

собой все материальные тела, мы должны считать неподвижным даже внутри самой материи, находящейся в движении» [5, стр. 10—11].

В опыте Вильсона полый цилиндр, помещенный в магнитное поле, направленное параллельно оси, вращается вокруг своей оси. Внутри цилиндра возникает радиально направленное электрическое поле. В металлическом цилиндре при этом происходит перемещение электронов проводимости к внешней поверхности цилиндра. Электроны проводимости перемещаются до тех пор, пока заряд на внешней поверхности цилиндра не создаст поле, которое уравнивает силу Лоренца, действующую на электроны, находящиеся в цилиндре вещества $(\mathbf{F} = \frac{e}{c} [\mathbf{v}\mathbf{B}])$. Между внешней и внутренней поверхностями цилиндра возникает разность потенциала и при соединении их проводником в нем пойдет ток.

Вильсон экспериментально подтвердил, что теория Герца, исходящая из полного увлечения эфира, не соответствует действительности. Проблема относительности движения оказалась центральной в электродинамике движущихся сред, но с отказом от полного увлечения эфира нельзя было сохранить и принцип относительности в его классической форме. Лоренц пошел по пути отказа от принципа относительности, но и этот путь оказался сложным и противоречащим многим экспериментальным данным. Необходимо было модифицировать группу преобразований классической физики, чтобы разрешить трудности электродинамики движущихся тел.

2. ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ

В основу оптики движущихся тел, ставшую важной вехой на пути к созданию теории относительности, легли теории абберации и доплер-эффекта.

Явление абберации света было обнаружено английским астрономом Дж. Брэдли. В конце XVII в. и в самом начале XVIII в. многие астрономы заметили изменения в положении звезд, происходившие с годичной периодичностью и с амплитудой около $40''$. Ж. Пикар, Р. Гук и Дж. Флемстид склонны были приписать эти изменения параллаксу, Кассини-младший и Манфреди справедливо оспаривали эти положения, так как при параллактическом смещении светило удаляется от апекса перемещения наблюдателя, в то время как при наблюдаемом смещении светило приближается к апексу.

В 1725 г. С. Молине предпринял попытку проверить исследования Гука. Молине установил телескоп почти в вертикальном положении и начал наблюдения за звездой γ Дракона, приняв

тщательные для того времени меры к тому, чтобы положение телескопа сохранилось в течение года. 17 декабря 1725 г. к наблюдениям, начатым Молине, приступил и Брэдли и сразу обнаружил смещение звезды к югу. К началу марта смещение достигло $20''$. Проследив дальнейшее изменение смещения, Брэдли обнаружил, что в декабре 1726 г. склонение вернулось к своему декабрьскому значению 1725 г. Наблюдения показали, что звезда γ Дракона подвержена некоторому годичному смещению, которое, безусловно, не является параллактическим; возникшее же предположение, что это вызвано нутацией земной оси, не соответствовало явлениям, происходившим с другими звездами. В 1728 г. Брэдли понял, что абберрация света обусловлена кажущимся изменением направления распространения света от звезды вследствие распространения света с конечной скоростью и годичного движения Земли по своей орбите. Для объяснения суточной и годичной абберрации на протяжении почти всего XVIII в. проводились разные механические аналогии, не объяснявшие, однако, картины абберрации (Лаланд, Мопертюи и др.). В 1782 г. Вильсон, исходя из эмиссионной теории света, предположил, что при наполнении телескопа водой численное значение абберрации не должно измениться. К противоположному выводу пришел Бошкович. Вопрос о роли телескопа был ранее поставлен Клеро, который рассмотрел вопрос о том, в каком направлении должен быть ориентирован телескоп для наблюдения звезды. Клеро пришел к выводу, что этим направлением должна быть диагональ параллелограмма, построенного на векторах скорости света и Земли. Абберрация в рамках эмиссионной теории оставалась явлением изолированным и не приводила к постановке новых существенных вопросов более общего характера.

У Юнга мы впервые встречаемся с попыткой объяснения абберрации с волновой точки зрения. Объяснение Юнга, основанное на предположении о неувлекаемом эфире, сразу же привело к постановке проблемы взаимодействия эфира и вещества.

