно было закрыто облаком, в тот же момент, как облако пройдет, достигнет до нас, так же и мы, как только бросим взгляд вверх, сейчас же видим небо»¹.

В рассуждениях Альгазена, выдающегося оптика XI в., проводится мысль, что свет распространяется не мгновенно. В период создания Галилеем «Il Saggiatore» свет представлялся ему потоком бесконечно быстрых частиц. Впоследствии Галилей склонялся к представлению о конечной скорости распространения света, но считал, что окончательное решение есть вопрос опыта. В книге «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению» (1638) Галилей уже выдвигает идею возможного эксперимента для определения скорости света. Идея состояла в следующем. Два наблюдателя находятся на расстоянии нескольких километров. Они

¹ Б. П. Вейнберг и З. П. Вейнберг. К истории определения скорости света. «Вестник опытной физики и элементарной математики». 1902, № 335, стр. 241.

снабжены фонарями, закрывающимися и открывающимися при помощи подвижных экранов. Первый наблюдатель дает световой сигнал, а второй, заметив свет первого фонаря, открывает свой экран. Время, прошедшее между раскрытием фонаря первым наблюдателем и моментом, когда он замечает световой сигнал, возвращенный от второго наблюдателя, должно равняться $t=2s/c$, где s — расстояние между наблюдателями, c — скорость света.

Определение скорости света в новое время

Галилей полагал, что если опыты с двумя наблюдателями, находящимися на расстоянии двух или трех миль друг от друга, окажутся неудачными, то необходимо будет сделать вывод о мгновенном распространении света. Эксперименты, предложенные Галилеем, были частично осуществлены членами флорентийской академии, но не дали однозначных результатов. «Само собой разумеется, — писал Майкельсон, — промежуток времени оказался таким малым, что не мог быть замечен столь несовершенными средствами; но необходимо сказать, что принцип метода был правилен и по существу лежит в основе широко известного метода Физо. Первое из улучшений метода заключается в замене второго наблюдателя быстро вращающимся экраном с частыми отверстиями (вместо закрывания и открывания экрана)»¹.

В «Новом органоне» Ф. Бэкон высказал мнение, что нельзя себе мыслить луч света мгновенно пробегающим огромные пространства, и ставил вопрос, имеет ли звездное небо действительно тот же самый вид, какой представляется нам в известный момент, или же оно представлено в том виде, какой оно имело до нашего наблюдения. В дальнейшем Бэкон высказывался за мгновенное распространение света.

Декарт писал о различных мыслимых экспериментах по определению скорости света. В письме к Беекману он напоминает ему о предложенном им опыте с факелом.

¹ А. А. Майкельсон. Исследования по оптике. М.—Л., стр. 136.

«И ты,— пишет Декарт,— до такой степени доверял этому эксперименту, что заявил, что будешь считать неправильным все твое учение, если нельзя будет отметить хотя бы небольшой отрезок времени между мгновением, в которое видно движение факела в зеркале, и мгновением, в которое оно ощущается рукой. Наоборот, я говорил, что если только такой промежуток времени может быть чувственно воспринят, то все мое учение будет полностью опровергнуто»¹. В другом письме Декарт писал: «...чтобы покончить со всем спором и освободить тебя от бесполезной работы, я напомнил, что у нас есть другой эксперимент, неоднократно и весьма тщательно проверенный множеством людей, из которого станет совершенно ясно, что не существует никакого промежутка времени между мгновением, когда свет исходит от светящегося тела, и мгновением, когда он достигает глаза»². Для объяснения своего опыта Декарт ставит перед Беекманом ряд вопросов. Цель этих вопросов — устранение той неоднозначности, которая могла возникнуть при истолковании опыта. «Чтобы изложить его,— пишет Декарт,— я прежде всего спросил, считаешь ли ты, что Луна освещается Солнцем и затмения происходят благодаря тому, что Земля расположена между Солнцем и Луной и Луна между Солнцем и Землей? Ты ответил утвердительно. Я спросил далее, каким образом, по твоему мнению, распространяется свет от звезд к нам, и ты ответил: по прямым линиям, так что, когда мы смотрим на Солнце, оно видимо не в том месте, где оно находится в действительности, а в том, где оно было в тот момент, в который свет, благодаря которому мы видим Солнце, вышел из него. Наконец я спросил, какова должна быть минимальная продолжительность времени, чувственно ощутимая, между мгновением, в которое движется факел, и мгновением, в которое его движение отражается в зеркале, находящемся на расстоянии 250 шагов...»³.

У Беекмана, как и до него у флорентийцев, не было реальных представлений о тех интервалах времени, которые требуются для прохождения светом пространственных интервалов, выбранных ими в условиях земных опы-

¹ I. Beekman. Tome quatrième. Supplément. La Haye, 1953, p. 225—226.

² Там же, стр. 226.

³ Там же.

тов. Декарт же понимал это. Беекман считал, что минимальная продолжительность времени, чувственно ощущаемая между мгновением, когда движется факел, и мгновением, когда его движение отражается в зеркале, находящемся на расстоянии 250 шагов, равна времени одного удара пульса. Чтобы доказать однозначность своего опыта и не злоупотреблять усугубкой, которую Беекман допустил в полемическом споре, Декарт принял эту продолжительность равной не более $\frac{1}{24}$ времени одной пульсации кровеносного сосуда. «И я сказал,— пишет Декарт,— что эта продолжительность, которая в твоём эксперименте явно неощутима,— с чем ты, конечно, согласен,— в моём же будет отчетливо ощущимой. Действительно, считая, что Луна находится от Земли на расстоянии 50 земных радиусов ...ему (свету.— *Ф. Ф.*) потребуются время, равное продолжительности 5 тысяч пульсаций, т. е. по крайней мере час, для того чтобы дважды пройти расстояние от Луны до Земли, как это показывает расчет»¹. Далее Декарт излагает сущность опыта.

В «Трактате о свете» Гюйгенс несколько видоизменил изложение Декарта. Он рассматривает часть орбиты Земли или орбиту Луны; в его изложении мы видим, как критически осваивалась идея Декарта об определении скорости света. Как и у Декарта, точки *A* (местонахождение Солнца), *B* (местонахождение Земли) и *C* (местонахождение Луны) лежат на одной прямой. Гюйгенс, как и Декарт, пишет, что если свет проходит, например, расстояние между Землей и Луной за 1 час, то отсюда следует, что, после того как Земля придет в точку *B*, отбрасываемая ею тень, или перерыв в испускании света, еще не достигнет точки *C* — местонахождения Луны; последняя начнет затемняться там только через час после того, как Земля пришла в точку *B*; еще один час требуется для того, чтобы это затемнение достигло Земли. Наблюдения свидетельствуют, что затемненная Луна всегда наблюдается в месте, противоположном Солнцу, в то время как в рассматриваемом случае она должна казаться смещенной с этого места. Гюйгенс по существу пользуется теми же доводами, которые привел Декарт Беекману; тут нет ничего качественно нового, но резко уменьшен

нижний предел времени, которое необходимо свету, чтобы пройти путь от Земли до Луны; а именно, если свету нужно в 3000 раз меньше времени, чем это предполагал Декарт, то отклонение Луны нелегко будет заметить при наблюдении затмений и, следовательно, нельзя будет сделать вывод в пользу мгновенного распространения света.

Опираясь на мысленные эксперименты с лунными затмениями и опыты Рёмера, Гюйгенс связал вопрос о конечной скорости света с предположением, что речь идет не о переносе тела с такой большой скоростью, а о последовательном движении, переходящем от одних тел к другим. «Поэтому,—пишет Гюйгенс,—при размышлениях об этих вещах я беспрепятственно предположил, что истечение света происходит постепенно. Действительно, с помощью этого предположения все эти явления могли быть объяснены, тогда как, если придерживаться противоположного взгляда, все было непонятно. И мне всегда казалось, и многим другим вместе со мной, что даже Декарт, который поставил целью дать вразумительное объяснение всех вопросов физики и который гораздо лучше успел в этом, чем кто-либо до него, даже Декарт по поводу света и его свойств не высказал ничего, что не было бы полно трудностей для понимания или даже непостижимо»¹.

Мы видим, как уже на ранних этапах развития новой физики вопрос о скорости света тесно переплетался со многими физическими проблемами. После работ Декарта и Гюйгенса наиболее существенными для развития вопроса о скорости света оказались начатые Кассини и Рёмером тщательные наблюдения спутников Юпитера. Эмиль Вильде в своей «Истории оптики» писал, что Декарт первый показал путь, на котором могло быть осуществлено измерение скорости света. Олаф Рёмер пошел дальше в том отношении, что он не остановился на наблюдениях затмений Луны, а перешел к рассмотрению спутников Юпитера.

Джованни Доменико Кассини, уроженец северной Италии, в 1650 г. стал профессором математики и астрономии в Болонском университете. Ему принесло известность открытие вращения Юпитера и Марса, а также

¹ Х. Гюйгенс. Трактат о свете. М.—Л., 1935, стр. 16—17.

составленные им таблицы движения спутников Юпитера. По настоянию французского астронома Пикара Кассини был приглашен в 1669 г. в Париж в качестве директора еще строившейся Парижской обсерватории. Во Франции Кассини были открыты четыре спутника Сатурна, законы либрации Луны и проведены другие важные исследования.

В 1671 г. астроном Пикар отправился в Данию, чтобы посмотреть, осталось ли что-либо от обсерватории Тихо-Браге на острове Гвэнс, и вернулся оттуда вместе с молодым датским астрономом Олафом Рёмером. После переезда в Париж Рёмер сделался сотрудником Кассини, а затем очень скоро был избран в члены Парижской академии наук. Первый отчет об определении скорости света Рёмер представил в Парижскую академию 22 ноября 1675 г. Затем был представлен мемуар «Доказательство, касающееся скорости света».

Было замечено, что промежутки между последовательными затмениями спутника в тот период, когда Юпитер и Земля приближаются друг к другу, меньше, чем в период, когда они удаляются друг от друга. Рёмер приписал эту нерегулярность конечной скорости распространения света. В сентябре 1676 г. он правильно предсказал опоздание затмения, которое должно было произойти в ноябре. Выводы Рёмера о конечности скорости света принимались его современниками весьма неохотно. Кассини считал доказательство недостаточно убедительным, поскольку наблюдения над другими спутниками Юпитера не дали такого хорошего результата, как наблюдения над первым спутником. Даже в 1707 г. Фонтенель не признавал выводов Рёмера. В докладе, опубликованном в 1676 г., Рёмер не предложил точно определенного численного значения скорости света. Из полученного им значения (22 минуты) для времени прохождения светом расстояния, равного диаметру земной орбиты, Гюйгенс нашел скорость света и сравнил ее со скоростью звука. Ньютон в первом издании «Математических начал» для времени распространения света от Солнца до Земли принимал значение около 10 минут. В «Оптике» он предлагает около 7 или 8 минут. Эта же величина дана в последующих изданиях «Математических начал».

Явление аберрации света, открытое Д. Бредли в 1725 г., дало возможность определить скорость света еще

одним астрономическим способом. Долгое время, после того как была установлена конечная скорость света на основании астрономических наблюдений, полагали, что измерение скорости света земными опытами невозможно.

Экспериментальные определения скорости света

В 1834 г. Уитстон предложил метод вращающегося зеркала, а в 1836 г. применил его для определения скорости электричества. Майкельсон следующим образом описывает эксперимент Уитстона: «...зеркало устанавливается так, чтобы оно могло вращаться с весьма большой скоростью около оси, параллельной его поверхности; на это зеркало падал свет электрической искры, вызванной разрядом конденсатора»¹. В зеркале наблюдали изображения двух искр. Вторая искра возникала после того, как электрический ток пробегал расстояние в несколько километров. Первая искра возникала после того, как ток пробегал расстояние в несколько метров. Если за промежуток времени между двумя искрами зеркало повернулось на некоторый угол, то луч света, отраженный от зеркала, повертывался на угол, равный удвоенному углу поворота зеркала. Зная скорость вращения зеркала и измеряя величину угла, определяют скорость электричества.

Араго впервые высказал мысль о применимости метода вращающегося зеркала для измерения скорости света. 3 декабря 1838 г. в своем докладе в Парижской академии Араго, полемизируя со многими членами отделения физики, доказывал, что принцип Уитстона может быть приложен для сравнения скоростей света в воздухе и жидкости. Ни Уитстон, ни Гершель, писавший Уитстону об определении скорости света, ни Бессель и Зильберман, предлагавшие Араго механические видоизменения конструируемого им прибора, ни аббат Лаборд, предлагавший (1839) способ, аналогичный использованному позже в опыте Физо, не осуществили своих замыслов.

Схематически опыт Физо состоял в следующем (рис. 32). Свет от источника попадал на полупрозрачное

¹ А. А. Майкельсон. Световые волны и их применения. М.—Л., 1934, стр. 43.

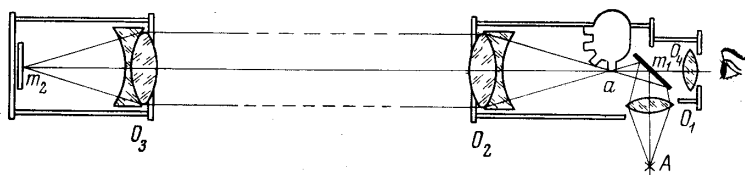


Рис. 32

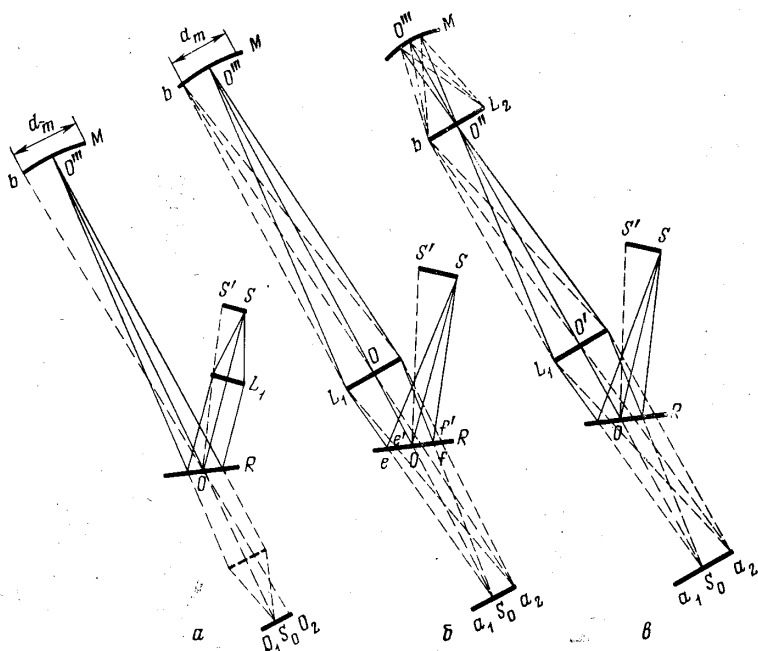


Рис. 33

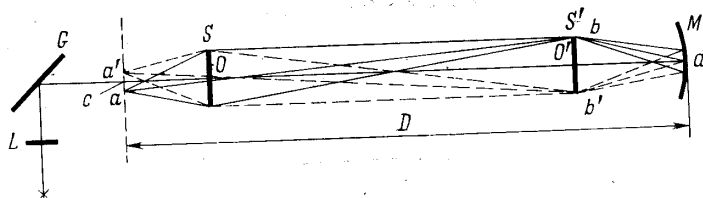


Рис. 34

зеркало (а во времена Физо — на плоскопараллельную пластинку). Отразившись от зеркала, свет попадал на край быстро вращающегося зубчатого колеса. Колесо может вращаться при помощи часового механизма, приводимого в движение падающим грузом. Когда пучок света попадал в отверстие между зубцами, возникал световой сигнал. Этот сигнал доходил до зеркала и отражался обратно. Если в тот момент, когда свет возвращался к диску, он встречал отверстие, то частично проходил через полупрозрачное зеркало, а затем попадал в глаза наблюдателя.

На прохождение пути до зеркала и обратно необходимо время

$$\tau = \frac{2l}{c}.$$

За это время диск поворачивается на угол

$$\Delta\varphi = \omega\tau = \omega \frac{2l}{c},$$

где ω — угловая скорость вращения диска.

Условие k -го затмения $\frac{2l\omega_k}{c} = \left(k - \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi}{z}$ (ω_k — угловая скорость, z — число зубцов). В опыте Физо расстояние l было равно 8633 м, число зубцов $z=720$. Скорость света $c=315324$ км/сек.

«Определить меру точности этого результата можно только более или менее гадательно, так как в заметке Физо почти нет подробностей опытов и так как по тому способу, каким наблюдал Физо, других определений сделано не было. Физо добивался минимума или максимума света и затем поддерживал скорость вращения колеса, соответствующую этому минимуму, постоянной при помощи особого тормоза»¹. Основным недостатком метода — трудность определения моментов максимумов и минимумов, а следовательно, и ошибки в измерении времени.

В 1862 г. Фуко при помощи прибора, снабженного вращающимся зеркалом, измерил скорость света в пределах комнаты. Свет отражается от пяти вогнутых зер-

¹ Б. П. Вейнберг. Вероятнейшее значение скорости распространения возмущений в эфире, т. II, 1903, стр. 4.

кал, что позволило световому пучку до его возвращения на вращающееся зеркало пройти сравнительно большой путь (рис. 33).

В 1872 г. Корню произвел опыты по методу Физо (рис. 34). Расстояние было равно 10310 м. В 1874 г. он повторил эти же опыты на расстоянии в 22910 м. Отличие способа наблюдений Корню от способа наблюдения Физо состояло в применении переменной скорости вращения, в определении моментов t_1 и t_2 последовательного исчезновения и появления света, а также скорости вращения в момент $\frac{t_1 + t_2}{2}$.

В 1881 г. Дж. Юнг и Форбс видоизменили метод Физо и Корню. Видоизменение метода переменной скорости Корню заключалось «в применении двух труб, отражающих свет обратно и находящихся на различном расстоянии от зубчатого колеса, и в наблюдении момента равенства силы света отраженных обеими трубами изображений»¹. Они получили значение $c = 301\,382$ км/сек. Опыты Корню были повторены Перрстеном (1900, 1903).

Наряду с прямыми методами получили развитие и косвенные методы. В 1856 г. Вебер и Кольрауш определили значение c из электромагнитных и электростатических измерений количества электричества. Они определяли количество электричества на одной обкладке лейденской банки, другая обкладка которой была соединена с землей. Измерения проводились в электростатических единицах. Затем заряд измеряли в электромагнитных единицах при помощи баллистического гальванометра. Работы Вебера и Кольрауша положили начало косвенным методам определения скорости света.

Максвелл наметил основные пути отыскания c косвенными методами и указал для этого восемь способов.

Б. П. Вейнберг рассматривает три категории способов определения c .

1. Способы определения c , не зависящие от значения c в абсолютной мере.

Сюда отнесены: 1) определения c из электромагнитных и электростатических измерений количества электричества; 2) определения c из электромагнитных и электро-

¹ Б. Н. Вейнберг. Вероятнейшее значение скорости распространения возмущений в эфире, т. II. 1903, стр. 29.

статических измерений силы тока; 3) определения c из измерений периода электрических колебаний.

II. Способы определения c , зависящие от корня квадратного из значения σ ма в абсолютной мере.

Сюда отнесены: 1) определения c из электромагнитных и электростатических измерений емкости; 2) определения c из электромагнитных и электростатических измерений сопротивлений.

III. Способы определения c , зависящие от первой степени значения σ ма в абсолютной мере.

Сюда отнесено определение c из электромагнитных и электростатических измерений разности потенциалов.

Перечисленные прямые и косвенные методы определения c составили первый период в истории физических методов определения скорости света. Работы Майкельсона 1878—1879 гг. служили отправным пунктом для большей серии работ, составивших второй период.

В 1878 г. появилась первая заметка Майкельсона, ставшая отправным пунктом целой серии исследований по определению скорости света. Майкельсон в работе 1878 г. сообщает предварительные результаты, полученные им при помощи видоизмененного опыта Фуко. Он поместил плоское отражающее зеркало в сопряженном фокусе источника света и расположил собирающую линзу между вращающимся и неподвижным зеркалами, в то время как раньше ее располагали между источником света и вращающимся зеркалом. В то же время (1880—1882) Ньюкомб произвел опыты по способу вращающегося зеркала. По его предложению Майкельсон повторил свои опыты в 1891 г.