Следующая веха на пути к созданию оптики движущихся сред связана с именами Араго и Френеля. Исходя из эмиссионной теории света, Араго считал, что коэффициент преломления должен зависеть от того, движется ли тело навстречу источнику или удаляется от него. Не заметив изменения угла отклонения луча, Араго заключил, что движение Земли не влияет на показатель преломления. В 1818 г. Араго обратился с письмом к Френелю. В ответном письме Френель изложил волновую теорию оптических явлений в движущихся средах, опирающуюся на гипотезу о неподвижности эфира в системе неподвижных звезд.

Френель считал, что если все содержащееся в столбе воды или в куске стекла испытывает поступательное движение, то

распространение света должно протекать независимо от того, имеется или отсутствует поступательное движение. Совсем иная картина должна иметь место в том случае, если в стекле или в воде содержится нечто неприводимое в движение. Теория, построенная Френелем, по своему значению выходит далеко за рамки простого объяснения опытов Араго. Френель впервые широко ставит вопрос о необходимости выяснения существующей зависимости между движущимся телом и эфиром, окружающим тело и содержащимся в нем. Он рассуждает примерно так: упругость эфира неизменна, плотность же эфира в стекле ρ_1 больше плотности эфира в вакууме ρ . В случае неподвижного стекла коэффициент преломления будет

$$n = \frac{c}{c_1} = \sqrt{\frac{N}{\rho}} : \sqrt{\frac{N}{\rho_1}} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho}}.$$

Если стекло движется, то скорость эфира по отношению к стеклу равна по величине и обратна по направлению скорости стекла по отношению к эфиру. Внутри же стекла скорость эфира по отношению к стеклу требует учета «непрерывности» эфира. В силу условия непрерывности

$$\rho v = \rho_1 v_1, \quad v_1 = \frac{v\rho}{\rho_1} = v \frac{1}{n^2}.$$

Внутри вещества, где эфир уплотнен, его скорость по отношению к стеклу есть $v_1 < v$, а по отношению к внешнему эфиру —

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

Френель считал, что угол преломления зависит от скорости, с которой стекло движется по отношению к эфиру. В теории неподвижного эфира преломление света в движущемся теле должно отличаться от преломления в теле неподвижном; однако, согласно Френелю, этот эффект в первом порядке компенсируется эффектом частичного увлечения эфира движущимся телом.

По поводу опытов Араго Коши писал, что абберация — не кажущееся изменение направления, а истинное. В известном смысле — это косвенная полемика с Френелем, трактовка которого более близка к трактовке, возникшей позже на основе электромагнитной теории света.

Против гипотезы Френеля более определенно высказывается Допплер.

Оценивая теорию Френеля, Мандельштам писал, что, конечно, можно найти много возражений против вывода Френеля. «Можно спросить, например, почему он берет различной в стекле и в пустоте *плотность* эфира а не его упругость, что совершен-

но изменило бы дело и т. д. Но так или иначе результат получается у него верный. Действительно, — говорит Френель, — угол преломления зависит от v из-за изменения скорости падающей волны, но этот эффект в первом порядке компенсируется эффектом частичного увлечения» [7, стр. 101].

При всех частичных успехах теории до 40-х годов прошлого века почти не было экспериментальных работ по оптике движущихся тел. В 1839 г. Ж. Бабине пропускал свет через две одинаковые стеклянные пластинки в разных направлениях: через одну лучи проходили по направлению движения Земли, через другую — в обратном направлении. При интерференции эти лучи дают такую же картину, как и в том случае, когда оба луча идут в одном направлении. К 40-м годам XIX в. не только не существовало единой и последовательной теории оптических явлений в движущихся телах в целом, но и последовательной теории аберрации.

В 1843 г. Допплер дал критический анализ существующих объяснений явления аберрации, разделив их условно на пять групп:

1) Объяснения на основе эмиссионной теории света (типа Брэдли). Эти трактовки должны быть отклонены ввиду спорного характера самой эмиссионной теории света.

2) Объяснения аберрации как оптической иллюзии; являются, конечно, несостоятельными.

3) Кинематические объяснения, основанные на учете отношения скорости наблюдателя к скорости света. Допплер считал их неприемлемыми вследствие того, что они предполагают абсолютную «прозрачность всех тел для эфира, за исключением сетчатки глаза».

4) Механические объяснения, основанные на сложении скоростей. Эти объяснения неприемлемы по двум причинам: во-первых, они предполагают абсолютную неподвижность эфира, во-вторых, согласно Допплеру, нельзя складывать поступательное движение Земли с движением света.

5) Физиологические объяснения, предполагающие, что аберрация есть следствие смещения наиболее чувствительной точки сетчатки за время прохождения света от зрачка до сетчатки глаза. Эти объяснения приводят к расхождениям с наблюдаемыми значениями аберрации.

Статья Допплера ярко рисует неудовлетворительное состояние оптики движущихся тел в 40-х годах прошлого столетия.

В 1845 г. выступил Стокс с рядом работ, посвященных теории аберрации. В своей теории аберрации Стокс исходил из предположения, что окружающий Землю эфир при перемещении Земли увлекается ею. Он считал, что в каждой точке поверхности земного шара скорость эфира равна скорости Земли и приборы, следовательно, находятся в покое по отношению к окру-

жающему их эфиру. Направление, в котором наблюдается звезда, зависит от направления распространения волн в тот момент, когда они проходят через объектив телескопа. Рассматриваемое направление отличается от направления распространения волн на некотором расстоянии от поверхности Земли. Теория Стокса также встретила со значительными трудностями.

Аналізу теории Стокса были посвящены работы многих физиков, в том числе Лоренца и Планка. В теории Стокса содержалось два несовместимых допущения: 1) движение эфира является безвихревым и 2) на поверхности Земли нет скольжения. Если предполагать, что эфир является несжимаемым, то нет никакой возможности совместить эти допущения Стокса.

Из гидродинамики известно, что если шар, погруженный в неограниченную несжимаемую среду, имеет заданное поступательное движение, то движение среды будет вполне определенным при условии существования потенциала скоростей для этой среды и равенства нормальных составляющих в каждой точке поверхности.

Лоренц подчеркивает, что при движении, которое удовлетворяет этим условиям, на поверхности имеется значительное скольжение. Однако если допустить, что эфир подчиняется газовым законам и притягивается к Земле с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния от ее центра, то, как показал Планк, можно устранить противоречие между двумя гипотезами теории Стокса, правда, путем наложения весьма неестественных условий на изменения плотности эфира.

Дальнейшее развитие оптики движущихся сред оказалось тесно связанным с проблемами электронной теории и главным образом с работами Лоренца в этом направлении. Уже в 1886 г. Лоренц опубликовал работу «О влиянии движения Земли на оптические явления», а в последующие годы — ряд работ, посвященных стоковской теории аберрации. В 1895 г. выходит в свет книга Лоренца «Опыт теории электрических и оптических явлений в движущихся средах», сыгравшая в дорелятивистский период наиболее существенную роль в уяснении основных проблем электронной теории.

Значительно позднее, в лекциях, прочитанных в Колумбийском университете весной 1906 г. и опубликованных под названием «Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения», Лоренц писал: «Электромагнитные и оптические явления в системах, имеющих поступательное движение, — а такими в силу годового движения являются все тела на Земле, — представляют большой интерес не только сами по себе, но также и потому, что они дают возможность проверить различные теории электричества. Электронная теория была развита отчасти со специальной целью охватить и эти явления» [4, стр. 247].

В дорелятивистских теориях в трактовке вопроса о взаимодействии вещества и эфира существовали различные и весьма противоречивые точки зрения, которые условно можно подразделить на три группы:

1) при движении тела его молекулы проходят через эфир; это (относительное) движение тела по отношению к эфиру грубо напоминает движение открытого автомобиля в воздухе, количество которого в автомобиле при движении последнего остается постоянным и который не увлекается автомобилем.

2) противоположная точка зрения состояла в том, что эфир, заключенный в теле, продвигается вместе с телом и при движении тела эфир в нем остается тем же самым; если продолжить подобную механическую аналогию, то при отсутствии (относительного) движения тела по отношению к эфиру можно говорить о закрытом автомобиле, воздух в котором движется вместе с автомобилем (полностью увлекается);

3) эфир движется вместе с телом, но его скорость отлична от скорости тела.