В 1902 г. Майкельсон сравнил свои данные, полученные методом вращающегося зеркала, с другими данными и нашел в качестве наиболее вероятного значения скорости света $299\,890 \pm 60$ км/сек. В дальнейшем Майкельсон придал вращающемуся зеркалу форму правильного многогранника. Полагают, что работы Майкельсона, проведенные с 1921 по 1926 г., позволили измерять скорость света с точностью до 4 км/сек. В серии опытов 1929—1933 гг. Майкельсон и его сотрудники применяли метод Фуко. После смерти Майкельсона его работы продолжали Пиз и Пирсон (рис. 35). С 19 февраля 1931 г. по 27 февраля 1933 г. было произведено более 2800 измерений. Отдельные измерения объединялись в серии. Таким

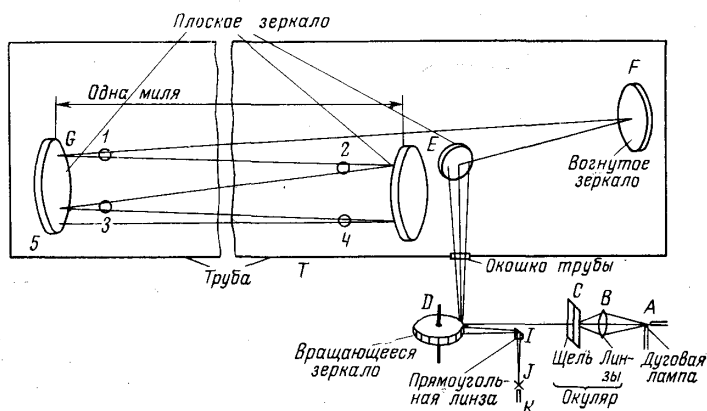


Рис. 35

образом, было получено значение скорости света $299\,774 \pm 11$ км/сек. Эта серия работ завершила собой второй период в истории физических методов определения скорости света.

Об опытах Майкельсона 1902 и 1926 гг. Л. И. Мандельштам писал: «Он определил скорость света не только в воздухе, но также в воде и сероуглероде. Для сероуглерода результат оказался отличным от значения, вычисленного из показателя преломления. Этому было дано следующее объяснение. Скорость света — вовсе не такое простое понятие, как казалось вначале. Мы говорим обычно о *фазовой* скорости, но при всех прямых измерениях определяется не фазовая, а *групповая* скорость. Только в вакууме сложное понятие скорости света становится простым, фазовая и групповая скорости совпадают»¹.

Значение $c = (299\,796 \pm 1) \cdot 10^5$ см/сек Мандельштам считал наилучшим к 1933 г. из всех существующих результатов, но точность измерений казалась ему несколько преувеличенной.

¹ Л. И. Мандельштам. Полное собрание трудов, т. V, стр. 95.

Современные методы определения скорости света

Для третьего периода в истории физических методов определения скорости света характерно разнообразие используемых методов (ячейка Керра, ячейка Керра и фотоэлемент, микроволновой интерферометр, стоячие волны в полном резонаторе, измерение с помощью вращательных спектров двухатомных молекул и т. д.).

В 1875 г. Керр обнаружил, что многие жидкие диэлектрики под действием электрического поля становятся анизотропными. Это явление послужило доказательством того, что оптические свойства вещества могут изменяться под влиянием электрического поля. Были установлены законы Керра и Хавелока:

$$n_p - n_s = \lambda B E^2 \text{ — закон Керра,}$$

$$n_p - n = 2(n_s - n) \text{ — закон Хавелока,}$$

где n — показатель преломления вещества в отсутствие поля, n_p — показатель преломления для направления, параллельного полю, n_s — показатель преломления для направления, перпендикулярного полю, B — постоянная Керра, λ — длина волны в ангстремах.

Для большинства веществ постоянная Керра положительна. Эти вещества в электрическом поле ведут себя как положительные одноосные кристаллы.

На основе электрооптического эффекта Керра сконструирована ячейка Керра. Она состоит из поляризатора и анализатора, между которыми находится конденсатор, состоящий из двух небольших пластин. Конденсатор помещен в сосуд, наполненный жидкостью, обладающей достаточно большой электрооптической постоянной (например, нитробензол). Если к пластинам конденсатора приложить электрическое напряжение, то жидкость в сосуде становится двоякопреломляющей.

Она приобретает свойства одноосного кристалла. Свет, поляризованный под углом 45° к направлению поля, после прохождения через ячейку становится эллиптически поляризованным. Через анализатор, скрещенный с поляризатором, свет будет проходить. Если на конденсатор накладывается и переменное электрическое напряжение, то меняется величина двойного преломления жидкости и через ячейку Керра проходит изменяющийся по силе световой поток. Ячейка Керра позволяет

прерывать свет с большой частотой. В 1893 г. де Кудр предложил измерять частоту волн Герца с помощью керр-эффекта¹. Прингсхейм и Гавиола также указали на возможность использования ячейки Керра для измерения скорости света, но не производили никаких опытов. В 1925 г. Каролус докладывал о возможности использования ячейки Керра в качестве прерывателя света.

В 1928 г. в своем предварительном сообщении Каролус и Миттельштедт описали новую установку для измерения скорости света² (рис. 36). Свет от источника S

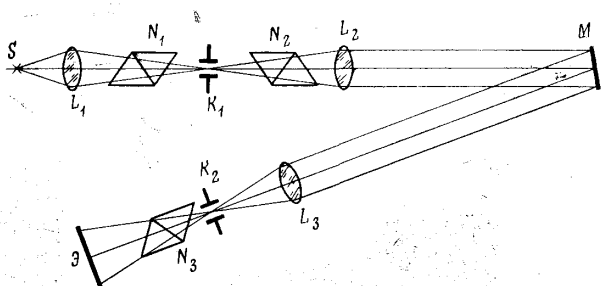


Рис. 36

попадает на объектив L_1 и проходит через николь N_1 . Изображение источника света получается между пластинами конденсатора K_1 . Плоскость поляризации света, пропущенного николем, образует с полем конденсатора угол 45° . Николь N_2 вновь линейно поляризует свет, вышедший из конденсатора. Интенсивность есть функция напряжения на конденсаторе K_1 . Линейно поляризованный свет попадает на объектив L_2 и в виде параллельного пучка направляется к удаленному зеркалу M , от которого отражается на объектив, проецирующий изображение источника в пространство между пластинами конденсатора K_2 . Эллиптически поляризованный свет проходит через поляризатор N_3 на экран.

¹ Des Coudres. Einige Bemerkungen über elektrische Doppelbrechung. «Verh. d. Deutsch. Naturforscher und Ärzte», 1893.

² A. Karolus, O. Mittelstaedt. Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit unter Verwendung des elektrooptischen Kerreffektes. «Phys. ZS.», 1928, 29, S. 698—702.

Конденсаторы подключены к одному колебательному контуру лампового генератора. При небольшой частоте изменения напряжения свет на экране все время виден. При возрастании частоты фаза напряжения изменится на полуволну за время прохождения светом удвоенного расстояния до удаленного зеркала. K_2 не пропустит света.

В этой работе было приведено найденное учеными значение скорости света ($c = 299\,778 \pm 20$ км/сек). Они отмечали, что полученное ими значение не находится в противоречии с работой Майкельсона 1926 г., в которой среднее значение трех тысяч измерений оказалось равным $299\,796 \pm 4$ км/сек.

Миттельшtedт привел весьма интересную таблицу значений скорости света, полученных различными методами с 1849 по 1928 г.

В начале 30-х годов возникла дискуссия по вопросу об изменении скорости света со временем. В 1927 г. де Брей опубликовал две статьи, где отметил тенденцию уменьшения значений скорости света со временем. Данные, которыми пользовался де Брей, охватывали период с 1874 по 1926 г. В 1934 г. де Брей писал, что результаты измерения скорости света за последние десять лет также указывают на уменьшение скорости света со временем. В 1934 г. Ф. Эдмонсон, выразив свое согласие с де Бреем, полагал, что в настоящее время неразрешим вопрос о том, идет ли речь о периодических изменениях или о длительном линейном уменьшении. До работы Эдмонсона Р. Кеннеди, фотографируя через определенные интервалы времени картину интерферометрических полос, не обнаружил сдвига полос, который должен был бы наблюдаться при изменении скорости света, а следовательно, и длины волны.

В 1939 г. де Брей вернулся к исследованию своих предположений. Возражения де Брею сводились к тому, что если принять планковскую постоянную h и разность энергетических уровней неизменными, то при изменении c должна меняться и длина волны.

В установке с затвором Керра, использованной Андерсеном (рис. 37), свет от источника проходит через затвор Керра (K). Часть света, отражаемая полупрозрачным зеркалом M_1 и зеркалом M_2 , попадает на фотоэлемент R . Часть света, прошедшая через M_1 , отражается от зеркал M_3 , M_4 , M_5 , M_6 и возвращается к M_1 . Отра-

Значения скорости света

Год	Автор	Метод	Среда	Значение скорости света, км/сек	Замечания
1849	Физо	Зубчатое колесо	Воздух	315 300	Без указания на оценки ошибок
1862	Фуко	Вращающееся зеркало	»	$298\,000 \pm 500$	
1872	Корню	Зубчатое колесо	»	$298\,000 \pm 300$	Предварительно
1874	Корню	Зубчатое колесо	Вакуум	$300\,400 \pm 300$	Окончательно
1874	»	То же	»	$299\,990 \pm 200$	Дискутировано и пересчитано Хельмертом
1878	Майкельсон	Вращающееся зеркало	»	$300\,140 \pm 300$	
1879	»	То же	»	$299\,910 \pm 50$	Окончательно
1880	Ньюкомб	»	Воздух	299 627	Без указания ошибок
1881	Юнг и Форбес	Зубчатое колесо	Вакуум	301 382	
1884	Ньюкомб	Вращающееся зеркало	Воздух	299 694	Корню указал на ошибочность этой работы
1881	»	То же	Вакуум	299 810	
1882	»	»	»	$299\,860 \pm 30$	
1882	Майкельсон	»	»	$299\,853 \pm 60$	
1900	Перротен	Зубчатое колесо	»	$299\,900 \pm 80$	
1924	Майкельсон	Вращающееся зеркало	»	$299\,802 \pm 30$	
1926	»	То же	»	$299\,796 \pm 4$	
1928	Каролус и Миттельштедт	Керр-эффект	»	$299\,796 \pm 4$	

жаясь от M_1 , свет попадает на фотоэлемент. Усилитель, настроенный на частоту модулятора, усиливает фототок, вызванный действием обоих пучков. «Если оба световых пучка приходят на фотоэлемент при одинаковой фазе модуляции, то результирующий ток содержит интенсивную компоненту, частота которой равна частоте, на которую настроен усилитель. Если же они приходят не в фазе, то общий фототок остается таким же, но его усиливаемая компонента мала, а ток усилителя минимален»¹. Значение скорости света c , полученное Андерсеном, составляло $(299\,776 \pm 0,00014) \cdot 10^{10}$ см/сек.

¹ Р. Дитцберн. Физическая оптика. М., 1965, стр. 309.

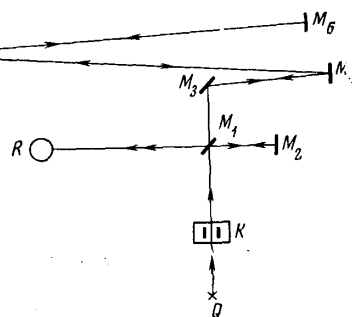


Рис. 37

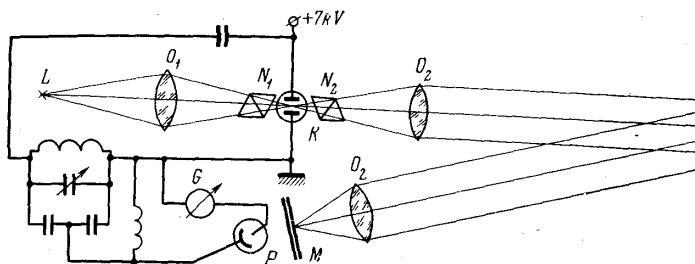


Рис. 38

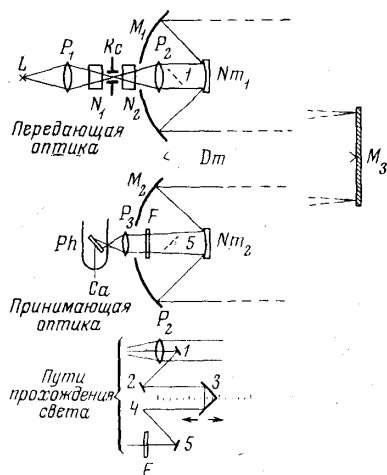


Рис. 39

В установке Хюттеля¹ (рис. 38) свет от лампы L проходит через конденсатор, помещенный между двумя скрещенными николями (модулятор). По выходе из модулятора свет проходит определенное расстояние до зеркала. Отразившись от него и пройдя через объектив, он освещает матовый экран, за которым находится вакуумный фотоэлемент. «К фотоэлементу приложено переменное напряжение той же частоты, как и напряжение на конденсаторе Керра. Если максимальная интенсивность модулированного света попадает на фотоэлемент в момент, когда потенциал на аноде его положителен, ток может возникнуть и будет тем больше, чем выше напряжение на фотоэлементе. Если же изменить путь, проходимый светом, так, чтобы максимум интенсивности на фотоэлементе совпадал с полупериодом отрицательного напряжения на аноде, ток будет минимальным»².

Методы проведения опыта таковы: находят два положения зеркала при которых ток имеет одинаковое значение при одинаковом знаке производной. Из соотношения $c = 2df$ (где f — частота модуляции) находят c . Среднее значение c , определенное из 135 измерений, составило $299\,768 \pm 10$ км/сек. Хюттель polemизирует с де Бреем, установившим формулу, согласно которой скорость света уменьшается с каждым годом.

Анализируя различные аспекты в определении скорости света, Д. Рэнк писал: «После окончания второй мировой войны было развито относительно большое число новых методов измерения скорости света. Новые методы имеют такую высокую точность, что все старые определения скорости света не учитываются при решении вопроса о наиболее вероятном значении этой очень важной постоянной»³.

Рэнк говорит о шести совершенно различных экспериментальных методах определения скорости света: 1) геодезический метод (Бергstrand); 2) метод, при котором пользуются микроволновым объемным резона-

¹ A. Huttel. Eine Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit unter Anwendung des Kerreffektes und einer Photozelle als phasenabhängigen Gleichrichter. «Ann. Physik», 1940, 37, S. 365—402.

² В. Г. Вафиади, Ю. В. Попов. Скорость света и ее значение в науке и технике. Минск, Изд-во БГУ, 1970, стр. 49.

³ Д. Рэнк. Определение скорости света. В сб. «Успехи спектроскопии». М., ИЛ, 1963, стр. 102—114.

тором (Хансен, Бол, Эссен); 3) метод, использующий систему точной навигации (Аслаксон); 4) метод, основанный на использовании интерферометра Майкельсона на длинах волн сантиметрового диапазона. Длина волны измеряется перемещением подвижного зеркала (метод микроволнового интерферометра Фрума); 5) радиочастотный интерферометрический метод (Флорман); 6) вычисление скорости света из полосатого спектра (Д. Рэнк).

Бергstrand предложил геоиметрический метод измерения скорости света¹ (рис. 39). Принцип работы геоиметра основан на измерении времени распространения модулированного пучка света до измерительного объекта и обратно. Модуляция светового потока осуществляется ячейкой Керра. Многие практические ошибки, имевшие место в измерениях Андерсена, Бергstrandом были устранены. Точность его измерений лимитируется точностью, с которой могли быть измерены базисная линия и частота. Опыты проводились в воздухе над длинными базисными линиями, поэтому необходимо было учитывать влияние показателя преломления воздуха, рассеяние света в атмосфере и искривление светового луча за счет вертикального градиента плотности воздуха. Метод Бергstrandа идентичен методу Физо. В 1949 г. дистанция в его опытах равнялась 9 тыс. м., а в работе 1950 г. изменялась в пределах 1,7—6,9 тыс. м. В 1949 г. им получено значение $c = 299\,793 \pm 2$ км/сек, а в 1950 г. — $299\,792,7 \pm 0,25$ км/сек.

Об этих опытах Г. Розенберг писал: «Отклонения отдельных результатов измерений от среднего не превышают 1,1 км/сек... Измерения последних лет, проведенные тремя различными методами, согласно приводят к значению, найденному Бергstrandом. Это значение на 16 км/сек превышает значение Берджа»². Далее Розенберг указывает, что в отличие от данных, приводимых Берджем, для измерений последних лет характерен малый разброс результатов отдельных измерений. Г. Розенберг приводит таблицу результатов измерений скорости света в вакууме, выполненных после 1905 г.³

¹ L. E. Bergstrand. The velocity of light... «Nature», 1949, 163, p. 339; 1950, 165, p. 405.

² Г. Розенберг. Новейшие измерения скорости света и микроволн в вакууме. «Успехи физических наук», 1950, 42, стр. 490.

³ Там же, стр. 491.

Скорость света в вакууме

Год	Автор	Метод	Дистанция, м	Скорость света в вакууме км/сек
1905	Роза и Дорсей (исправлено Берд- жом в 1934 г.)	Отношение электро- стат. ед. к электро- магнитн. ед.		$299\,784 \pm 10$
1923	Мерсье	Стоячие волны Герца		$299\,782 \pm 30$
1924	Майкельсон	Вращающееся зеркало	$35 \cdot 10^3$	$299\,802 \pm 30$
1926	»	То же	$35 \cdot 10^3$	$299\,796 \pm 4$
1929	Каролус и Мигтель- штедт	Ячейка Керра, фото- элемент	250	$299\,778 \pm 20$
1932— 1933	Майкельсон, Пиз и Пирсон	Вращающееся зеркало в вакууме	$15 \cdot 10^3$	$299\,774 \pm 11$
1937	Андерсен	Ячейка Керра, фото- элемент	170	$299\,771 \pm 14$
1940	Хюттль	То же	80	$299\,768 \pm 10$
1941	Андерсен	Ячейка Керра	170	$299\,776 \pm 14$
1948	Джон и Корнфорд	Радиолокация		$299\,788 \pm ?$
1948	Эссен и Гордон—Смайс	Полый резонатор в вакууме		$299\,793 \pm 9$
1949	Бергстранд (исправлено в 1950 г.)	Ячейка Керра, фото- элемент	$9 \cdot 10^3$	$299\,793 \pm 2$
1949	Аслаксон	Радиолокация	$(100—500) \cdot 10^3$	$299\,792,5 \pm 3$
1950	Эссен	Полый резонатор в вакууме		$299\,792 \pm 3$
1950	Бергстранд	Ячейка Керра	$(1,7—6,9) \cdot 10^3$	$299\,792,7 \pm 0,25$

В 1952 г. А. П. Карташев провел опыты по методу многолучевого интерферометра. Схема установки Карташева весьма наглядна (рис. 40). Свет от ртутной лампы сверхвысокого давления 1, выделенный диафрагмой 2, попадает на объектив 3. Объектив располагают так, что из него выходит параллельный пучок лучей. Модулятор света создан на основе интерференционного эталона Фабри — Перо. Этот эталон представляет собой две плоскопараллельные пластинки, расположенные строго параллельно. Обращенные друг к другу поверхности пластин покрыты тонкими полупрозрачными слоями серебра. Внутри эталона Карташев поместил вращающуюся стеклянную пластинку. Из-за вращения пластинки интенсивность света, проходящего через эталон, модулируется непрерывно изменяющейся частотой. На частоту монохроматического излучения накладывается частота, определяемая быстротой смены максимумов и минимумов

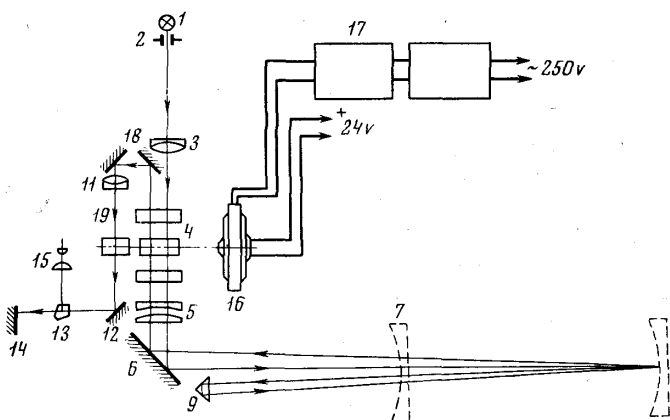


Рис. 40

мов. Эта быстрота зависит от скорости вращения и оптической толщины пластинки. Быстрое появление и исчезновение узких интерференционных максимумов позволяет получать кратковременные световые импульсы. При выходе из интерференционного модулятора пучок, пройдя через объектив 5, отражается от плоского зеркала 6 на два вогнутых сферических зеркала 7 и 8. При помощи объектива изображение проецировалось в центр кривизны зеркал 7, 8. Когда зеркало 7 выключено, пучок лучей после отражения от зеркала 8 попадает на призму и после отражения от ее граней вновь возвращается к отражателям. Призма позволяет увеличивать длину хода пучка света. После вторичного отражения от зеркал световой пучок возвращается в модулятор и при помощи двойного зеркала 18 направляется в объектив. Перед призмой установлена щель, изображение которой создается на фотопластинке.