Еще Физо поставил опыты для проверки вопроса об увлечении или неувлечении эфира. В его опытах в двух трубах равной длины вода двигалась в противоположных направлениях со значительными постоянными скоростями. Каждый из двух пучков света, которые создавались одним и тем же источником, проходит в этих трубах свой путь в различных условиях. Один пучок проходит в обеих трубах путь в направлении движения воды, другой же — против ее движения. Скорость световых лучей можно сравнивать путем наблюдения интерференционной картины, измеряя расстояние между двумя смещенными полосами при неподвижной и движущейся воде. Когда в трубах движется воздух, никаких изменений интерференционной картины не наблюдается. Опыты Физо и Майкельсона — Морли подтвердили формулу Френеля для коэффициента увлечения.

В дальнейшем Лоренц при анализе опыта Физо и гипотезы Френеля теоретически распространил полученные результаты и на случаи таких сред, в которых скорость света зависит от частоты, и нашел значение

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

Замечательный цикл работ Зеемана и его сотрудников подтвердил расчеты Лоренца.

Необходимо отметить, что при анализе рассматриваемой группы проблем оптики движущихся сред Лоренц в своих выводах пренебрегает членами второго порядка по сравнению с v/c , исходя из того, что почти ни в одном из обсуждаемых им опытов, произведенных с целью обнаружения влияния движения Земли на оптические явления, невозможно было обнаружить

эффекты, пропорциональные v^2/c^2 . Как бы близко электронная теория Лоренца ни подходила к решению проблем оптики движущихся сред, полная и единая теория отсутствовала, и Лоренцу, много сделавшему для отыскания выражений, инвариантных при переходе от одной инерциальной системы к другой, не удалось получить наглядной, физически убедительной картины аберрации в целом.

Наряду с аберрацией важным явлением в оптике движущихся сред является эффект Допплера. В 1842 г. появилась небольшая работа Допплера «О цвете двойных звезд и некоторых других небесных тел», сыгравшая видную роль в физике в целом и в оптике движущихся сред в частности. В этой работе впервые был поставлен вопрос о влиянии движения источника волн или наблюдателя на воспринимаемую наблюдателем частоту. Первым откликнулся на работу Допплера известный математик Б. Больцано. Однако физики не обратили серьезного внимания на работу Допплера, считая ее астрономической; астрономы же указывали на невозможность принятия допллеровского объяснения цвета двойных звезд.

Резкая полемика возникла между Допплером и Пецвалем. Последний рассматривал влияние равномерного движения среды на характер колебаний, распространяющихся в этой среде, и пришел к выводу, что движение среды может менять длину волны, ее скорость и интенсивность, но период должен при этом оставаться неизменным.

Значительный интерес представляет тот факт, что задолго до возникновения релятивистской кинематики и релятивистского закона сложения скоростей, в качестве одного из аргументов против точки зрения Пецваля фигурировало то, что эффект Допплера имеет чисто кинематическую природу и динамическая его трактовка бесплодна. В этой полемике Допплер оказался прав; однако работы Пецваля принесли пользу в том отношении, что в них был заострен вопрос о роли эффекта Допплера в оптике движущихся сред. Пецваль первоначально исходил из предположения о полном увлечении эфира движущимся телом, но в последующих своих работах рассматривал эффект Допплера с точки зрения неподвижного эфира.

Почти одновременно с дискуссией по вопросу о взаимодействиях между эфиром и веществом в связи с теорией аберрации эти же проблемы возникли и в теории допллер-эффекта. Плодотворными для распространения допллер-эффекта на молекулярную физику были работы Ангстрема, хотя в дискуссии Ангстрема и Маха правым оказался последний.

Решающее значение в проникновении принципа Допплера в оптику имели выполненные в 1862—1873 гг. опыты В. Хюггинса по изучению спектров звезд. В первой серии опытов 1862—1863 гг. Хюггинс исследовал спектры многих звезд, сравнивая их

со спектрами, полученными от земных источников, в частности от гейслеровых трубок. Он получил весьма ценные данные о химическом составе атмосферы звезд. Уже в 1864 г. он пытался найти смещение спектральных линий, обусловленное движением звезд. Но, хотя в его распоряжении был прибор, позволяющий разрешить компоненты D -линии Фраунгофера, наблюдения над Альдебараном, Сириусом, Арктуром, α Ориона, α Лиры, β Пегаса и другими звездами не дали результатов. По расчетам Хюггинса, он мог бы заметить смещения, соответствующие скоростям порядка 196 миль/сек.

В 1868 г. Хюггинсу удалось с помощью спектроскопа большей разрешающей способности найти смещение в D -линии спектра Сириуса и в линиях азота спектра большой туманности в Орионе. Решающим обстоятельством для доказательства принципа Допплера Хюггинс считал замеченное им в 1871 г. различие в спектрах краев Солнца, вызванное вращением Солнца вокруг своей оси.

Представляет интерес письмо Максвелла к Хюггинсу. Максвелл рассматривает два вопроса оптики движущихся сред: эффект Допплера и изменение показателя преломления при прохождении через движущуюся призму, не связывая их. Эффект Допплера, по мнению Максвелла, можно объяснить независимо от гипотезы увлечения или неувлечения эфира движущимися телами; второй же вопрос должен быть решен, исходя из гипотезы Френеля о частичном увлечении эфира. В 1894 г. А. Белопольский [8] предложил проект эксперимента для исследования принципа Допплера — Физо в лабораторных условиях, не прибегая при этом к космическим скоростям.

Загруднения при исследовании эффекта Допплера в лабораторных условиях состояли в том, что не удавалось получить земные источники света, движущиеся с большими скоростями. Сдвиги спектральных линий при достижимых в то время скоростях источников в земных условиях были весьма малыми и не могли регистрироваться существовавшими тогда приборами с их невысокой чувствительностью. Белопольский писал, что для лабораторного изучения доплер-эффекта необходимо усовершенствовать экспериментальную технику в двух направлениях: во-первых, в направлении увеличения скорости источника или его изображения и, во-вторых, значительного увеличения разрешающей способности спектральных приборов.

На установке интересной конструкции Белопольский дал экспериментальное подтверждение принципа Допплера — Физо в лабораторных (земных) условиях. В 1907 г. принцип Допплера — Физо был проверен Б. Б. Голицыным и И. Виллипом при помощи интерференционного спектрографа с высокой разрешающей способностью. В. А. Михельсон обратил внимание на то, что смещения линий в спектрах различных светил могут вызываться

не только движением светил по отношению к наблюдателю, но и изменениями, происходящими в среде, которая разделяет спектроскоп и исследуемый источник света. Четко выразив свое отношение как к самому принципу Допплера — Физо, так и к его астрофизическим приложениям, Михельсон отмечает, что принцип Допплера сам по себе носит чисто кинематический характер и, следовательно, не вызывает никаких сомнений, однако в числе предположений, на которых основано его применение, имеются допущения, в значительной степени произвольные и требующие опытной проверки.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ В ТРАКТОВКЕ ЛОРЕНЦА И ПУАНКАРЕ

Лоренц и Пуанкаре были наиболее близки к основным идеям специальной теории относительности, сформулированным в окончательной форме Эйнштейном независимо от них. Пути, по которым они шли к теории относительности, были во многом идентичны. Но в творчестве Лоренца многочисленные проблемы электродинамики движущихся тел занимали особо видное место.

Во введении к своей статье «О динамике электронов» (1906) Пуанкаре ссылался на работу Лоренца «Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света», опубликованной 27 мая 1904 г. в «Известиях Амстердамской академии», и писал: «Важность вопроса побудила меня снова заняться им: результаты, полученные мною, согласуются во всех наиболее важных пунктах с теми, которые получил Лоренц; я стремился только дополнить и видоизменить их в некоторых деталях; некоторые имеющиеся расхождения, как увидим дальше, не играют существенной роли» [9, стр. 52].

Пуанкаре далее указывает, что Ланжевен (а до него Бухерер) пытался видоизменить идею Лоренца. В то время как у Лоренца движущийся электрон принимает форму сплюснутого эллипсоида вращения, две оси которого остаются неизменными, у Ланжевена остается постоянным объем эллипсоида. Несмотря на подкупающее преимущество теории Ланжевена, вводящей только электромагнитные силы и силы связи, она, как показал Лоренц, несовместима с постулатом относительности.

Фохт уже в 1887 г. был близок к формальной стороне преобразований Лоренца, но весьма далек от их физической интерпретации. Он записывает уравнения колебаний упругой несжимаемой среды и рассматривает такие преобразования координат и времени, которые оставляют указанные уравнения инвариантными. Близко к теории Лоренца подошел Лармор; весьма интересна и своеобразна была эволюция Ланжевена. Однако