Скорость света была рассчитана по формуле

$$c = \frac{8\pi NLa}{\lambda},$$

где N — число оборотов пластинки модулятора в секунду, L — длина базы, a — расстояние между интерферен-

ционными полосами, λ — длина волны применяемого монохроматического света. Измерения проводились на базе длиной около 48 м при числе оборотов 3750 и 5000 об/мин. В 10 сериях измерений 1951 г. средняя скорость $c=299\,794\pm6,5$ км/сек, а в 15 сериях измерений 1952 г. $c=299\,788\pm5,4$ км/сек. Анализируя результаты измерений скорости света различными методами, А. П. Карташев приводит значение $c=299\,788$ км/сек как наиболее достоверное значение скорости распространения в вакууме.

Рэнк и его сотрудники определяли скорость света из полосатого спектра. Для двухатомной или линейной многоатомной молекулы вращательная постоянная $B_m = \frac{h}{8\pi^2 I}$,

где h — постоянная Планка, I — момент инерции молекулы. Величина B_m может быть измерена с большой точностью методами радиоспектроскопии. На основании анализа вращательно-колебательных полос в инфракрасном спектре может быть получено значение вращательной

постоянной $B_i = \frac{h}{8\pi^2 I c}$. Отсюда непосредственно следует, что отношение B_m/B_i дает скорость света¹.

В 1957 г. Бергstrand произвел анализ методов измерения скорости света.

I. Метод измерения стоячих волн в полном резонаторе. Этот метод был применен Эссеном и Гордоном — Смайсом в 1948 г. (рис. 41) и привел к результату $299\,792\pm3$ и $299\,793\pm9$ км/сек Боллом в 1950 г. ($299\,789,3\pm0,4$ км/сек). В 1950 г. Эссен получил значение $299\,792,5\pm3$.

II. Метод измерения при помощи микроволнового интерферометра (Фрум; $\lambda=1,25$ см).

III. Метод измерения с помощью радиочастотного интерферометра ($\lambda=1,7$ м). В 1954 г. с помощью этого метода Флорман получил значение $299\,795\pm3,1$ км/сек.

IV. Метод измерения с помощью ротационных ИК-спектров двухатомных молекул. Этим методом Рэнк, Шерер, Виггинс получили значение $299\,789,8\pm3$ км/сек, а Плейер в том же году нашел значение $299\,792\pm6$.

¹ Д. Рэнк. Определение скорости света. В сб. «Успехи спектроскопии», стр. 106.

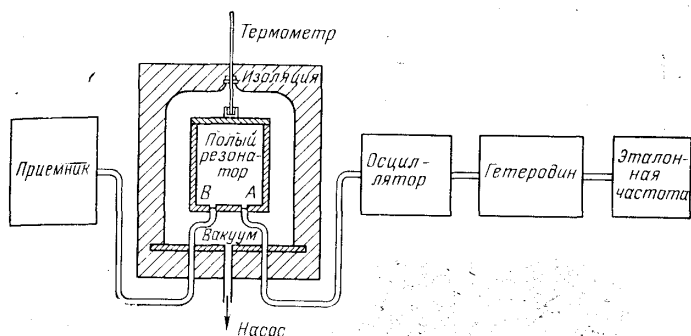


Рис. 41

V. Измерения с помощью геодинетра. В 1949 г. Бергstrand получил значение $299\,796 \pm 2$ км/сек; в 1950 г. — $299\,793,1 \pm 0,25$ км/сек, а в 1951 г. — $299\,793,1 \pm 0,2$ км/сек.

В 1967 г. Каролюс и Хельмбергер произвели измерение скорости света с He—Ne лазером в качестве источника света (рис. 42). Был использован базис Немецкого геодезического института длиной в 48 м. Излучение лазера λ_0 — синусоидально модулированное ультразвуковой волной с частотой 18,72 Мгц. Излучение делится на два пучка одинаковой интенсивности. Измерительный пучок в двух последовательных измерениях пробегает путь, отличающийся удвоенной длиной базиса. С некоторой разностью фаз в обоих случаях измерительный пучок

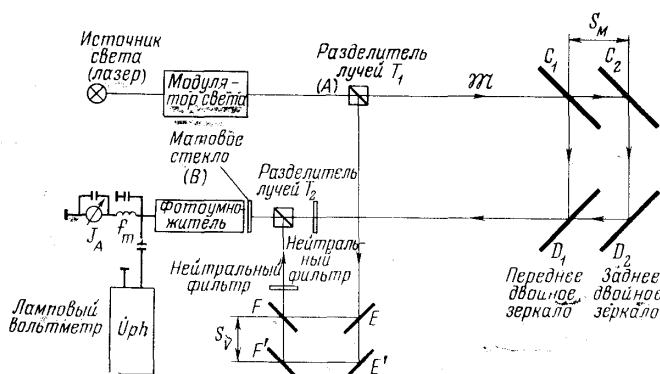


Рис. 42

Измерения скорости света во второй половине XX в.

Год	Автор	Метод	c , км/сек	Δc , км/сек
1950	Эссен	Полый резонатор	299 792,5	3
1950	Бол	То же	299 789,3	0,4
1950	Мак-Кинли	Двойное лучепреломление в кварце	299 780	70
1951	Аслаксон	Обработка радиогеодезических измерений	299 792	2,4
1952	Рэнк и др.	Вращательные спектры	299 776	6
1952	Бергстранд	Ячейка Керра	299 793,1	0,25
1952	Карташев	Многочуевой интерферометр	299 788	5
1952	Фрум	Радиоинтерферометр	299 792,6	0,7
1953	»	»	299 792,75	0,3
1953	Макензи	Ячейка Керра	299 792,3	0,5
1954	Рэнк и др.	Вращательные спектры	299 789,8	3
1955	Величко, Васильев	Две ячейки Керра	299 793,9	1
1955	Плайлер	Вращательные спектры	299 792	4
1955	Флорман	Радиоинтерферометр	299 796,1	3,1
1957	Бергстранд	Ячейка Керра	299 792,85	0,16
1957	Рэнк и др.	Вращательные спектры	299 793,7	0,7
1958	Фрум	Радиоинтерферометр	299 792,5	0,1
1958	Величко	Две ячейки Керра	299 792,7	0,3
1959	Лазанов	Ячейка Керра	299 792,5	0,1
1964	Рэнк и др.	Вращательные спектры	299 792,8	0,4
1964	Каролус, Хельмбергер	Дифракционный модулятор	299 792,4	0,2
1965	Рэнк и др.	Вращательные спектры	299 791,2	2,0
1967	Каролус, Хельмбергер	Дифракционный модулятор	299 792,5	0,15

чок встречается с пучком сравнения на катоде фотоумножителя. Подбирают частоту модуляции так, чтобы пучки при этом встречались в противофазе. При равенстве амплитуд измерительного пучка и пучка сравнения модуляция фототока проходит через нуль. Зная длину «волны модуляции» и частоты модуляции, можно вычислить скорость света в воздухе. Длина базиса измерялась с точностью $8 \cdot 10^{-7}$. Частота модуляции была известна с точностью $2 \cdot 10^{-8}$. Из 60 рядов измерений для скорости света в вакууме получено $c_0 = 299\,792,5 \pm 0,15$ км/сек.

В. Г. Вафиади и Ю. В. Попов сопоставили в таблице результаты измерений скорости света во второй половине XX в., указав одновременно на литературные источники. Мы привели часть этой таблицы, начиная с опытов 1950 г.

Специальная теория относительности (Исторический очерк)

Оптика движущихся тел претерпела сложный путь развития. Парадоксально то, что на это развитие оказали влияние направления науки, казавшиеся весьма далекими от оптики в целом. Явление абберации света, обнаруженное Бредли, приписывали параллаксу, и лишь известное в астрономии положение, что при параллактическом смещении светило удаляется от апекса перемещения наблюдателя, побудило ученых к поискам иных объяснений. В итоге проблема свелась к вопросу о конечной скорости распространения света. Многие годы казалось, что решение проблемы абберации связано с исходом борьбы эмиссионной и волновой теорий.

В начале XIX в. Френель создает волновую теорию оптических явлений в движущихся средах, опираясь на гипотезу о неподвижности эфира. Казалось, что с решением вопроса о подвижном или неподвижном эфире будут разрешены и вопросы оптики движущихся тел. С возникновением новых задач и новых аспектов в трактовке оптики движущихся тел продолжались дискуссии и по казавшимся решенными проблемам. Электродинамика движущихся тел, созданная трудами многих ученых, наиболее близко подошла к решению проблем оптики движущихся тел. Однако при этом не были расчленены кинематические и динамические проблемы оптики. Новый этап в развитии оптики движущихся тел наступил с созданием Эйнштейном специальной теории относительности.

Путь к этой теории был сложен; в нем можно различить два русла:

1. путь от Галилея к Эйнштейну (развитие понятий пространства, времени, относительности движения);
2. путь от Максвелла к Эйнштейну (развитие электродинамики покоящихся и движущихся тел).

Пространство, время, относительность в классической физике

Анализ возникновения и развития теории относительности связан с историческим анализом понятий пространства, времени и относительности движения классической физики. Коперник отчетливо писал о кинематической относительности: всякое воспринимаемое нами изменение положения тела происходит в результате либо движения наблюдаемого предмета, либо движения наблюдателя, либо вследствие движения наблюдателя и наблюдаемого предмета, если эти движения различны.

Представления о кинематической относительности легли в основу трактата Коперника «Об обращении небесных сфер». Сложнее обстояло дело с принципом инерции, которого у Коперника не было. В дальнейшем, наряду с чисто кинематическим релятивизмом выступают элементы динамического релятивизма. Иоганн Кеплер в своих трудах уделял много внимания проблеме динамического истолкования движения планет. Во всех работах до Галилея проблемы относительности были преимущественно связаны с астрономическими исследованиями, и лишь у Галилея эти исследования сочетаются с физическим экспериментом и использованием математических средств. Закон инерции, так же как и концепцию относительности движения, Галилей разрабатывает в тесной связи с законами механического движения.

От Галилея к Ньютону. В ходе борьбы за учение Коперника Галилей выдвинул свой принцип относительности. Он утверждал, что в замкнутой системе мы не можем ощущать прямолинейное равномерное движение. В «Послании к Инголи» Галилей приводит в качестве доказательства наблюдения над движениями в закрытой каюте неподвижного и движущегося кораблей. Это описание наблюдений повторяется им в «Диалогах».

«В большой каюте под палубой какого-то крупного корабля запритесь с кем-либо из ваших друзей, устройте так, чтобы в ней были мухи, бабочки и другие летающие насекомые, возьмите также большой сосуд с водой и рыбок внутри него, приладьте еще какой-либо сосуд повыше, из которого вода падала бы по каплям в другой, нижний сосуд с узкой шейкой, и пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте внимательно, как эти насекомые

будут с одинаковой скоростью летать по каюте в любом направлении; вы увидите, как рыбки начнут двигаться безразлично в направлении какой угодно части края сосуда, все капли, падая, будут попадать в сосуд, поставленный снизу, и вы сами, бросая какой-либо предмет вашему другу, не должны будете кидать его с большим усилием в одну сторону, чем в другую, если только расстояния одинаковы...»¹. В движущемся равномерном корабле «... вы не заметите ни малейшей разницы во всем, что было описано, и ни по одному из этих явлений, ни по чему-либо, что станет происходить с вами самими, вы не сможете удостовериться, движется ли корабль или стоит неподвижно: прыгая, вы будете смещаться на полу на те же расстояния, что и раньше...»²

К анализу того, что было сделано Галилеем, многократно обращался Эйнштейн. В 1927 г. в статье «Исаак Ньютон» он писал: «Искусно интерпретируя самые простые факты, Галилей установил следующее положение: тело, на которое не действуют никакие внешние силы, сохраняет неизменной начальную скорость (и ее направление); если оно меняет скорость (или направление) своего движения, изменение должно быть приписано внешней причине»³.

«Галилей открыл, что «невозмущенное движение» тела прямолинейно и равномерно. При этом под «невозмущенным движением» тела следует понимать движение тела, на которое не действуют другие тела. В этом состоит закон инерции»⁴.

«В этой связи я не могу удержаться, чтобы не отметить удивительное внутреннее сходство между сочетанием Фарадей — Максвелл и сочетанием Галилей — Ньютон. Первый в каждой паре интуитивно схватывал соотношения, а второй их точно формулировал и применял количественно»⁵.

Как одну из основных линий в развитии механики XVII—XVIII вв. следует отметить переход от картезианского релятивизма к релятивизму динамическому. Карте-

¹ Г. Галилей. Избранные труды, т. I. М., «Наука», 1964, стр. 286.

² Там же.

³ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. IV, стр. 79.

⁴ Там же, стр. 90.

⁵ Там же, стр. 271.

зианский релятивизм вытекает из учения Декарта о пространстве и времени.

Декарт, рассматривая протяженность как атрибут телесной субстанции, относит время к модусу мышления. Если протяженность составляет, по Декарту, природу субстанции, то время, которое он отличает от длительности, есть лишь способ, каким мыслится эта длительность. Эта концепция Декарта не стала определяющей в развитии физики в целом и в учении о пространстве и времени в частности.

Большую роль сыграла формулировка закона инерции, впервые предложенная Декартом в 1644 г.: «Каждая частица материи в отдельности продолжает находиться в одном и том же состоянии до тех пор, пока столкновение с другими частицами не вынуждает ее изменить это состояние. Иными словами, если она остановилась на каком-нибудь месте, то никогда не двинется отсюда, пока другие ее не вытолкнут; и раз она уже начала двигаться, то будет продолжать это движение постоянно с равной силой до тех пор, пока другие ее не остановят или не замедлят ее движения»¹.

Для картезианского релятивизма характерно учение об относительности движения, связанное с отрицанием пустого пространства, и сведение сил к кинетическому воздействию среды; для динамического же релятивизма характерно учение об инвариантности законов динамики при переходе от покоя к равномерному прямолинейному движению. Если в картезианском релятивизме относительность мыслится как для прямолинейного, так и криволинейного движения, то в релятивизме динамического устремления направлены в сторону четкого ограничения поставленной задачи прямолинейным движением.

На протяжении двух веков сочинение Ньютона «Математические начала натуральной философии» являлось почти незыблемым основанием механики и физики. При жизни Ньютона оно было издано в 1686, 1713 и 1725 гг.

В 1727 г. «Начала» вышли на английском языке, а в 1759 г. был издан французский перевод Дюшателе с примечаниями Клеро.

¹ Р. Декарт. Избранные произведения. М., 1950, стр. 498.

В этой книге Ньютон вслед за определениями количества материи, количества движения, инерции, приложенной силы, центростремительной силы, основанными на определенных физических допущениях, переходит к «поучению», в котором даны определения понятий времени, пространства, места и движения.

Об этих понятиях Ньютон пишет: «Однако необходимо заметить, что эти понятия обыкновенно относятся к тому, что постигается нашими чувствами. Отсюда происходят некоторые неправильные суждения, для устранения которых необходимо приведенные выше понятия разделить на абсолютные и относительные, истинные и кажущиеся, математические и обыденные»¹. Затем Ньютон переходит к четырем определениям: «I. *Абсолютное, истинное, математическое время* само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью. Относительное, кажущееся или обыденное время есть или точная или изменчивая, постигаемая чувствами, внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного математического времени, как-то: час, день, месяц, год. II. *Абсолютное пространство* по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему остается всегда одинаковым и неподвижным. Относительность есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел и которая в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное... III. *Место* есть часть пространства, занимаемая телом, и по отношению к пространству бывает или абсолютным, или относительным... IV. *Абсолютное движение* есть перемещение тела из одного его места в другое, относительное — из относительного в относительное же»².

В статье «Исаак Ньютон» Эйнштейн писал, что Ньютон был первым нашедшим ясно сформулированную основу, из которой «с помощью математического мышле-

¹ И. Ньютон. Математические начала натуральной философии. Перев. А. Н. Крылова. В кн.: А. Н. Крылов. Собрание трудов, т. VII. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1936, стр. 30.

² Там же, стр. 30—31.

ния можно было логически прийти к количественно согласующемуся с опытом описанию широкой области явлений»¹. Ньютон стремился представить свою систему понятий, как вытекающую из опыта, и вводить как можно меньше понятий, не находящихся в прямом отношении к опыту, и тем не менее им установлены понятия абсолютного времени и пространства, не находящиеся в прямой связи с опытом. Эйнштейн отмечает, что в наши дни Ньютона за это часто упрекали, но именно в этом пункте Ньютон особенно последователен. «Он обнаружил, что наблюдаемые геометрические величины (расстояния между материальными точками) и их изменения во времени в физическом смысле не характеризуют полностью движения. Это положение он доказывает своим знаменитым опытом с ведром. Следовательно, кроме масс и изменяющихся во времени расстояний между ними существует еще нечто такое, что определяет происходящие события; это «нечто» он воспринимал как отношение к «абсолютному пространству». Ньютон понимал, что его законы могут иметь смысл только в том случае, если пространство обладает физической реальностью в той же мере, как материальные точки и расстояния между ними»².

Позднее Эйнштейн писал о двух концепциях пространства, которые могут быть противопоставлены друг другу: а) пространстве как свойстве положения мира материальных объектов и б) пространстве какместилище всех материальных объектов. «В отличие от Лейбница и Гюйгенса Ньютон ясно понимал, что концепция (а) недостаточна». У Ньютона на первый план выступает динамическая относительность. Он пишет: «Причины происхождения, которыми различаются истинные и кажущиеся движения, суть те силы, которые надо к телам приложить, чтобы произвести эти движения. Истинное абсолютное движение не может ни произойти, ни измениться иначе, как от действия сил, приложенных непосредственно к самому движущемуся телу, тогда как относительное движение тела может быть произведено и изменено без приложения силы к этому телу. Достаточно, чтобы силы были приложены к тем телам, по от-

¹ А. Эйнштейн Собрание научных трудов. т. IV, стр. 78.

² Там же, стр. 85—86.

ношению к которым это движение определяется»¹. Когда тела уступают действию сил, меняется относительное положение, определяющее относительный покой или относительное движение. Истинное движение при этом приложении сил может и не меняться. «Таким образом, всякое относительное движение может быть изменяемо такими действиями, при которых абсолютное движение не меняется, и может сохраниться при таких, от которых абсолютное изменяется, так что абсолютное движение совершенно не зависит от тех соотношений, которым определяется движение относительное»².

Ньютон описывает мысленный эксперимент с ведром, наполненным водой и вращающимся вокруг своей оси. На длинной нити подвешивают сосуд и, вращая его, закручивают нить. Сосуд наполняют водой и удерживают сперва вместе с водой в покое, затем сосуд отпускают. Под действием появляющейся силы сосуд начнет вращаться. Поверхность воды остается сперва плоской, какой она была до движения сосуда. Силой, постепенно действующей на воду, сосуд заставляет ее участвовать во вращении. При возрастании вращения вода отступает от середины сосуда и возвышается по его краям до тех пор, пока не станет обращаться в одинаковое время с сосудом, т. е. пока не придет по отношению к сосуду в относительный покой. Когда относительное движение воды в сосуде было наибольшее, ее поверхность оставалась плоской, и затем, когда относительное движение уменьшилось, повышение ее у стенок сосуда обнаруживало ее стремление удалиться от оси, и это стремление показывало ее постепенно возрастающее истинное вращательное движение, и когда оно стало наибольшим, то вода установилась в покое относительно сосуда.

Таким образом, это стремление не зависит от движения воды относительно окружающего тела, следовательно, по таким движениям нельзя определить истинного вращательного движения тела. Истинное круговое движение какого-либо тела может быть лишь одно в полном соответствии с силой стремления его от оси, относительных же движений, в зависимости от того, к чему

¹ И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 33.

² Там же.

они относятся, тело может иметь бесчисленное множество, но независимо от этих отношений движения совершенно не сопровождаются истинными проявлениями, если только это тело не обладает, кроме этих отношений, и указанным истинным движением»¹.

Минковский отметил интересный аспект ньютоновской механики. Он писал, что ее уравнения обнаруживают двойную инвариантность: их форма сохраняется, во-первых, при любом изменении положения координатной системы и, во-вторых, при каком-либо равномерном поступательном движении этой системы. Поскольку аксиомы геометрии мы привыкли считать установленными, эта «двойная» инвариантность, вероятно, редко формулируется вместе. В действительности же имеются две определенные группы преобразований дифференциальных уравнений механики. «Существование первой группы рассматривается как основной признак пространства. Ко второй группе охотнее всего относятся с презрением, чтобы легкомысленно пройти мимо того обстоятельства, что, исходя из физических явлений, никогда нельзя решить, не находится ли все-таки пространство, предполагаемое покоящимся, в равномерном поступательном движении. Указанные две группы ведут, таким образом, совершенно обособленное существование. Их совершенно разнородный характер, вероятно, и препятствовал объединению. Но как раз объединенная полная группа, как целое, дает пищу для нашей мысли»².

Далее Минковский отмечает, что из второй группы (G_c) в пределе при $c \rightarrow \infty$, т. е. из группы G_∞ получается полная группа преобразований, характерная для ньютоновской механики. В таком случае, учитывая, что G_c понятнее, чем G_∞ , математик мог бы прийти к мысли, что явления природы в конце концов действительно инвариантны не относительно группы G_∞ , но скорее относительно группы G_v с определенным конечным c . «Такое предвосхищение было бы необыкновенным триумфом чистой математики. Математика в этом вопросе не оказалась находчивой; все же для нее остается удовлетворение, что она благодаря своим более ранним счастливым

¹ И. Ньютон. Математические начала натуральной философии, стр. 33—34.

² Г. Минковский. Пространство и время. «Успехи физических наук», 1959, 59, стр. 303.

предшественникам с их дальновидным и острым умом в состоянии теперь сразу же охватить глубоко идущие следствия подобной перестройки нашего миропонимания»¹. В действительности же переход от группы G_{∞} к группе G_c требовал перестройки всей ньютоновской механики.

Можно отметить, что уже Декарт в письме к Мерсенну в октябре-ноябре 1631 г. писал о предельной скорости материальных тел. Он полагал, что камень имеет неодинаковую способность увеличивать количество движения или скорость, если он движется очень быстро и очень медленно. Позднее Лаплас, записывая количество движения в виде $mf(v)$, а кинетическую энергию в виде $\int mf'(v)dv$, как бы открыл новый закон динамики. У Декарта это вытекало из его представления о мере движения, в то время как у Лапласа — в силу математической тенденции к обобщению. Однако это не было переходом к G_c . Высказывание Декарта о предельной скорости материальных тел не получило какого-либо развития, однако к картезианским идеям относительности всякого движения неоднократно возвращались на протяжении XVII в., и в первую очередь к ним обращался Гюйгенс.

Гюйгенс и Лейбниц. На протяжении всей своей деятельности Гюйгенс усиленно интересовался проблемой относительности движения. При анализе его работ по механике до 1659 г., т. е. до его первых работ, посвященных центробежной силе, может показаться, что Гюйгенс отказывается обсуждать вопрос относительности движения. Однако, как на это указал уже Дюга, в 1656 г. Гюйгенс обращается к этим проблемам в связи с вопросом об определении местонахождения Земли, требующим рассмотрения каких-либо точек или тел в мировом пространстве, находящихся в покое.

В 1668 г. Гюйгенс усматривает существенную разницу между равномерным прямолинейным движением, для которого он подробно анализирует принцип относительности, и движением вращательным, по отношению к которому он не применяет этого принципа. В данном случае Гюйгенс отходит от картезианских представлений.

¹ Там же, стр. 305.

Выход в свет ньютоновских «Начал» вызывает у Гюйгенса трудно объяснимую реакцию. Гюйгенс возвращается ко многим картезианским представлениям, в том числе к утверждению об относительности всякого движения. Идеей относительности он часто пользовался не только в своих рассуждениях, но и во многих доказательствах.

В мемуаре «О движении тел под влиянием удара», опубликованном уже посмертно, в 1703 г., Гюйгенс не только дает определение относительного движения, но и прибегает к этому понятию для доказательства сохранения количества движения. Он сформулировал гипотезу: «Движение тел, а также их одинаковые или разные скорости надо рассматривать как относительные по отношению к другим телам, которые мы считали покоящимися, не учитывая того, что как те, так и другие тела могут участвовать в другом, общем движении. Поэтому два тела, соударяясь, даже в случае, если оба вместе участвуют еще в другом равномерном движении, для лица, также участвующего в общем движении, действуют друг на друга так, как будто бы этого общего движения не существовало»¹. Эта гипотеза играет роль аксиомы. По существу здесь сформулирован галилеевский, или классический, принцип относительности. Новое — в применении принципа относительности как метода исследования. В первом предложении (теореме) Гюйгенс показывает образец применения принципа относительности к удару шаров. Речь идет о доказательстве того, что если с покоящимся телом соударяется одинаковое с ним тело, то тело ударившее приходит в состояние покоя, а покоящееся приходит в движение со скоростью тела, ударившего в него. При доказательстве Гюйгенс, как и Галилей, стремится к механической рельефности. Идея относительности всякого движения — одна из основных идей, наиболее глубоко отличающая механику Гюйгенса от ньютоновской механики.

Бесконечное пустое пространство, покой и движение, отнесенные к нему, Гюйгенс не считает понятиями, которыми можно оперировать в механике. Аналогично тому как многие люди ошибаются, относя понятие «вверх» и

¹ Х. Гюйгенс Три мемуара по механике. М., Изд-во АН СССР, 1951, стр. 213—214.

«вниз» не к Земле и не к какому-либо телу, в той же мере ошибочны представления об абсолютном пространстве. «Бесконечному и пустому пространству,— говорит Гюйгенс,— не подходит ни идея и название движения, ни идея и название покоя. По-видимому, те, кто считает необходимым приписать ему покой, исходят только из нелепости приписывания ему движения. А ведь лучше было бы не приписывать такому пространству ни покой, ни движение. Поэтому нелепо приписывать телу истинный покой или истинное движение, огнося их к небесному пространству; последнее не может считаться неподвижным, изменение места в нем не может происходить. Определение и изменение места имеет смысл только по отношению к другим телам. Следовательно, тела движутся или покоятся лишь по отношению друг к другу»¹.

Свои мысли о центробежной силе и о вращательном движении Гюйгенс излагал неоднократно. Сама проблема в XVII в. не была новой, уже имела длительную историю. Ею интересовались еще мыслители античной древности, а затем и средневековья. Аристотель, например, не только подразделял пространственное или механическое движение на прямолинейное, или ограниченное, и криволинейное, или неограниченное, но, по мнению некоторых историков науки, он в «Проблемах механики» близко подошел к познанию центробежной силы. Много внимания вращательному движению и центробежной силе уделял Иоганн Кеплер, вся деятельность которого была посвящена борьбе за развитие и упрочение гелиоцентрического мышления. В «*Epitomae Astronomiae Copernicanae*» («Сокращение коперниковой астрономии») он возражал против мнения, что вращению Земли должно сопутствовать выбрасывание тел в воздух, как это происходит, например, с грязью на ободу колеса. Однако Кеплер не нашел, да и, по-видимому, специально не искал количественных закономерностей для центробежной силы.

Галилей сделал предметом своих «Бесед второго дня» вопрос о вращении Земли вокруг оси. Центробежная сила не может сбрасывать с поверхности Земли дома и людей — она ослабевает с возрастанием радиуса круго-

¹ Ch. Huygens Oeuvres complètes, t. XX1, p. 507.

вого пути, а поскольку величина земного радиуса велика, то силы тяжести оказываются достаточными для противодействия центробежной силе. Положение Галилея, что всякая сила определяет ускорение, связано с тем, что каждое изменение скорости и каждое изменение направления движения должно быть сообразовано с действием силы. Равномерное вращение на натянутой нити можно объяснить при этом лишь действием постоянной силы, отклоняющей тело от прямолинейного пути. Свое качественное и количественное решение проблема центробежной силы получила лишь в трудах Гюйгенса.

Для раскрытия взглядов Гюйгенса большое значение имел анализ многолетней переписки его с Лейбницем. Его убеждение в относительности всякого движения красной нитью проходит через всю переписку. Гюйгенс даже пишет, что ему удалось найти решение проблемы центробежных сил, но каково это решение, оставалось долго неизвестным, так как переписка оборвалась со смертью Гюйгенса.

В 1920 г. Кортвег, один из издателей собрания сочинений Гюйгенса, нашел четыре листа рукописи, которые пролили новый свет на всю проблему.

«Круговое движение,— писал Гюйгенс,— будет тоже относительным, точки движутся парами по взаимно противоположным параллельным прямым, непрерывно меняя эти направления, но сохраняя расстояние вследствие связи»¹. Итак, круговое движение тоже относительно. Трудность заключается в том, что относительный характер был скрыт тем обстоятельством, что это относительное движение не сопровождается изменением расстояния между соотнositельно движущимися точками. В этом проявилась динамическая относительность; речь шла о силах инерции как об эффекте относительного смещения двух противоположных точек вращающегося тела: это движение не реализуется из-за связей, но оно проявляется в силах инерции, стремящихся разорвать связи.

Гюйгенс не относит вращение ни к абсолютному пространству (Ньютон), ни к совокупности тел Вселенной (Мач). Значит, ответственные за силы инерции не реализованное абсолютное движение (Ньютон), не внутрен-

¹ Ch. Huygens. Oeuvres complètes, t. XXI, p. 507.

ная динамическая непротяженная субстанция тел (Лейбниц), не отдаленные массы (Мах), а относительное движение, которое проявляется не в изменении расстояний, а в возникновении центробежных сил.

Концепция относительности у Гюйгенса характеризуется не только своим негативным отношением к системе Ньютона, но и своими конструктивными особенностями. Она послужила для разработки всей его системы.

На конструктивный характер принципа относительности у Гюйгенса обратил внимание один из создателей современной квантовой физики Паули. В лекции, прочитанной им в Москве в 1937 г., он напомнил о споре по поводу меры движения в XVII в. и подробно изложил решение этого вопроса Гюйгенсом. Мысль Гюйгенса заключается в следующем. Если при ударе тел, входящих в систему, принять, что сохраняется лейбницевская мера движения, то, требуя, чтобы закон сохранения выполнялся и в системе отсчета, движущейся поступательно относительно системы тел, легко получить сохранение картезианской меры движения. Рассуждения Гюйгенса, связавшего два закона сохранения, могут быть обобщены. Если не исходить из определенной зависимости меры движения от скорости, а лишь постулировать ее сохранение, то принцип относительности позволяет однозначно получить выражения mv и mv^2 .

Великая заслуга Гюйгенса состоит в том, что в его руках принцип относительности был не только общим утверждением, но и мощным средством конкретных исследований, с одной стороны, и компасом при построении общей системы механики — с другой. Именно с этой точки зрения Гюйгенса следует назвать предшественником Эйнштейна, несмотря на двести с лишним лет, отделяющих их.

В ранних заметках (1668—1669) Лейбниц трактует пространство как субстанцию, а время — как величину движения. В вопросе о пространстве он не отклоняется от Декарта, а в вопросе о времени — от Аристотеля. В дальнейшем Лейбниц приходит к взгляду на пространство как на порядок положения, а время определяется как порядок по отношению к последовательным положениям. В полемике с Кларком Лейбниц разъясняет: «Пространственные представления вырабатываются у людей примерно следующим образом. Они наблюдают различ-

ные вещи, существующие одновременно, и находят в них определенный порядок сосуществования... Это их взаимное расположение или расстояние... Если предположить, что среди сосуществующих тел имеется достаточное число таких, которые не испытывают никакого изменения по отношению друг к другу, то о телах, вступивших с этим твердым элементом в такое отношение, которое раньше было присуще другим телам, можно сказать, что они сейчас находятся на месте других. Но совокупность всех этих мест называется пространством. Это показывает, что для образования понятия места и, следовательно, пространства достаточно рассматривать эти отношения и правила их изменения без необходимости представлять себе здесь абсолютную реальность вне вещей, расположение которых рассматривается...»¹ Лейбниц, как мы видим, вместо «абсолютного пространства» Ньютона вводит систему координат как систему твердых тел, сохраняющих свое положение друг по отношению к другу.

Менее уверенным было решение Лейбницем вопроса об относительности движения. Этот вопрос обсуждался им не только в полемике с Кларком (т. е. фактически с Ньютоном), но и ранее, в его переписке с Гюйгенсом. Признавая, что кинематическая относительность имеет место всегда, Лейбниц говорит, что каждое движущееся тело имеет какую-то «степень движения или, если угодно, силы, несмотря на эквивалентность гипотез», т. е. несмотря на то, что безразлично, считать ли тело *A* движущимся относительно *B* или наоборот. Отсюда следует, что не все сводится к геометрии и надо признать еще нечто высшее — силу. «Мы видим здесь Лейбница, — писал И. Б. Погребысский, — в роли защитника взглядов Ньютона против Гюйгенса, но защитника, так сказать, поневоле. Впрочем, он тут же говорит о наличии у него оснований полагать, что «ничто не нарушает общего закона эквивалентности», но каковы эти основания — об этом нет ни слова ни здесь, ни дальше. И когда Гюйгенс в следующих письмах подтвердил свою последовательно релятивистскую позицию, указав, что он нашел настоящее ее обоснование сравнительно недавно, Лейбниц поспешил его опять заверить в том, что считает «все гипотезы эк-

¹ «Пolemика Г. Лейбница и С. Кларка». Л., 1960, стр. 78.

вивалентными» и что если он, Лейбниц, приписывает определенные движения определенным телам, то только на том основании (и другого основания быть не может), что такое допущение проще остальных. Но и на этот раз Лейбниц не привел никаких аргументов, как не привел их и Гюйгенс»¹. В полемике с Кларком он также не привел доводов и не смог отстоять против Ньютона динамическую относительность, хотя и писал, что не находит у Ньютона доказательств реальности пространства самого по себе.

С позиций, противоположных Лейбницу, критиковал ньютоновские абсолютные пространство, время и движения субъективный идеалист Беркли. Как видно из сохранившегося дневника, вопросы пространства и абсолютного движения занимали его еще в молодости. В 1709 г. вышла в свет работа Беркли «Новая теория зрения», посвященная психологии восприятия, а в 1710 г. — «Трактат о началах человеческого знания». В 1721 г. Беркли публикует свою знаменитую книгу «De motu» («О движении»), в которой подверг критике основы механики Ньютона. В 75 параграфах этой небольшой по объему книги рассмотрены вопросы о причинах движения, его природе и передаче. Критикуя Ньютона, Беркли писал: «Абсолютное пространство называют бесконечным, неделимым, неоощущаемым, не имеющим отношения к чему-либо, не имеющим различия в своих частях. Таким образом, атрибуты абсолютного пространства оказываются отрицательными; отсюда оно есть чистое ничто (*tegitur nihil*). И что это за пространство, которое нельзя делить на части, которое нельзя измерить, которое нельзя ни воспринять чувствами, ни представлять в воображении?»

От критики абсолютного пространства Беркли переходит к критике абсолютного движения. «Если относительно всякое место, то относительно и всякое движение, так как движение не может быть понимаемо без определения его направления, которое в свою очередь не может быть фиксировано иначе, как по отношению к нашему или какому-либо другому телу. Вверх, вниз, вправо, влево — все направления и места основываются на отноше-

¹ И. Б. Погребыский. Готфрид Вильгельм Лейбниц. М., «Наука», 1971, стр. 283.

нии к чему-либо и необходимо предполагают существование другого тела, отличного от движущегося... Так как движение относительно по своей природе, то оно не может быть понято, пока не даны тела, по отношению к которым оно существует, ибо вообще никакое отношение не может существовать, если не существуют члены отношения».

Впоследствии, в 1730 г., в письме к Джонсону Беркли вновь подтверждает свою точку зрения: «В отношении пространства. У меня нет какого-либо иного понятия о пространстве, кроме как о таком, которое является относительным... Сэр Исаак Ньютон предполагает [существование] абсолютного пространства, отличного от относительного и являющегося его следствием, абсолютного движения, отличного от относительного движения; и вместе со всеми другими математиками он полагает, что конечные части этого абсолютного пространства бесконечно делимы... Я не колеблюсь употреблять слово «пространство», так же как и все другие слова в их общепринятом смысле, но я под этим не подразумеваю отдельного абсолютного существования».

С материалистической критикой ньютоновских представлений выступил Дж. Толанд. Толанд высказал положение о том, что движение — существенное свойство материи. Пространство и время связаны с движением. Работы Толанда были важным шагом в истории развития учения о пространстве и времени. В «Письмах к Серене» Толанд утверждает, что движение — основной способ бытия материи. Он выступает против признания за материей лишь протяженности, а также против понимания пустоты как абстракции от протяженности.

Толанд критикует ньютоновское учение об абсолютном пространстве как о вместилище вещей. Он пишет: «Я вполне сознаю, что вступаю в противоречие с общепринятым представлением и что, в частности, в вопросе о пространстве я как будто имею против себя мнение величайшего человека, величие которого не умалится и в том случае, если это его мнение окажется ошибочным, ибо его несравненные открытия все равно останутся непоколебимыми. Что до меня, то я не могу поверить в абсолютное пространство, отличное от материи и вмещающее ее в себя, как не могу поверить и тому, что есть абсолютное время, отличное от вещей, о длительности кото-

рых идет речь. А между тем принято думать, что г. Ньютон не только утверждает существование того и другого, но и сравнивает их друг с другом»¹.

Идеи Толанда оказали прямое, непосредственное влияние на французских материалистов и не прямое, опосредствованное — на развитие многих физических идей XVIII и XIX вв. В отличие от Толанда, Мопертюи вслед за Беркли и вопреки Ньютону доказывал, что понятие времени не имеет отношения к внешнему миру; Даламбер же считал, что время не создается последовательностью наших мыслей, обладая мерой, от них независимой. Эта независимая мера дана нам в движении тел. Даламбер делает и некоторые дальнейшие шаги. В очерке «Измерение», помещенном в «Энциклопедии», он писал, что один остроумный мыслитель из его знакомых думает, что и время можно рассматривать как четвертое измерение.

Эйлер и Ломоносов. Против субъективизма Беркли и рационализма Лейбница выступали одинаково последовательно Л. Эйлер и М. В. Ломоносов при всем различии их мировоззрения и аргументации. В монографии «Механика, или Наука о движении, изложенная аналитически» Эйлер одновременно с изложением созданных им методов, базирующихся на математическом анализе, подвергает глубокому анализу господствующие воззрения на пространство и время. Ему отчетливо ясна вся трудность многовековой проблемы «места». Эйлер определяет место как часть беспредельного, бесконечного пространства.

Хотя картезианский релятивизм и мог привлечь Эйлера своеобразной физической конкретностью, но, поскольку проблемы динамики не могли быть решены при отождествлении материи с протяженностью, Эйлер сосредоточивает усилия на обосновании и развитии именно ньютоновских представлений о пространстве и времени.

В 1748 г. Эйлер посвящает мемуар «Размышления о пространстве и времени» доказательству того, что понятия абсолютного пространства и времени нужны для обоснования законов инерции. У Эйлера инерция выводится из закона достаточного основания, но одновремен-

¹ Д. Толанд. Письма к Серене. В кн.: «Английские материалисты XVIII в. Собрание произведений в трех томах», т. 1. М., 1967, «Мысль», стр. 165.

но Эйлеру известно, что при этом выводе не вскрывается действительная физическая причина инерции. Однако он считает, что, анализируя движение изолированного тела в вакууме, нет необходимости обращаться к физическим причинам. Решающими являются причины физические, но именно выполнение в этом случае закона достаточно-го основания указывает на наличие этих причин. Абсолютное пространство было необходимо Эйлеру для формулировки закона сохранения состояния движения изолированного тела. При более детальном рассмотрении кинематической картины движущихся по инерции тел Эйлер переходит к реальным телам отсчета. Однако абсолютное движение Эйлером полностью не исключается.

У Ломоносова протяженность тел органически связана с самим существованием тел. Он считает бессмысленным самый вопрос и спор о «непротяженных частицах протяженного тела», так же как и вопрос о пустом пространстве. Сущность тела он видит не только в протяженности, но и в непроницаемости. Это представляло шаг вперед в развитии пространственно-временных представлений.

Борьба Ломоносова против концепции непротяженных монад Лейбница базировалась на отрицании возможности существования материальных тел вне пространства и времени.

Существенный вклад в учение о пространстве и времени внес Н. И. Лобачевский, раскрывший глубокие связи геометрических представлений с материальными процессами. — «В природе, — писал Лобачевский, — мы познаем собственно только движение, без которого чувственные впечатления невозможны. Итак, все прочие понятия, например геометрические, произведены нашим умом искусственно, будучи взяты в свойствах движения; а потому пространство само собой, отдельно, для нас не существует»¹. И далее: «Но в том, однако ж, нельзя сомневаться, что силы все производят одни: движение, скорость, время, массу, даже расстояния и углы»². Здесь под «силами» подразумевается по существу движущаяся материя.

¹ Н. И. Лобачевский. Сочинения, т. II. М.—Л., 1949, стр. 158—159.

² Там же, стр. 159.

Именно развитию идей Лобачевского в XIX в., как и работам Римана, Гельмгольца, очень многим обязана как специальная, так и в особенности общая теория относительности. Идеи Лобачевского и Римана открыли новый этап в развитии учения о пространстве и времени, выходящий, однако, за пределы классической механики и специальной теории относительности, который должен рассматриваться при анализе исторического развития общей теории относительности.

Метафизические стороны воззрения Ньютона на пространство и время были гипертрофированы в идеалистических системах Канта, Фихте, Гегеля, Шеллинга; материалистическая же сторона учения Ньютона о пространстве и времени была предана забвению. У Фейербаха дальнейшее развитие получили именно материалистические аспекты ньютоновской концепции, у него фигурируют не только протяженность и длительность, но и связи пространства и времени с движущейся материей. Материалистическую трактовку категории пространства и времени мы находим в трудах русских революционных демократов А. И. Герцена и Н. Г. Чернышевского.

В 1870 г. К. Нейман писал, что мы не знаем, как понимать «движение по прямой линии», поскольку эти слова можно объяснить различно. Действительно, движение, прямолинейное с точки зрения наблюдателя на Земле, покажется криволинейным, если его рассматривать с Солнца, с Юпитера или с какой-нибудь другой планеты. Всякое движение, прямолинейное по отношению к одной какой-либо системе отсчета, покажется криволинейным по отношению к другой системе отсчета, движущейся с ускорением. Слова Галилея о прямолинейном и равномерном движении материальной точки, предоставленной самой себе, кажутся Нейману бессодержательными, не имеющими определенного смысла.

Согласно Нейману, где-то во Вселенной должно быть дано специальное тело, по отношению к которому должны оцениваться все движения: тогда только слова Галилея получают определенный смысл. Трудность возникает при выяснении вопроса о том, существует ли одно такое тело или несколько различных тел. Должны ли движения, совершающиеся вблизи Земли, быть отнесенными к Земле, а движения, происходящие вблизи Солнца, быть отнесенными к Солнцу? Лучше всего согласно Нейману

принять, что все движения относятся к одному и тому же телу. Но на вопрос, где находится это тело, ответа нет. Поэтому первый принцип механики Галилея — Ньютона Нейман формулирует в следующем виде. В неизвестном месте Вселенной находится неизвестное тело, абсолютно твердое, вид и размеры которого неизменны во все времена. Под движением точки нужно понимать не изменение места относительно Земли или Солнца, но изменение места относительно этого тела. Мейерсон указал, что аналогичная концепция была уже сформулирована Эйлером, а еще ранее Ньютоном, который отверг ее после внимательного исследования.

В дальнейшем были выявлены многие трудности, органически присущие классической механике, но не были намечены пути их преодоления. В результате развития представлений о поле стал возможным отказ от понятия абсолютного пространства, но поиски решения в пределах самой механики (К. Нейман, Штрейнц, Ланге и др.) сыграли при этом лишь вспомогательную роль.

Под влиянием идеи Фарадея — Максвелла, пишет Эйнштейн, понятие поля развилось до такой степени, что «вся физическая реальность, вероятно, может быть представлена как поле, компоненты которого зависят от четырех пространственно-временных параметров. Если законы этого поля в общем ковариантны, т. е. не зависят от специального выбора координатной системы, то введение независимого (абсолютного) пространства уже не является необходимым. То, что образует пространственный характер реальности, представляет собой в этом случае просто четырехмерность поля. Поэтому не существует «пустого» пространства, т. е. нет пространства без поля»¹.

Связь пространства и времени, как коренных форм существования материи, глубоко и органически связанных друг с другом, оказалась точнее отраженной в специальной теории относительности, чем в классической механике; в еще большей мере эта связь нашла свое выражение в основных положениях общей теории относительности.

¹ А. Эйнштейн. О понятии пространства. «Вопросы философии», 1957, № 3, стр. 126.

В классической физике событиям приписывали время независимо от системы отсчета, с которой они связаны. В теории относительности пространство и время соединяются в пространство-время, но пространственно-временное единство отнюдь не приводит к отождествлению пространства и времени. «Неразделимость четырехмерного континуума событий совсем не означает эквивалентности пространственных координат временной координате. Наоборот, мы должны помнить, что временная координата определена физически совершенно иначе, чем пространственные координаты»¹.

Наряду с этим в теории относительности сама геометрия получает более глубокую физическую интерпретацию. Хотя Ньютон и писал, что геометрия базируется на механической практике и есть часть общей механики, геометрия у Ньютона всегда полностью совпадала с геометрией Евклида. Лишь у Лобачевского опыт может свидетельствовать об истинности различных геометрий. Уже специальная теория относительности своим законом сложения скоростей продолжала в этом смысле основные идеи Лобачевского.

Гносеологическим проблемам в учении о пространстве и времени уделили значительное внимание Энгельс и Ленин. В рассуждениях о пространстве и времени Е. Дюринг, эклектически сочетавший позитивизм, непоследовательный механический материализм и откровенный идеализм, не уяснил себе характера пространственных форм и количественных отношений, которыми оперировали в классической физике; при этом он стремился обойти и основной гносеологический вопрос об объективности пространства и времени. Энгельс дал глубокий анализ самой проблемы и показал полную несостоятельность дюринговской аргументации. Он писал: «Понятие числа и фигуры взяты не откуда-нибудь, а только из действительного мира... Как понятие числа, так и понятие фигуры заимствованы исключительно из внешнего мира, а не возникли в голове из чистого мышления. Должны были существовать вещи, имеющие определенную форму, и эти формы должны были подвергаться сравнению, прежде чем можно было дойти до понятия фигуры. Чистая мате-

¹ А. Эйнштейн. Сущность теории относительности. М., 1953, стр. 31.

матика имеет своим объектом пространственные формы и количественные отношения действительного мира, стало быть—весьма реальный материал. Тот факт, что этот материал принимает чрезвычайно абстрактную форму, может лишь слабо затушевать его происхождение из внешнего мира»¹.

Одновременно Энгельс критикует и эмпиризм в учении о пространстве и времени за игнорирование им роли и значения абстракции. «Это старая история,—пишет Энгельс.—Сперва создают абстракции, отвлекая их от чувственных вещей, а затем желают познать их чувственно, желают видеть время и обнять пространство. Эмпирик до того втягивается в привычное ему эмпирическое познание, что воображает себя все еще находящимся в области чувственного познания даже тогда, когда он оперирует абстракциями. Мы знаем, что такое час, метр, но не знаем, что такое время и пространство! Как будто время есть что-то иное, нежели совокупность часов, а пространство что-то иное, нежели совокупность кубических метров! Разумеется, обе эти формы существования материи без материи суть ничто, пустые представления, абстракции, существующие только в нашей голове»².

В дальнейшем австрийский физик и философ-идеалист Э. Мах, английский математик и биолог К. Пирсон, физико-химик В. Оствальд и многие другие выступали с критикой гносеологических позиций классической физики. Эта критика оstriем своим была направлена против материалистических истоков классической физики.

В. И. Ленин подверг глубокой критике кантианские, махистские и другие идеалистические представления о пространстве и времени. «Признавая существование объективной реальности, т. е. движущейся материи, независимо от нашего сознания, материализм неизбежно должен признавать также объективную реальность времени и пространства, в отличие, прежде всего, от кантианства, которое в этом вопросе стоит на стороне идеализма, считает время и пространство не объективной реальностью, а формами человеческого созерцания»³.

¹ Ф. Энгельс. Анти-Дюринг. М., 1967, стр. 33.

² Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955, стр. 187.

³ В. И. Ленин. Полное собрание сочинений, т. 18, стр. 181.

Открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции послужило основой развития электродинамики. Изучение магнитных и электрических явлений привело Фарадея к представлению о реально существующих силовых линиях поля. Он отказался от господствовавшей в то время точки зрения о «действии на расстоянии» и выдвинул представление о действии через среду — «мировой эфир». Одновременно Фарадей обратил внимание и на частные вопросы электродинамики движущихся тел. В 1838 г. он писал, что если подвесить заряженный шар и заставить его двигаться в определенном направлении, то эффект будет тождествен тому, как если бы мы возбуждали ток в направлении движения шара. Осуществить этот эксперимент Фарадею не удалось.

Развивая идеи Фарадея о роли диэлектрической среды и эфира, Максвелл выразил в математической форме сущность всей совокупности экспериментов, связанных с электромагнитными явлениями. Роль Максвелла не ограничивается глубокой теоретической разработкой идей Фарадея. Он записывает уравнение

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t},$$

которое в то время никакими опытами не подтверждалось. Это позволило Максвеллу прийти к волновому уравнению и к электромагнитной теории света. Гипотетические положения в теории Максвелла подвергались критике со стороны Герца, Больцмана, Пуанкаре и многих других физиков второй половины XIX в. Физики отказались от попыток наглядной механической интерпретации уравнений Максвелла. Признание определяющей роли среды в электромагнитных процессах, введение тока смещения как источника магнитного поля наряду с конвекционным током, констатация конечной скорости распространения электромагнитных взаимодействий — эти основные элементы теории Максвелла легли в основу всей электродинамики. В 1890 г. Герц опубликовал статью «Об основных уравнениях электродинамики для покоящихся сред»,

в которой уравнениям Максвелла был придан симметричный вид. «В 1890 г., — пишет Лауэ, — Генрих Герц придал закону индукции Фарадея форму дифференциального уравнения... Тем самым система уравнений Максвелла, в которой мы вместе с Герцем усматриваем сущность теории Максвелла, приняла такой эстетически совершенный симметричный вид, который, принимая во внимание всеобъемлющее физическое содержание системы, привлекает нас почти как очевидность»¹. Основные уравнения Максвелла могут быть разделены на две группы. Первая группа однородных уравнений связывает электрическое и магнитное поля:

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0, \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}.$$

Вторая группа связывает поля одно с другим и с распределением электрических зарядов и токов в пространстве:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho;$$

$\vec{E}(x, y, z, t)$ — напряженность электрического поля,

$H(x, y, z, t)$ — напряженность магнитного поля,

$\rho(x, y, z, t)$ — плотность электрического заряда.

$\vec{j}(x, y, z, t)$ — вектор плотности электрического тока.

Обе эти группы уравнений инвариантны относительно преобразований Галилея при переходе от одной инерциальной системы к другой. В 1900 г., через десять лет после того, как Герц и Хевисайд придали уравнениям Максвелла стройную математическую форму, Лармор нашел преобразование, по отношению к которому уравнения Максвелла в вакууме являются инвариантными. Эйнштейн и Инфельд, характеризую теорию Максвелла, писали, что законы Максвелла не связывают, как это имеет место в законе Ньютона, два широко разделенных события. «Они не связывают случившееся *здесь* с условиями *там*. Поле *здесь* и *теперь* зависит от поля в непосредственном соседстве в момент, только что протекший...

¹ М. Лауэ. История физики. М., 1956, стр. 64.

Изучение уравнений Максвелла с математической стороны показывает, что из них можно сделать новые и действительно неожиданные заключения, а всю теорию можно испытать на гораздо более высоком уровне, потому что теоретические следствия теперь имеют количественный характер и обосновываются всей цепью логических аргументов»¹.

Электродинамика покоящихся тел была завершена. Возникла проблема построения электродинамики и оптики движущихся тел. Еще до открытия электромагнитной теории света в оптике движущихся тел были выдвинуты три различные теории по вопросу об отношении эфира к движению тел, хотя сами представления об эфире оставались неясными и гипотетическими. Эти теории утверждали: 1) при движении тела эфир остается в покое; 2) при движении тела эфир полностью увлекается движущимся телом; 3) эфир частично увлекается движущимся телом.

Теория частичного увлечения эфира была единственной теорией, которая объясняла не только опыт с движущейся водой, но и те опыты, в которых оптические явления зависели от относительного движения тел друг относительно друга и не зависели от движения материальных тел по отношению к гипотетической среде — эфиру. В этих объяснениях было, однако, уязвимое место, которое весьма долго не замечали. Они опирались на предположение, что отношения между скоростью движения тела и скоростью света столь мало, что квадратом этого отношения можно пренебречь. Работы Максвелла и созданная им электромагнитная теория света выдвинули на первый план вопрос об электродинамике движущихся тел. Электродинамика движущихся тел и оптика движущихся тел слились в единую проблему, расчленение которой произошло лишь значительно позже.

Сформулировав основные положения электродинамики покоящихся сред, Герц приступил к анализу явлений в движущихся средах. Уже 7 марта 1890 г. мы находим в его дневнике запись о его размышлениях относительно уравнений электродинамики в движущихся средах. В том же году Герц публикует статью «Об основных уравне-

¹ А. Эйнштейн, Л. Инфельд. Эволюция физики. М., 1958, стр. 152.

ниях электродинамики для движущихся тел». Уравнения Максвелла в интегральной форме относятся к неподвижной в пространстве поверхности. Герц предполагает, что в движущейся системе отсчета уравнения Максвелла остаются справедливыми, но относятся к поверхности, жестко связанной с движущимися телами. Изменения потока через неподвижный контур и через движущийся контур различны. Для неподвижного контура изменения потока связаны с изменением поля со временем.

Для подвижного контура изменения потока связаны как с изменениями поля в данной точке, так и с изменениями, вызванными перемещениями контура. При этих предположениях Герц приходит к системе уравнений

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{1}{c} \left\{ \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \operatorname{rot} [\vec{D} \vec{u}] + \vec{u} \operatorname{div} \vec{D} + 4\pi \vec{J} \right\};$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \left\{ \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \operatorname{rot} [\vec{B} \vec{u}] \right\}; \operatorname{div} \vec{D} = \rho, \operatorname{div} \vec{B} = 0;$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \vec{B} = \mu \vec{H}, \vec{J} = \sigma \vec{E}.$$

В отличие от уравнений Максвелла уравнения Герца инвариантны относительно преобразований Галилея.

Л. И. Мандельштам отметил особенности инвариантности уравнений Герца относительно преобразований Галилея. Поверхность движется вместе с телом, и если мы перемещаемся вместе с телом, то поверхность относительно нас неподвижна; следовательно, в любой системе отсчета, которая перемещается вместе с телами, справедливы уравнения Максвелла. «Если система движется не поступательно, а вращается, но как одно целое (скажем, как Земля вместе с Вами и со всеми вашими приборами), то относительно Вас по-прежнему все неподвижно. А это означает, что в противоположность уравнениям механики уравнения Герца инвариантны относительно любого вращения и вообще любого ускоренного движения рассматриваемой системы как твердого тела»¹. То, что уравнения Герца удовлетворяют более общему принципу относительности, чем уравнения классической механики, отнюдь не усиливает эту теорию. В теории Герца в

¹ Л. И. Мандельштам. Полное собрание трудов, т. V, стр. 130.

члене $\text{got}[\vec{Du}]$ скорость $\vec{u}$ должна быть отнесена к эфиру. Эфиру следует приписать ту же скорость, что и телу, т. е. предположить, что эфир полностью увлекается движущимися телами. При этом теория приходит в противоречие с явлениями абберации и опытом Физо. По иному пути — по пути построения теории неподвижного эфира шел Г. А. Лоренц. В 1875—1885 гг. Лоренц уделял большое внимание фундаментальным проблемам электродинамики и оптики движущихся тел. Лоренц тщательно анализирует теорию неподвижного эфира.

В работе 1892 г. «Электромагнитная теория Максвелла и ее применение к движущимся телам» Лоренц писал: «Я буду называть веществом все то, что может принимать участие в электрических токах, электрических смещениях и электромагнитных движениях. Термин «эфир» будет применяться ко всему, не являющемуся весомой материей»¹. В этой работе Лоренц разрабатывает основы новой теории, названной в дальнейшем электронной.

В теории Максвелла основное внимание было перенесено с зарядов на пространство между зарядами. У последователей Максвелла заряд стал характеризоваться как мера потока, пронизывающего поверхность, окружающую заряд. Согласно теории Лоренца все тела состоят из положительно и отрицательно заряженных частиц. В диэлектриках молекулы нейтральны и разноименные заряды связаны между собой почти квазиупругими силами. В проводниках заряженные частицы могут свободно перемещаться от столкновения к столкновению. Новизна теории состояла в том, что взаимодействие в соответствии с теорией Максвелла предполагалось распространяющимся с конечной скоростью. Вебер и Клаузиус развивали учение об атомарности электричества. Однако силы, действующие между атомами электричества, рассматривались как результат взаимодействия самих атомов, зависящего лишь от взаимного расположения, скорости и ускорения частиц. В 1892 г. Лоренц публикует еще одну работу, в которой появляется гипотеза о сжатии всех тел в направлении движения. Поскольку формы и размеры твердого тела определяются действием меж-

¹ Цит. по: С. Гольдберг. Теория Лоренца и теория Эйнштейна. «Успехи физических наук», 1970, 102, стр. 265.

молекулярных сил, то в изменении последних в результате движения сквозь эфир Лоренц видит причину сжатия тел. Лоренц исходил при этом из стремления сочетать результаты опыта Майкельсона — Морли с теорией Френеля — Лоренца, принимавшей гипотезу неподвижного эфира. В 1895 г. Лоренц публикует свою книгу «Опыт теории электрических и оптических явлений в движущихся телах», в которой несколько видоизменяет представления об абсолютно покоящемся эфире. «Само собой разумеется, что не может быть и речи об абсолютно покоящемся эфире; такое утверждение совершенно бессмысленно. Когда я говорю, для краткости, о покоящемся эфире, я имею в виду лишь то, что одна его часть не смещается относительно другой и что все возможные движения весоных тел совершаются относительно эфира»¹. Лоренц предложил новое преобразование для времени

$$t' = t - \frac{vx}{c^2},$$

где v — скорость движения системы отсчета относительно эфира, x — координата той точки в движущейся системе, в которой произведено измерение времени. Время t' Лоренц назвал «локальным временем». Анализируя работу Лоренца 1895 г., С. Гольдберг писал: «Если считать эту работу Лоренца 1895 г. предшествующей теории относительности, как это делает ряд авторов, или по крайней мере основной из тех работ, которые использовал Эйнштейн при разработке своей теории, можно было бы ожидать найти хоть какую-нибудь формулировку принципа относительности. Но этой формулировки в них нет. «Причина этого чрезвычайно проста. В теории Лоренца принцип относительности справедлив не строго, а только в приближении первого порядка по v/c . Тогда можно было еще надеяться обнаружить эффект движения Земли относительно эфира в экспериментах, достаточно чувствительных для регистрации эффектов второго порядка по v/c . Как мы далее покажем, принцип относительности не является важным для теории Лоренца. Необходимо,

¹ Цит. по: С. Гольдберг. Теория Лоренца и теория Эйнштейна. «Успехи физических наук», 1970, 102, стр. 265.

чтобы этот принцип удовлетворялся, поскольку этого как будто требует эксперимент, но до 1905 г. Лоренц не уделял этому достаточного внимания, хотя ему и были известны пожелания других ученых, чтобы его теория удовлетворяла этому принципу. Первым, кто высказал эту мысль, был Анри Пуанкаре¹.

В 1904 г. Лоренц опубликовал работу «Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света». В первую очередь Лоренц отмечает, что, стремясь определить на основании теоретических соображений влияние, оказываемое поступательным движением на электрические и оптические явления, просто достигают цели в тех случаях, когда рассматриваются величины, пропорциональные v/c . Те случаи, в которых могут быть обнаружены величины второго порядка отношения скорости поступательного движения к скорости света $(v/c)^2$, представляют более значительные трудности. Лоренц приводит интерференционный опыт Майкельсона, опыты Троутона и Нобля, пытавшихся обнаружить момент количества движения, действующего на заряженный конденсатор, пластины которого образуют некоторый угол с направлением поступательного движения, т. е. опыты второго порядка, послужившие основанием для новой обработки вопросов, связанных с движением Земли. Он приводит возражения Пуанкаре против введения новых гипотез каждый раз, когда становятся известными новые факты.

Эйнштейн пришел к специальной теории относительности в результате глубокого анализа физических процессов, относящихся к электромагнитным и оптическим явлениям в движущихся телах, и анализа самого процесса измерения физических величин. Свою основополагающую работу «К электродинамике движущихся тел» Эйнштейн начал словами: «Известно, что электродинамика Максвелла в современном ее виде приводит в применении к движущимся телам к асимметрии, которая несвойственна, по-видимому, самим явлениям»². В качестве примера он рассматривает электродинамическое взаимодействие между магнитом и проводником с током. Наблюдаемое

¹ Там же, стр. 266—267.

² А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. 1, стр. 7.

явление взаимодействия должно определяться лишь их относительным движением. Согласно господствовавшим представлениям строго разграничивались случаи, когда движется либо одно, либо другое из этих тел, «...если движется магнит, а проводник покоится, то вокруг магнита возникает электрическое поле, обладающее некоторым количеством энергии, которое в тех местах, где находятся части проводника, порождает ток»¹. При движении проводника, если магнит находится в покое, вокруг магнита не возникает никакого электрического поля. В проводнике зато возникает электродвижущая сила, «которой самой по себе не соответствует никакая энергия, но которая — при предполагаемой тождественности относительного движения в обоих интересующих нас случаях — вызывает электрические токи той же величины и того же направления, что и электрическое поле в первом случае»². Примеры подобного рода и неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно эфира приводят к предположению, «что для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, справедливы те же самые электродинамические и оптические законы, как это уже доказано для величин первого порядка»³. Эйнштейн не упоминает, о каких неудавшихся попытках обнаружить движение Земли относительно «светоносной среды» идет речь. Он вводит две предпосылки: одна из них — вышеупомянутое предположение, превращенное в предпосылку, содержание которого он в дальнейшем назвал «принципом относительности», и вторая — что свет в вакууме всегда распространяется с определенной скоростью, не зависящей от «состояния движения излучающего тела». Эйнштейн полагает, что недостаточное понимание того обстоятельства, что суждения всякой теории касаются соотношений между координатными системами, часами и электромагнитными процессами, явилось истоком трудностей в электродинамике движущихся тел. В первой главе Эйнштейн анализирует кинематическую часть — основу специальной теории относительности в целом.

¹ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. I, стр. 7.

² Там же.

³ Там же.

В 1905 г. в работе «К электродинамике движущихся тел» Эйнштейн рассмотрел вопрос о преобразовании уравнений Максвелла — Герца для вакуума. В покоящейся системе уравнения Максвелла — Герца имеют вид

$$\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}, \quad \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y}.$$

Применив преобразования Лоренца и отнеся электромагнитные процессы к системе, движущейся со скоростью v относительно покоящейся системы, получаем новую, отличную по форме систему уравнений

$$\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial \tau} = \frac{\partial \beta \left(H_z - \frac{v}{c} E_y \right)}{\partial \eta} - \frac{\partial \beta \left(H_y + \frac{v}{c} E_z \right)}{\partial \xi},$$

$$\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial H_x}{\partial \tau} = \frac{\partial \beta \left(E_y - \frac{v}{c} H_z \right)}{\partial \xi} - \frac{\partial \beta \left(E_z + \frac{v}{c} H_y \right)}{\partial \eta},$$

где $\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$

Согласно принципу относительности уравнения Максвелла — Герца, справедливые в покоящейся системе, должны быть справедливы и сохранить свою форму в системе, движущейся с постоянной скоростью:

$$\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial E'_x}{\partial \tau} = \frac{\partial H'_z}{\partial \eta} - \frac{\partial H'_y}{\partial \xi}, \quad \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial H'_x}{\partial \tau} = \frac{\partial E'_y}{\partial \xi} - \frac{\partial E'_z}{\partial \eta}.$$

Отсюда

$$E'_x = E_x, \quad H'_x = H_x,$$

$$E'_y = \frac{E_y - \frac{v}{c} H_z}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad H'_y = \frac{H_y + \frac{v}{c} E_z}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$E'_z = \frac{E_z + \frac{v}{c} H_y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad H'_z = \frac{H_z - \frac{v}{c} E_y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

«Мы видим,— пишет Эйнштейн,— что в изложенной теории электромоторная сила играет роль вспомогательного понятия, которое своим введением обязано тому обстоятельству, что электрические и магнитные поля не существуют независимо от состояния движения координатной системы»¹.

Далее Эйнштейн рассмотрел преобразование Максвелла — Герца с учетом конвекционных токов.

Совершив необходимые преобразования и показав, что уравнения сохраняют свою форму, а вектор скорости электрического заряда (u_x, u_y, u_z) переходит в вектор скорости (u'_x, u'_y, u'_z) , Эйнштейн писал: «Таким образом, как это и следует из теоремы сложения скоростей, вектор (u'_x, u'_y, u'_z) есть не что иное, как скорость электрических зарядов, измеренная в системе K . Тем самым показано, что электродинамическая основа лоренцовской электродинамики движущихся тел подчиняется принципу относительности, если исходить из наших кинематических принципов»².

Затем Эйнштейн отмечает, что из доказанных уравнений можно вывести важную теорему: «Если электрически заряженное тело движется в пространстве произвольно и если его заряд, наблюдаемый из координатной системы, движущейся вместе с этим телом, при этом не изменяется, то этот заряд остается неизменным и при наблюдении из «покоящейся» системы K »³.

В 1906 г. Эйнштейн публикует работу «О методе определения соотношения между поперечной и продольной массами электрона». Абрагам, исходя из представления о сферическом электроны, не изменяющем при движении своей формы, вывел выражения для продольной и поперечной массы. Он нашел, что при прямолинейном перемещении электрона вызванное им поле действу-

¹ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. I, стр. 25.

² Там же, стр. 31.

³ Там же.

ет на него с силой, пропорциональной его ускорению и направленной обратно направлению этого ускорения. Множитель, имеющий характер массы, назвали продольной электромагнитной массой электрона. При рассмотрении равномерного криволинейного движения приходят к представлению о поперечной электромагнитной массе. Лоренц заменил представление о сферическом электроне, не претерпевающем деформации, гипотезой о деформируемом электроне. Электроны при своем движении должны принять вид сплюснутых эллипсоидов вращения. А. Бухерер считал, что при движении шарик, не изменяя своего объема, деформируется так, что поверхность его оказывается эквипотенциальной, а шарик принимает форму сплюснутого эллипсоида. Работы Кауффмана 1902—1906 гг. свидетельствовали в большей мере в пользу Абрагама. В указанной работе Эйнштейн говорил о необходимости эксперимента и предложил метод его осуществления. В 1907 г. Эренфест писал, что лоренц-инвариантная электродинамика в формулировке Эйнштейна должна дать чисто дедуктивный ответ на вопрос о твердом или деформируемом электроне. Эйнштейн возразил Эренфесту, что принцип относительности вместе с принципом постоянства скорости света следует понимать не как систему, а как эвристический принцип. «Все остальное — писал Эйнштейн, — теория относительности дает только потому, что она требует существования связей между явлениями, которые раньше казались независимыми. Например, теория движения электрона получается следующим образом. Предполагают, что в некоторой пространственно-временной системе отсчета справедливы уравнения Максвелла для пустоты. Применяя преобразования пространства-времени, даваемые теорией относительности, находят формулы преобразования для напряженностей электрического и магнитного полей. С помощью этих формул, снова выполняя преобразование пространства-времени, из закона ускорения медленно движущегося электрона (который постулируется или берется из опыта) находят закон ускорения электрона, движущегося сколь угодно быстро. Следовательно, здесь речь идет совсем не о «системе», в которой неявно содержались бы отдельные законы, выводимые из нее простой дедукцией, но всего лишь о принципе, который позволяет

(подобно второму закону термодинамики) свести одни законы к другим»¹.

Таким образом, Эйнштейн выяснил взаимоотношения принципа относительности и электродинамики специальной теории относительности.

В работе 1907 г. «О принципе относительности и его следствиях», во второй ее главе, Эйнштейн вновь подчеркивает, что напряженность электрического и магнитного поля сама по себе не существует, ибо от выбора системы координат зависит, есть ли в пространственно-временной окрестности точечного события электрическое или магнитное поле. Можно также прийти к выводу, что «пондеромоторные» силы, действующие на электрические заряды, движущиеся в магнитном поле, представляют собой электрические силы, если ввести систему отсчета, покоящуюся относительно рассматриваемого заряда.

В 1908 г. Г. Минковский опубликовал статью, посвященную электромагнитным явлениям в движущихся телах. Он отмечает, что основания теории Герца противоречат опыту. Опубликованная в 1895 г. Лоренцем теория электрических и оптических явлений в движущихся телах, базирующаяся на атомистических представлениях об электричестве, привела к существенным результатам, оправдывающим ее смелые результаты. Для первоначальных уравнений Лоренца ковариантность по отношению к преобразованию Лоренца есть чисто математический факт, который Минковский называет *теоремой относительности*. Эта теорема существенно базируется на форму дифференциального уравнения для распространения волн со скоростью света. Теперь, отмечает Минковский, можно ожидать, что, не прибегая к определенным гипотезам о взаимосвязи электричества и материи, эта математически ясная теорема относительности распространит свои выводы столь далеко, что еще неизвестные законы в отношении движущихся тел окажутся лоренц-ковариантными. Убеждение в лоренц-ковариантности еще не открытых законов Минковский называет *постулатом относительности*. Это идентично постулированию выполнения закона сохранения энергии для не исследованных еще форм энергии. Принцип относительности есть взаи-

¹ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. I, стр. 51—52.

мозависимость между наблюдаемыми величинами, характеризующими движущиеся тела, взаимозависимость, удовлетворяющая ожидаемой ковариантности¹.

Лоренц,— писал Минковский,— нашел теорему относительности и создал постулат относительности как гипотезу о сокращении электронов и материи в процессе их движения по определенному закону. Эйнштейн показал, что в постулате относительности речь идет не о гипотезе сокращения тел, но о новой трактовке времени. Согласно утверждению Минковского принцип относительности в электродинамике движущихся тел не был до него сформулирован. Для идеального случая ($\epsilon=1$, $\mu=1$, $\sigma=0$) Минковский записывает основные уравнения в четырехмерной форме. Эта форма записи позволяет показать применимость «теоремы относительности Лоренца».

Во второй части своей работы Минковский рассмотрел основные уравнения электромагнитных явлений покоящихся тел в материальной среде. Этим уравнением также придана четырехмерная форма записи.

Ход рассуждений Минковского для движущихся сред весьма наглядно изложил Зоммерфельд.

Наряду с непосредственным доказательством Эйнштейна ковариантности уравнений Максвелла по отношению к преобразованиям Лоренца и доказательствами Минковского существуют и другие способы доказательства и изложения².

Один из изящных методов состоит в установлении функции действия для заряда в электромагнитном поле и функции действия для самого поля. Действие для заряда (электрона) в электромагнитном поле имеет вид

$$S = \int_a^b \left(-mc ds + \frac{e}{c} A_\mu dx_\mu \right). \quad (1)$$

функция A_μ — четырехмерный потенциал. Три пространственные координаты A^μ образуют трехмерный вектор $\vec{A}$ — векторный потенциал; временная компонента $A^0 = \varphi$ есть скалярный потенциал. Записав произведения

¹ См.: *H. Minkowski*, Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge. «Gesammelte Abhandlungen», Bd. II, 1911, S. 352—404.

² См.: *Л. Ландау и Е. Лифшиц*, Теория поля, М., 1967, стр. 93 и след.

в подынтегральном выражении (1) в развернутом виде и учитывая, что $ds = c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} dt$, получают

$$S = \int_c^b \left(-mc^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + \frac{e}{c} \vec{A} \vec{v} - e\varphi \right) dt. \quad (2)$$

Подынтегральное выражение в формуле (2) есть функция Лагранжа и описывает взаимодействие заряда с полем. Взяв производную от функции Лагранжа по времени, получают выражение для обобщенного импульса

$$\vec{P} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{e}{c} \vec{A} = \vec{p} + \frac{e}{c} \vec{A}. \quad (3)$$

Функция Гамильтона частицы в поле

$$H = \vec{v} \frac{\partial L}{\partial \vec{v}} - L = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + e\varphi. \quad (4)$$

Дифференциальные уравнения движения заряда в электромагнитном поле, выраженные в четырехмерной форме, можно получить из принципа наименьшего действия

$$\delta S = \delta \int_a^b \left(-mc ds + \frac{e}{c} A_\mu dx_\mu \right) = 0. \quad (5)$$

Эти уравнения имеют вид

$$mc \frac{du_i}{ds} = \frac{e}{c} \left(\frac{\partial A_k}{\partial x_i} - \frac{\partial A_i}{\partial x_k} \right) u_k; \quad (6)$$

$\frac{\partial A_k}{\partial x_i} - \frac{\partial A_i}{\partial x_k} = F_{ik}$ — тензор электромагнитного поля.

$F_{ik} = -F_{ki}$, $F_{ik} = 0$, если $k = i$.

$$m \frac{du_i}{ds} = \frac{e}{c} F_{ik} u_k. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет получить релятивистские дифференциальные уравнения движения заряда в проекциях на оси координат, а также в векторной форме.

Компоненты тензора электромагнитного поля могут быть выражены через напряженности магнитного и электрического поля (H и E):

$$\begin{aligned} F_{12} &= -F_{21} = H_z, & F_{13} &= -F_{31} = -H_y; \\ F_{14} &= -F_{41} = -iE_x, \\ F_{23} &= -F_{32} = H_x, & F_{24} &= -F_{42} = -iE_y, \\ F_{34} &= -F_{43} = -iE_z. \end{aligned}$$

Таким путем можно составить матрицу тензора электромагнитного поля.

Из соотношений инвариантности вытекает, что если напряженности электрическая и магнитная равны нулю в одной инерциальной системе, то они равны нулю в любой другой инерциальной системе. Если в одной инерциальной системе напряженности E и H возрастают или убывают, то в любых других они будут возрастать или убывать. Если в одной системе $E > H$ или $E < H$, то эти неравенства сохраняются во всех инерциальных системах. Для оптики движущихся тел это имеет то значение, что фаза электромагнитной световой волны есть величина инвариантная. Если $\vec{E}\vec{H} = 0$, то можно найти такую инерциальную систему, в которой $E = 0$ или $H = 0$.

Литература

К главе I

Основные явления оптики движущихся тел

1. *R. Wolf*. Geschichte der Astronomie. München, 1877.
2. *J. Picard*. Voyage d'Uranibourg, où observations astronomiques, faites en Dannemarck. Paris, 1680.—*R. Hook*. An attempt astronomicque to prove the motion of the earth. London, 1674.—*J. Flamsteed*. Epistola ad D. Wallisimum Dec. 20, 1698. De parallaxi Orbis Annui Telluris Observata. В кн.: *J. Wallis*. Operum mathematicorum. VIII, Oxoniae, p. 701—708.
3. *J. B. Delambre*. Histoire de l'astronomie au dix-huitième siècle. Paris, 1827.
4. *G. Sarton*. Discovery of the aberration of light. Isis, 1931, 16, p. 233—239.
5. *J. Lalande*. Astronomie, v. III, Paris, 1792, p. 95.
6. *J. Michell*. On the means of discovering the distance, magnitude of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their light... Phil. Trans., 1784, 74, p. 35.
7. *Th. Young*. Experiments and calculations relative to physical optics. Phil. Trans., 1804, 94, p. 1—16.
8. *A. Fresnel*. Ann. d. chim. et d. phys., 1818, 9, p. 57. Русский перевод в кн.: *О. Френель*. Избранные труды по оптике. М., 1955, стр. 516.
9. *G. B. Airy*. On a supposed alteration in the amount of astronomical aberration of light, produced by the passage of light through a considerable thickness of refracting medium. Phil. Mag., 1872, 43, p. 310.
10. *G. Stokes*. On the aberration of light. Phil. Mag., 1845, 27, p. 9—15; On the constitution of the luminiferous aether, viewed with reference to the phenomenon of the aberration of light. Phil. Mag., 1846, 28, p. 6—10; On Fresnel's theory of the aberration of light. Phil. Mag., 1846, 28, p. 76—81, On the constitution of luminiferous aether. Phil. Mag., 1848, 32, p. 343—349.
11. *H. A. Lorentz*. Stoke's theory of aberration in the supposition of a variable density of the aether. Proc. Acad. Amster., 1899, 1, p. 443—448.
12. *R. Tomaschek*. Über Aberration und Absolutbewegung. Ann. Phys., 1924, 74, S. 136—145; Über die Aberration. Zs. Phys., 1925, 32, S. 397—402.—*H. Osten*. Aberration und Relativität. Astr. Nach., 1925, 224, S. 65—68.—*P. Lenard*. Ueber Äther Bewegungen und

- Aberration. Astr. Nach., 1925, **224**, S. 345—356.—*С. Б. Лукьянов*.
Аберрация света. Астроном. жур., 1953, **30**, стр. 302—314.
13. *H. Thirring*. Relativität und Aberration. Naturwiss., 1925, **13**, S. 445—447; Bemerkung zu einem Einwand gegen die specielle Relativitätstheorie. Z. Phys., 1924, **30**, S. 63—65; 1925, **33**, S. 153—154; Relativität und Aberration. Z. tech. Phys., 1925, **6**, S. 561—563.—*R. Emden*. Aberration und Relativitätstheorie. Z. tech. Phys., 1925, **6**, S. 561—563.—*R. Emden*. Aberration und Relativitätstheorie. Naturwiss., 1926, **14**, S. 329—335.—*W. Franz*. Zur Frage der Lichtaberration und des Doppler-Effektes. Z. Phys., 1936, **100**, S. 267—268.—*Г. М. Идлус*. К вопросу об аберрации света. Астроном. жур., 1954, **31**, стр. 81—84.
 14. *A. Kopff*. Über eine Möglichkeit der Prüfung der speziellen Relativitätstheorie auf astronomische Wege. Phys. Z., 1922, **23**, S. 120—121.
 15. *Y. Villarceau*. 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. C. R., 1872, **75**, p. 854—860.
 16. *P. Epstein*. Zur Aberrationstheorie. Phys. Z., 1923, **24**, S. 64—65.
 17. *A. Beer*. Ueber Aberration des Lichtes. Ann. Phys., 1854, **93**, S. 213—223; Ueber die Vorstellungen vom Verhalten des Ethers in bewegten Mitteln. Ann. Phys., 1855, **94**, S. 428—434.
 18. *E. Ketteler*. Astronomische Undulationstheorie oder die Lehre von der Aberration des Lichtes. Bonn. 1873.
 19. *W. Veltmann*. Ueber die Fortpflanzung des Lichtes in bewegten Medien. Ann. Phys., 1873, **150**, S. 497—535.
 20. *M. Hoek*. Determination de la vitesse avec laquelle est entraînée une onde lumineuse traversant un milieu en mouvement. Arch. Neerl., 1868, **3**, p. 180—185; 1869, **4**, p. 443—450.
 21. *E. Mascart*. Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur. Ann. sci. école norm., 1872, **1**, p. 155—214; 1874, **3**, p. 363—420; C. R. 1874, **79**, p. 1531—1534.
 22. *J. W. Rayleigh*. Is rotatory polarisation influenced by the Earth's motion? Phil. Mag., 1902, **4**, p. 215—220.
 23. *D. B. Brace*. The aether drift and rotatory polarisation. Phil. Mag., 1905, **10**, p. 383—396.
 24. *D. B. Brace*. A répétition of Fizeau experiment on the change produced by earth's motion on the rotation of a refracted ray. Phil. Mag., 1905, **10**, p. 591—599.
 25. *B. Strasser*. Der Fizeausche Versuch über die Anwendung des Polarisationsazimut eines gegebenen Strahles durch die Bewegung der Erde. Ann. Phys., 1907, **24**, S. 137—144.
 26. *H. Fizeau*. Sur les Hypothèses relatives à l'éther lumineux et sur un experiment qui parait demontrer, que le mouvement des corps change la vitesse, avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur. C. R., 1851, **33**, p. 349—355; Ann. d. chim. et phys., 1859, **57**, p. 385—404.
 27. *A. A. Michelson, E. W. Morley*. Influence of motion of the medium on the velocity of light. Amer. J. Sci., 1886, **31**, p. 377—386.
 28. *P. Zeeman*. Experiences sur la propagation de la lumière dans les milieux liquides ou solides en mouvement. Versl. Akad. Amster., 1914, **23**, p. 245; Arch. Neerl., 1927, (3a), **10**, p. 131—220.
 29. *H. A. Lorentz*. De l'influence du mouvement de la terre sur les phe-

- nomènes lumineux. Versl. Akad. Amster., 1886, 2, p. 297; Arch. Neerl., 1887, 21, p. 103.
30. *F. Harress*. Die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern. Dissertation, Jena, 1912.
 31. *P. Harzer*. Über die Mitführung des Lichtes in Glas und Aberration. Astr. Nach., 1914, 198, S. 378—391.
 32. *O. Knopf*. Die Versuche von Harreß über die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern. Ann. Phys., 1920, 62, S. 389—447.
 33. *А. Эйштейн*. Замечания к статье П. Гардера. «Увлечение света в стекле и aberrация». Собрание научных трудов т. I, М., 1965, стр. 313—316.
 34. *Chr. Doppler*. Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger andern Gestirne des Himmels. Abh. Böhm. Ges., 1842, 2, S. 465—482.
 35. *B. Bolzano*. Ein paar Bemerkungen über die neue Theorie in Herrn Prof. Doppler's Schrift «Ueber das farbige Licht...» Ann. Phys., 1843, 60, 83—88.
 36. *Ch. H. D. Buijs-Ballot*. Akustische Versuche auf der Niederländischen Eisenbahn, nebst gelegentlichen Bemerkungen zur Theorie des Prof. Doppler. Ann. Phys., 1845, 66, S. 321—351.
 37. *H. Fizeau*. Sur les phénomènes que présente le son lorsque le corps sonore ou l'observateur sont en mouvement, et sur les phénomènes correspondants que doit présenter la lumière. L'Institut, 1849, 17, p. 11.
 38. *W. Huggins*. Observations on the spectra of some of the stars and nebulae. Phil. Trans., 1868, 158, p. 529—564.
 39. *C. H. Vogel*. Spektralanalytische Untersuchungen an der Sonne. Astr. Nach., 1872, 78, S. 248—250; 1873, 82, S. 291—298.
 40. *Ch. Young*. Observations on the displacement of lines in the solar spectrum caused by the sun's rotation. Amer. J. Sci., 1876, 12, p. 321—328.
 41. *L. Thollon*. Déplacement de raies spectrales due au mouvement du Soleil. C. R., 1879, 88, p. 169—171.
 42. *A. Belopolsky*. Experiment basé sur le principe Doppler-Fizeau. Mem. Soc. Spettoscop. Ital., 1894, 23, p. 122—124.
 43. *A. Belopolsky*. Ein Project zur Reproduction der Verschiebung von Spektrallinien bewegten Lichtquellen. Astr. Nach., 1895, 137, S. 33—36.
 44. *A. Angstrom*. Ann. Phys., 1855, 94, S. 141—165.
 45. *А. А. Белопольский*. О принципе Допплера. «Известия русского астроном. общества», 1899, 6, стр. 314—321.
 46. *А. А. Белопольский*. Опыт исследования принципа Допплера—Физо, не прибегая к космическим скоростям. «Известия Академии наук», 1900, 13, № 5, стр. 461—472.
 47. *П. Н. Лебедев*. О движении звезд по спектроскопическим исследованиям. «Труды отд. физич. наук об-ва любителей естествознания», т. V, 1892».
 48. *О. Д. Хвольсон*. Как определяется скорость светил, движение которых непосредственно не может быть наблюдаемо? «Научное обозрение», 1895.
 49. *Б. Б. Голицын*. К теории расширения спектральных линий. «Известия Академии Наук», 1895, 2, № 5, стр. 397—408; Избранные труды, т. I, М., 1960, стр. 42.
 50. *B. Golitzin, J. Wilip*. Spektroskopische Untersuchungen. Записки

- АН по физико-математическому отд., 1906, XVII, № 6, стр. 1—112; 1907, XIX, № 9, стр. 1—38; 1909, XXII, № 1, стр. 1—106.
51. См. *G. S. Fulcher*. Bibliographie des Stark-Doppler Effektes. «Jahr. Radioak. Elektronik», 1913, 10, S. 82—91.
 52. *B. Galitzin*. Zur Theorie des Stufenspektroskopes. «Известия Академии Наук», 1905, 23, № 1/2, стр. 67—118.
 53. *B. Golitsyn, J. Wilip*. Experimentelle Prüfung des Dopplerschen Prinzip für Lichtstrahlen. «Известия АН», 1907, 1, стр. 213—224; *Astrophys. J.*, 1907, 26, p. 49—58.
 54. *Q. Majorana*. Experimental demonstration of the constancy of the velocity of light, reflected from a moving mirror. *Phil. Mag.*, 1918, 35, p. 163—174.
 55. *A. Perot*. Verification expérimentale du principe de Wladimir Michelson et du principe de Doppler — Fizeau. *C. R.*, 1924, 78, p. 380—383.
 56. *Ch. Fabry, H. Buisson*. Verification expérimentale du principe Doppler — Fizeau. *C. R.*, 1914, 158, p. 1498—1499.
 57. *Q. Majorana*. Experimental demonstration of the constancy of velocity of light, emitted by a moving source. *Phil. Mag.*, 1919, 37, p. 145—150.
 58. *F. Lippich*. Ueber die Breite der Spektrallinien. *Ann. Phys.*, 1870, 139, S. 465—479.
 59. *J. W. Rayleigh*. Note on the natural limit of the sharpness of the spectral lines. *Nature*, 1873, 8, p. 474—475; On the limit to interference when light is emitted from moving molecules. *Phil. Mag.*, 1889, 27, p. 298—304.
 60. *H. Koenen*. Das Dopplersche Princip. В кн.: *H. Kayser*. Handbuch der Spectroskopie, Bd. II, Lpz., 1902, S. 371—463; *B. Вайскопф*. Ширина спектральных линий в газах. УФН, 1933, 13, стр. 552—592; *И. И. Собельман*. О теории ширины атомных спектральных линий. УФН, 1954, 54, стр. 551—586.
 61. *P. M. S. Blackett, J. Frank*. Anregung von Spektren des Wasserstoffs durch Elektronenstos. *Z. Phys.*, 1925, 34, S. 389—401.
 62. Обзор этих работ см.: *W. Wien*. Kanalstrahlen. В кн.: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. 14, Lpz., 1927, S. 643.
 63. *M. Laue*. Die Optik bewegten Körpern. In: Handbuch der Experimentalphysik, Bd. 18, Lpz., 1928, S. 39—103.
 64. *J. Fenyl*. Michelson's theory of the displacement of spectral lines. *Astrophys. J.*, 1904, 19, p. 70—79.
 65. *A. Pérot*. Sur les principes de Doppler — Fizeau et de Wladimir Michelson et les rayes d'absorption. *J. de Phys.*, 1912, 2, p. 171—176.
 66. *E. Schrödinger*. Dopplerprinzip und Bohrsche Frequenzbedingungen. *Phys. Z.*, 1922, 23, S. 301—303.
 67. *P. M. A. Dirac*. Note on the Doppler principle and Bohr's frequency condition. *Proc. Cambr. Phil. Soc.*, 1924, 22, p. 432—433.

К главе II

Экспериментальное обоснование специальной теории относительности оптическими опытами

Влияние вращения на распространение света

1. A. *Michelson*. Relative motion of earth and aether. *Phil. Mag.*, 1904, 8, p. 716—719.
2. M. *Laue*. Über ein Versuch zur Optik der bewegten Körper. Münch., Ber., 1911, S. 405—412. Русский перевод в кн.: M. *Лауэ*. Статьи и речи. М., 1969, стр. 55—58. См. также: L. *Silberstein*. The propagation of light in rotating systems. *JOSA*, 1921, 5, p. 291—307; The rotating earth as a reference system for light propagation. *Phil. Mag.*, 1924, 48, p. 395—404; J. H. *Jeans*. The effect of the earth's rotation on the velocity of light. *Nature*, 1925, 115, 638; E. *Freundlich*. Der Michelsonsche Versuch über den Einfluß der Erdrotation auf die Ausbreitung des Lichtes. *Naturwiss.*, 1925, 13, S. 485—486.
3. См. [30] гл. I.
4. См. [31] гл. I.
5. O. *Knopf*. Die Versuche von F. Harreß über die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern. *Ann. Phys.*, 1920, 65, S. 389—447.
6. M. *Laue*. Zum Versuch von Harreß. *Ann. Phys.*, 1920, 62, S. 448—463.
7. G. *Sagnac*. L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme. *C. R.*, 1913, 157, p. 708—710; Sur la preuve de la réalité de l'éther lumineux par l'expérience de l'interféromètre tournant. *Ibidem*, p. 1410—1413; Effet tourbillonnaire optique. La circulation de l'éther lumineux dans un interféromètre tournant. *J. de phys. theor. app.*, 1914, 4, p. 177—195.
8. B. *Pogany*. Über die Wiederholung des Harreß — Sagnaschen Versuches. *Ann. Phys.*, 1926, 80, p. 217—231; *Naturwiss.*, 1927, 15, p. 177—182; *Ann. Phys.*, 1928, 85, S. 244—256.
9. A. A. *Michelson*. The effect of the Earth's rotation on the Velocity of light. I. *Astrophys. J.*, 1925, 61, p. 137—139; A. A. *Michelson*, H. *Gale*. Idem II, *Astrophys. J.*, 1925, 61, p. 140—145.
10. С. И. *Вавилов*. Экспериментальные основания теории относительности. М.—Л., 1928, стр. 74—78; Собрание сочинений, т. IV, М., 1956, стр. 53—61.
11. W. M. *Macek*, D. T. *Davis jr.* Rotating note sensing with traveling-wave ring lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1963, 2, p. 67—68.
12. W. M. *Macek*, J. *Schneider*, R. *Salamon*. Measurement of Fresnel drag with the ring laser. *J. Appl. Phys.*, 1964, 35, p. 2556—2557.

Опыт Майкельсона, его аналоги и повторения

1. С. И. *Вавилов*. Экспериментальные основания теории относительности. М.—Л., 1928; Собрание сочинений, т. IV, М., 1956, стр. 27—52.

2. A. Michelson. The relative motion of the earth and the luminiferous aether. Amer. J. Phys., 1881, 22, p. 120—129; C. R., 1882, 94, p. 520—523.
3. H. A. Lorentz. De l'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux. Amster. Acad. Versl., 1882, 2, p. 297—372.
4. A. Michelson, E. W. Morley. The relative motion of the Earth and the luminiferous aether. Amer. J. Sci., 1887, 34, p. 333—345; Phil. Mag., 1887, 24, p. 449—463.
5. Г. А. Лоренц. Интерференционный опыт Майкельсона (извлечение из книги «Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern». Leiden, 1895). В кн.: Г. А. Лоренц. Старые и новые проблемы физики. М., «Наука», 1970, стр. 4.
6. H. A. Lorentz. The relative motion of the Earth and the aether. Amster. Acad. Versl, 1891, 1, p. 97.
7. E. Morley, D. Miller. Report of an experiment to detect the Fitzgerald — Lorentz effect. Phil. Mag., 1905, 9, p. 680—685.
8. W. Sutherland. Relative motion of the Earth and aether. Phil. Mag., 1898, 45, p. 25—31.
9. W. M. Hicks. On the Michelson — Morley experiment to the drift of the aether. Phil. Mag., 1902, 3, p. 9—42, 556.
10. O. Lodge. Note on Mr. Sutherland's objection to the conclusiveness of the Michelson — Morley aether experiment. Phil. Mag., 1898, 46, p. 343—344; W. Cartmell. The Michelson — Morley experiment. Phil. Mag., 1902, 3, p. 555—556; E. Morley, D. Miller. On the theory of experiments to detect aberrations of the second degree. Phil. Mag., 1905, 9, p. 669—680.
11. G. Holton. Einstein and the «Crucial» Experiment. Amer. J. Phys., 1969, 37, p. 968—982 (русский перевод: УФН, 1971, 104, стр. 297—318); Einstein, Michelson, and the «Crucial» Experiment. Isis, 1969, 60, Part II, p. 133—197.
12. B. E. Kohl. Ueber den Michelsonsche Versuch. Ann. Phys., 1909, 28, S. 259—307, 662.
13. M. Laue. Ist der Michelson Versuch beweisend? Ann. Phys., 1910, 33, S. 186—191 (русский перевод в кн.: М. Лауэ. Статьи и речи. М. «Наука», 1969, стр. 32—36).
14. E. Budde. Zur Theorie des Michelsonschen Versuches. Phys. Z., 1911, 12, S. 979—991; 1912, 13, S. 825.
15. M. Laue. Zur Theorie des Michelson-Versuche. Phys. Z., 1912, 13, S. 501—507 (русский перевод там же, стр. 37—46).
16. R. S. Shankland a. a. New analysis of the interferometer observations of Miller. Rev. Mod. Phys., 1955, 27, p. 167—168.
17. D. C. Miller. Aether-drift experiments at Mount-Wilson solar observatory. Phys. Rev., 1922, 19, p. 407—408.
18. D. C. Miller. Ether drift experiment at Mount-Wilson. Proc. Nat. Acad. Amer., 1925, 11, p. 306—314.
19. D. C. Miller. Significance of the aether drift experiments of 1925 at Mount-Wilson. Science, 1926, 63, p. 433—443 (русский перевод: «Под знаменем марксизма», 1926, № 11, стр. 91—109).
20. Roy J. Kennedy. A refinement of the Michelson — Morley experiment. Proc. Nat. Acad. Amer., 1926, 12, p. 621—629.
21. K. K. Illingworth. A repetition of the Michelson — Morley experiment using Kennedy's refinement. Phys. Rev., 1927, 30, p. 692—696.
22. A. Piccard, E. Stahel. L'expérience de Michelson, réalisée en ballon libre. C. R., 1926, 183, p. 420—421; Bull. de Belge, 1926, 12, p. 630—

- 635; *J. de phys. et de rad.*, 1927, 8, p. 56; *C. R.*, 1927, 184, p. 152; *J. de phys. et de rad.*, 1928, 9, p.49—60; *C. R.*, 1927, 185, p. 1198—1200. *Z. Phys.*, 1929, 53, S. 312—314.
23. *G. Joos*. Die Jenaer Wiederholung des Michelsonversuchs. *Ann. Phys.*, 1930, 7, S. 385—407.
 24. *A. A. Michelson, F. G. Pease, F. Pearson*. Repetition of the Michelson — Morley experiment. *JOSA*, 1929, 18, p. 181—182.
 25. Conference on the Michelson — Morley experiments. *Astrophys. J.*, 1928, 68, p. 341—402.
 26. *W. F. G. Swann*. The significance of the Michelson — Morley — Miller experiments in relation to the restricted theory of relativity. *Phys. Res.*, 1930, 35, p. 127.
 27. *F. H. Littman*. Proposal for a new aether drift experiment. *Nature*, 1954, 173, p. 80—81; 174, 505—506; *L. Essen*. Proposal for a new aether drift experiment ibidem, p. 734, 807; *L. Essen*. A new aether drift experiment. *Nature*, 1955, 175, p. 793—794.
 28. *G. Møller*. On the possibility of terrestrial tests of theory of relativity. *Nuovo Cimento, Suppl.*, 1957, 6, p. 381.
 29. *J. P. Cedarholm, G. F. Bland, B. L. Havens, C. H. Townes*. New experimental test of special relativity. *Phys. Rev., Letters*, 1958, 1, p. 342—343.
 30. *T. S. Jaseja, A. Javan, J. Murray, C. H. Townes*. Test of special relativity or of the isotropy of space by use of infrared masers. *Phys. Rev.*, 1964, 133a, p. 1221—1225.
 31. *См. Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Г. М. Страховский, Б. М. Чукачев*. О возможности исследования релятивистских эффектов с помощью молекулярных и атомных стандартов частоты. *УФН*, 1961, 75, стр. 3—60.
 32. *C. W. Carnahan*. A proposal first-order relativity test using lasers. *Proc. IRE*, 1962, 50, № 9, *C. D. Cristescu, M. Giurgea*. Lasers and aether drift. *Phys., Letters*, 1963, 5, p. 128; *Szöke A.* A new drift experiment using lasers. *Phys., Letters*, 1965, 18, p. 267—268; *A. Metz*. Un projet d'expérience pour la vérification de la relativité. *C. R.*, 1966, **AB262**, p. A104—105.
 33. *D. C. Champney, P. B. Moon*. Absence of Doppler shift for gamma ray source and detector on same circular orbit. *Proc. Phys. Soc.*, 1961, **A77**, p. 350—351.
 34. *C. Møller*. New experimental tests of the special principle of relativity. *Proc. Roy. Soc.*, 1962 **A270**, p. 306—314.
 35. *D. C. Champney, G. P. Isaac, M. Khan*. An aether drift experiment based on the Mössbauer effect. *Phys., Letters*, 1963, 7, p. 241—243.

Независимость скорости света от скорости источника

1. *W. Ritz*. Recherches critiques sur l'électrodynamique générale. *Ann. de Physique*, 1908, 13, p. 145—175; Recherches critiques sur les théories électrodynamiques de Cl. Maxwell et de H. P. Lorentz. *Arch. sci. phys. nat.*, 1908, 24, p. 209—236.
2. *J. J. Thomson*. On a theory of the structure of the electric field and its applications to Röntgen radiation and to light. *Phil. Mag.*, 1910, 19, p. 301—313; *O. M. Stewart*. The second postulate of relativity

- and the electromagnetic emission theory of light. Phys. Rev., 1911, 32, p. 418—428.
3. R. C. Tolman. The second postulate of relativity. Phys. Rev., 1910, 30, p. 291; 31, p. 26—40.
 4. P. Ehrenfest. Über die Entberlichkeit des Lichtäthers. Phys. Z., 1912, 13, S. 317—319.
 5. R. Tomaschek. Über den Michelsonversuch mit Fixsternlicht. Astr. Nach., 1923, 219, S. 301—306; Über das Verhalten des Lichtes Außerirdischer Lichtquellen. Ann. Phys., 1924, 73, S. 125—126.
 6. W. de Sitter. Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit; Proc. Acad. Amster., 1913, 15, p. 1297—1312; Phys. Z. 1913, 14, S. 429; Über die Genauigkeit, innerhalb welcher die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden kann. Phys. Z., 1913, 14, S. 1267—1268.
 7. Q. Majorana. Experimental demonstration of the constancy of velocity of light emitted by a moving source. Lincei Rend., 1918, 27, p. 402—406; Phys. Rev., 1918, 11, p. 411—420; Phil. Mag., 1919, 37, p. 145—150.
 8. А. М. Бонч-Бруевич. Экспериментальная проверка независимости скорости света от скорости движения источника излучения относительно наблюдателя. ДАН, 1956, 109, стр. 481—484; А. М. Бонч-Бруевич, В. А. Молчанов. Новый оптический релятивистский опыт. Оптика и спектроскопия, 1956, 1, стр. 113—124.
 9. W. Kantor. Direct first-order experiment on the propagation of light from a moving source. JOSA, 1962, 52, p. 978—984.
 10. J. Palacios. Optica de los cuerpos en movimiento. Comentarios al experimento de Kantor. Rev. Real. acad. cienc. exact. Madrid, 1963, 57, p. 237—291; E. Herrera. La vitesse de la lumière par rapport aux corps en mouvement. Génie civil, 1963, 140, p. 262—264.
 11. D. Burcev. On Kantor's experiment. Phys. Lett., 1962, 5, p. 44; D. R. White, R. A. Alpher. Comments on an experiment concerning Einstein's light velocity postulate. JOSA, 1963, 53, p. 760.
 12. V. Vysin. 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.
 13. J. F. James, R. S. Sternberg. Change in velocity of light emitted by a moving source. Nature, 1963, 197, p. 1192.
 14. F. Rotz. New test of the velocity of light postulate. Phys. Lett., 1963, 7, p. 252—254.
 15. G. C. Babcock, T. G. Bergmann. Determination of the constancy of the speed of light. JOSA, 1964, 54, p. 147—151.
 16. J. G. Fox. Experimental evidence for the second postulate of special relativity. Amer. J. Phys., 1962, 30, p. 297—300.
 17. P. Beckmann, P. Mandics. Experiment of the constancy of the velocity of electromagnetic radiation. J. Res. Nat. Bur. Standarts, 1964, D68, p. 1265—1268; R. O. Waddoups, W. E. Edwards, J. J. Merrill. Experimental investigation of the second postulate of special relativity. JOSA, 1965, 55, p. 142—143.
 18. P. Beckmann, P. Mandics. Test of the constancy of velocity of electromagnetic radiation of high vacuum. J. Res. Nat. Bur. Standarts, 1965, D69, p. 623—628.
 19. J. Zahesky, V. Kolesnikov. Optical experiments to verify the second postulate of the special theory of relativity. Nature, 1966, 212, p. 1227.

20. *R. J. Dickens, S. R. Malin.* A test of the Ritz theory of light propagation. Observatory, 1965, 85, p. 260—262.
21. *T. Alväger, A. Nilsson, J. Kjellman.* A direct terrestrial test of the second postulate of special relativity. Nature, 1963, 197, p. 1191.
22. *D. Sadeh.* Experimental evidence for the constancy of the velocity of gamma rays, using annihilation in flight. Phys. Rev., Letters, 1963, 10, p. 271—273.
23. *W. G. Rosser.* Velocity of light by a moving source. Nature, 1961, 190, p. 249.
24. *T. Alväger, F. Farley, J. Kjellman, J. Wallin.* Test of the second postulate of special relativity. Phys., Letters, 1964, 12, p. 260—262.
25. *T. A. Filippas, J. G. Fox.* Velocity of gamma rays from a moving source. Phys. Rev., 1964, 135, p. 1071—1075.

Эффект Допплера II порядка

1. *А. Эйнштейн.* О возможности нового доказательства принципа относительности. Собрание научных трудов, т. I, стр. 49—50.
2. *B. Strasser, M. Wien.* Anwendung der Teleobjective auf den Doppler-effekt von Kanalstrahlen. Phys. Z., 1906, 7, S. 744—748.
3. *H. Rau.* Beobachtungen an Kanalstrahlen. Phys. Z., 1906, 7, S. 421—423.
4. *P. A. Schultz.* Ueber die Größe des Dopplereffekts. Z. Phys., 1923, 15, S. 121—125.
5. *W. Ritz.* Gesammelte Werke Paris. 1910, p. 523—524.
6. *O. Scherzer.* Die Meßbarkeit des quadratischen Dopplereffekts. Ann. Phys., 1938, 32, S. 242—244; *C. del Lungo.* Sopra l'effeto Doppler e il movimento assoluto. Cim., 1927, 4, p. 29—30.
7. *Ch. E. Guye.* Sur la possibilité de verifier experimentallment la relation $v = v_0 \sqrt{1 - \beta^2}$. C. R., 1938, 206, p. 29—31.
8. *H. Ives.* 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.
9. *H. E. Ives, G. R. Stilwell.* Experimental study of the rate of moving atomic clock. JOSA, 1938, 28, p. 215—226.
10. *H. Rau.* Beobachtungen über den Doppler-effekt an Linien- und Bandspektren der Kanalstrahlen. Ann. Phys., 1924, 73, S. 266—271.
11. *В. Л. Гинзбург.* В кн.: *В. Паули.* Теория относительности. М.—Л., 1947, стр. 38. Примечание.
12. *R. C. Jones.* On the relativistic Doppler-effect. JOSA, 1939, 29, p. 337—339.
13. *G. Otting.* Der quadratische Dopplereffekt. Phys. Z., 1939, 40, S. 681—687.
14. *H. Billing.* Ein Interferenzversuch mit dem Lichte eines Kanalstrahlen. Ann. Phys., 1938, 32, S. 577—592; *А. Эйнштейн.* Об интерференционных свойствах света, испускаемого канальовыми лучами. Собрание научных трудов, т. III, стр. 517—524.
15. *E. Rüchardt, G. Otting.* Über die Messung des quadratischen Doppler-effektes mit Kanalstrahlen. Verb. D. Phys. Ges., 1939, 20, S. 147.

16. *H. Ives, G. Stilwell.* An experimental study of the rate of a moving atomic clock. JOSA, 1941, **31**, p. 369—374, 459.
17. *H. I. Mandelberg, L. Witten.* Experimental verification of the relativistic Doppler effect. JOSA, 1962, **52**, p. 529—536.
18. *B. D. Josephson.* Temperature-dependent shift of γ -rays emitted by a solid. Phys. Rev. Lett., 1960, **4**, p. 341—342. (Русский перевод в сб.: «Эффект Мессбауэра». М., 1962, стр. 310—312).
19. *R. V. Pound, G. P. Rebka.* Variation with temperature of the energy of recoil-free γ -rays from solids. Phys. Rev. Lett., 1960, **4**, p. 274—276. («Эффект Мессбауэра», стр. 305—309).
20. *A. J. Boyle, D. S. Bumbury, C. Edwards, H. E. Hall.* A thermal red shift of the recoilless γ -emission of $\text{Sn}^{119\text{m}}$. Proc. Phys. Soc., 1960, **76**, p. 165—166. («Эффект Мессбауэра», стр. 313—316).
21. *H. J. Hay, J. P. Schiffer, T. E. Cranshaw, P. A. Egelstaff.* Measurement of the red shift in a accelerated system using the Mössbauer effect in Fe^{57} . Phys. Rev., Lett., 1960, **4**, p. 165—166. («Эффект Мессбауэра», стр. 415—417).
22. *H. E. Bömmel.* Measurement of the frequency shift of gamma rays in accelerated systems using the Mössbauer effect. «Mössbauer effect», Ld. 1962, p. 229—232.
23. *W. Kündig.* Measurement of the transverse Doppler-effect in an accelerated system. Phys. Rev., 1963, **129**, p. 2371—2375.

Приведем несколько обзоров по экспериментальным основам специальной теории относительности, опубликованные на русском языке в последние годы.

1. *Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, А. Н. Ораевский, Г. М. Страховский, Б. М. Чикачев.* О возможности исследования релятивистских эффектов с помощью молекулярных и атомных часов. УФН, 1961, **75**, стр. 3—60.
2. *А. Г. Молчанов.* Опытная проверка постулатов специальной теории относительности. УФН, 1964, **83**, стр. 753—755.
3. *Г. М. Страховский, А. В. Успенский.* Экспериментальная проверка теории относительности. УФН, 1965, **86**, стр. 421—432.
4. *А. Г. Баранов.* О некоторых экспериментах по проверке постулатов специальной теории относительности. Эйнштейновский сборник 1966 г. М., «Наука», 1966, стр. 284—297.
5. *Д. И. Блохинцев.* Обоснованность специальной теории относительности опытами в области физики высоких энергий. УФН, 1966, **89**, стр. 185—199.
6. *М. С. Козодаев.* Экспериментальные аспекты специальной теории относительности. Вестник Академии Наук СССР, 1966, № 2, стр. 177—182.
7. *А. М. Френк.* Некоторые вопросы экспериментальных основ теории относительности. В кн.: *У. И. Франкфурт.* Специальная и общая теории относительности. М. «Наука», 1968, стр. 241—262.
8. *В. Д. Шмидт-Отт.* Некоторые новые измерения в связи с доказательством справедливости специальной теории относительности. УФН, 1968, **96**, стр. 519—527.

1. *O. Roemer*. Demonstration touchant le mouvement de la lumière. Mem. Acad. Royal Sci., 1730, 10, p. 577.
2. *H. Fizeau*. Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière. C. R., 1849, 29, p. 90—92.
3. *F. Arago*. Note sur le système d'expériences proposé en 1838, pour prononcer définitivement entre la théorie des ondes et la théorie de l'émission. C. R., 1850, 30, p. 489—495.
4. *H. Fizeau* et *E. Gounell*. Sur l'expérience relative à la vitesse comparative de la lumière dans l'air et dans l'eau. C. R., 1850, 30, p. 771—774.
5. *L. Foucault*. Vitesse relative de la lumière dans l'air et dans l'eau. Journal des Debats, 1859, 50 Avril.
6. *H. Fizeau* et *L. Breguet*. Notes sur l'expérience relative à la vitesse comparative de la lumière dans l'air et dans l'eau. C. R., 1850, 30, p. 562—563.
7. *L. Foucault*. Sur la vitesse relative de la lumière dans l'air et dans l'eau. Ann. Chim. Phys., 1854, 41, p. 129—164.
8. *W. Weber* und *R. Kohlrausch*. Über die Elektrizitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fließt. Ann. Phys., 1856, 99, S. 10—25.
9. *R. Kohlrausch* und *W. Weber*. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Zurückführung der Strömintensitäts — Messungen auf mechanischen Maass. Abh. Sächs. Ges. Wiss., 1857, 5, S. 219—292.
10. *L. Foucault*. Détermination expérimentale de la vitesse de la lumière. C. R., 1862, 55, p. 792—796.
11. *A. Cornu*. Détermination nouvelle de la vitesse de la lumière. C. R., 1873, 76, p. 338—342.
12. *W. Voigt*. Notiz zur numerischen Bestimmung der Constanten des Weber'schen Grundgesetzes. Ann. Phys., 1877, 2, S. 476—477.
13. *A. Michelson*. Velocity of light. Nature, 1878, 18, p. 195.
14. *A. Michelson*. Experimental determination of the velocity of light. Proc. Amer. Ass. Advan. Sci., 1878, p. 71—77.
15. *A. Michelson*. Experimental determination of the velocity of light. Amer. J. Sci., 1879, 18, p. 390—393.
16. *A. Michelson*. Velocity of light. Nature, 1880, 21, 226.
17. *Gouy*. Sur la propagation de la lumière. C. R., 1880, 91, p. 877—880.
18. *A. Michelson*. On the velocity of light. Nature, 1881, 24, p. 460—461.
20. *J. Rayleigh*. On the velocity of light. Nature, 1881, 24, p. 382—383.
21. *J. Rayleigh*. The velocity of light. Nature, 1881, 25, p. 52.
22. *A. Stoletoy*. Sur une methode pour determiner le rapport des unités electromagnetiques et electrostatiques (le «v» de Maxwell). J. de Phys., 1881, 10, p. 468—474.
23. *Gouy*. Sur la théorie des miroirs tournants. C. R., 1885, 101, p. 502—505.
24. *Р. Колли*. О нескольких новых методах изучения электрических колебаний и о некоторых их приложениях. Часть 1. Методы. Часть 2. Приложение электрических колебаний к определению соотношения между электрическими и электромагнитными единица-

- ми. Количество электричества. Протоколы физ-мат. секции общества естествоиспытателей при Казанском университете. 1885, стр. 1—72.
25. Б. П. Вейнберг. К вопросу о скорости распространения возмущений в эфире. ЖРФХО, часть физич., 1898, 30, стр. 142—149.
 26. A. Sommerfeld. Über die Fortpflanzung elektrodynamischer Wellen längs eines Drahtes. Ann. Phys., 1899, 67, S. 233—290.
 27. A. Cornu. Sur la vitesse de la lumière. Rapp. press. au Congrès Intern. de Phys. 1900, 2, p. 225—246.
 28. H. Abraham. Les mesures de la vitesse «v». Rapp. press au Congrès. Intern. de Phys., 1900, 2, p. 247—267.
 29. I. Lüroth. Eine Bemerkung zum Michelson'schen Versuch Münch. Ber., 1909, 10, Hf. 7.
 30. A. Michelson (assisted by F. Pearson). Measurement of the velocity of light between mount Wilson and mount San Antoni. Astrophys. J., 1927, 65, p. 1—14.
 31. M. E. I. Gheury de Bray. Published values of the velocity of light. Nature, 1927, 120, p. 602—605.
 32. G. Wolfson. Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes. Handb. d. Phys., 1928, Bd. XIX, S. 895—916.
 33. A. Karolus und O. Mittelstaedt. Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit unter Verwendung des elektrooptischen Kerreffektes. Phys. Z., 1928, 29, S. 698—702.
 34. O. Mittelstaedt. Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit unter Verwendung des elektrooptischen Kerreffekts. Ann. Phys., 1929, 2, s. 285—312.
 35. O. C. Wilson. The velocity of light. Nature, 1932, 130, p. 25.
 36. F. K. Edmondson. Velocity of light. Nature, 1934, 133, p. 759—760.
 37. A. Michelson, F. G. Pease and F. Pearson. Measurement of the velocity of light in a partial vacuum. Science, 1935, 81, p. 100—101.
 38. Roy. J. Kennedy. The constancy of the velocity of light. Phys. Rev., 1935, 47, p. 533—535.
 39. A. Michelson, F. Pease and F. Pearson. Measurement of the velocity of light in a partial vacuum. Astrophys. Journ. 1935, 82, p. 26—61.
 40. W. C. Anderson. Measurement of the velocity of light. Phys. Rev., 1937, 51, p. 596.
 41. W. C. Anderson. Measurement of the velocity of light. Rev. Scient. Instr., 1937, 8, p. 239—247.
 42. W. Anderson. Final measurements of the velocity of light. JOSA, 1941, 31, p. 187—197.
 43. R. Houstoun. A measurement of the velocity of light. Pro. Phys. Soc. Edinburg, 1950, 63, p. 95—104, Nature, 1950, 165, p. 582.
 44. C. Aslakson. Can the velocity of propagation of radio waves be measured by Shoran? Trans. Am. Geophys. Un. 1949, 30, p. 475. Nature, 1949, 164, p. 712.
 45. E. Bergstrand. Velocity of light. Nature, 1950, 165, p. 405.
 46. L. Essen. Velocity of light and radio waves. Nature, 1950, 165, p. 582.
 47. L. Essen. The velocity of propagation of electromagnetic waves derived from the resonant frequencies of cylindrical cavity resonator. Proc. Roy. Soc., 1950, 204, p. 260.
 48. K. Bol. Determination of the speed of light by the resonant cavity method. Phys. Rev., 1950, 80, p. 19.

49. *D. W. R. McKinley*. Measurement of the velocity of light using quartz crystals. *Astron. Soc. Canada*, 1950, **44**, p. 89.
50. *C. Aslakson*. A new measurement of the velocity of radio waves. *Nature*, 1951, **168**, p. 60.
51. *E. Bergstrand*. A check determination of the velocity of light. *Arkiv för Fysik*, 1952, **3**, p. 479.
52. *K. Froome*. A new determination of the velocity of electromagnetic radiation by microwave interferometry. *Nature*, 1952, **196**, p. 79.
53. *D. Rank, J. Shearer, T. Wiggins*. Precise determination of the velocity of light derived from a band spectrum method. *JOSA*, 1952, **42**, p. 693.
54. *K. Froome*. Determination of the velocity of short electromagnetic waves by interferometer. *Proc. Roy. Soc.*, 1952, **A213**, p. 123.
55. *K. Froome*. Investigation of a new form of microwave interferometer for determining the velocity of electromagnetic waves. *Proc. Roy. Soc.*, 1954, **A-223**, p. 195.
56. *D. Rank, J. Shearer, T. Wiggins*. Precise determination of the velocity of light derived from a band spectrum method. *Phys. Rev.*, 1954, **94**, p. 575.
57. *D. Rank, H. Bennett, J. Bennett*. Improved value of the velocity of light derived from a band spectrum method. *Phys. Rev.*, 1955, **100**, p. 993.
58. *E. Florman*. A measurement of the velocity of propagation of very high-frequency radio waves at the surface of the earth. *J. Res. Nat. Bur. St.*, 1955, **54**, p. 335.
59. *K. Froome*. A new determination of the freespace velocity of electromagnetic waves. *Proc. Phys. Soc.*, 1958, **247**, p. 109.
60. *E. Bergstrand*. The geodimeter system, a short discussion of its principal function and future development. *Geophys. Res.*, 1960, **65**, p. 404.
61. *Д. Ренк*. Определение скорости света. В сб.: «Успехи спектроскопии». Пер. с англ. М., ИЛ, 1963, стр. 102—114.

К главе IV

Специальная теория относительности

(Исторический очерк)

1. *А. Эйнштейн*. Собрание научных трудов, т. I—IV. М., «Наука», 1965—1967.
2. Принцип относительности. Сборник работ классиков релятивизма (Г. А. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн, Г. Минковский). Под ред. и с примеч. В. К. Фредерикса и Д. Д. Иваненко. М.—Л., 1935.
3. *М. Борн*. Теория относительности Эйнштейна и ее физические основы. М., 1971.
4. *П. Г. Бергман*. Введение в теорию относительности. С предисл. А. Эйнштейна. Пер. с англ. М., Гос. изд-во иностр. лит., 1947.
5. *В. Паули*. Теория относительности. Пер. с нем. М.—Л., Гостехиздат, 1947.
6. *В. А. Фок*. Теория пространства, времени и тяготения. М., Гостехиздат, 1955.

7. Б. Г. Кузнецов. Принцип относительности в античной, классической и квантовой физике. М., Изд-во АН СССР, 1959.
8. Л. Д. Ландау и Ю. Б. Румер. Что такое теория относительности. М., «Сов. Россия», 1960.
9. Б. Г. Кузнецов. Беседы о теории относительности. М., Изд-во АН СССР, 1960.
10. Ю. Б. Румер и М. С. Рывкин. Теория относительности. М., Учпедгиз, 1960.
11. М. А. Симонов. Специальная теория относительности. Минск, 1965.
12. Б. М. Гессен. Основные идеи теории относительности. М.—Л., 1928.
13. С. И. Вавилов. Экспериментальные основания теории относительности. М.—Л., Гос. изд-во, 1928.
14. А. Конф. Основы теории относительности Эйнштейна. Пер. с нем. М.—Л., 1933.
15. Б. Г. Кузнецов. Эйнштейн. Жизнь. Смерть. Бессмертие. М., «Наука», 1972.

Оглавление

	Введение	5
Глава I.	Основные явления оптики движущихся тел	8
	Аберрация света	8
	Увлечение света движущимися телами	27
	Эффект Допплера	40
Глава II.	Экспериментальное обоснование специальной теории относительности оптическими опытами	65
	Влияние вращения на распространение света	67
	Опыт Майкельсона, его аналоги и повторения	76
	Независимость скорости света от скорости источника	113
	Эффект Допплера II порядка	124
Глава III.	Скорость света	137
	Определение скорости света в новое время	138
	Экспериментальные определения скорости света	143
	Современные методы определения скорости света	149
Глава IV.	Специальная теория относительности (Исторический очерк)	161
	Пространство, время, относительность в классической физике	162
	От Максвелла к Эйнштейну	183
	Литература	198

Ушер Ионович Франкфурт, Александр Моисеевич Френк

Оптика движущихся тел

Утверждено к печати редколлегией серии научно-популярных изданий Академии наук СССР

Редактор издательства Е. М. Кляус. Художник Г. И. Нейштат.
Художественный редактор В. Н. Тикуннов.
Технические редакторы: Т. И. Анурова, В. Д. Прилепская.

Сдано в набор 18/II-1972 г. Подписано к печати 6/VI-1972 г. Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага № 2. Усл. печ. л. 6,625. Уч.-изд. л. 10,6. Тираж 13.000 экз.
Т-01054. Тип. зак. 4933. Цена 64 коп.

Издательство «Наука». Москва, К-62, Подсосенский пер., д. 21
2-я типография издательства «Наука». Москва, Г-99, Шубинский пер., 10.