

ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ОСНОВАМ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

(1933—1934 гг.)

ПЕРВАЯ ЛЕКЦИЯ

(7.X 1933 г.)¹

Введение. Исторический обзор: гипотеза Рёмэра, измерения Физо и Фуко, aberrация, Юнг, Френель, опыт Араго и теория Френеля оптических явлений в движущихся телах, частичное увлечение эфира и следствия из него опыт Физо, эффект Допплера, трудности механических теорий эфира

Теория относительности — физическая теория. Эта теория была создана для охвата большого класса физических явлений, которые — надо сказать определенно — долго и упорно не укладывались в рамки существовавших воззрений. Основными здесь были электромагнитные явления в движущихся телах. Настойчивость, с которой занимались этими явлениями, показывает, что в них действительно крылись большие трудности. Эти трудности были связаны с вопросом о взаимодействии между материей и тем, что принято было называть эфиром.

¹ [При обработке этого курса лекций основными материалами послужили следующие: 1) записки С. М. Рытова (лекции 1—6), Г. С. Горелика (лекции 1—7), М. А. Дивильковского (лекции 2—6), М. А. Леонтовича (все лекции), З. Г. Либина (лекции 4—6); 2) стенограммы лекций 7—14; 3) конспекты и черновики самого Л. И. Мандельштама, написанные им в процессе подготовки лекций. Л. И. Мандельштам предполагал продолжить курс теории относительности в 1935/36 учебном году и действительно прочел четыре лекции. Как он сам сказал в первой из них, в этом курсе он хотел «коротко повторить историческую часть и релятивистскую кинематику, а затем показать, как строятся релятивистские механика и электродинамика, как они объясняют фактический опытный материал, и если останется время, то несколько слов посвятить общей теории относительности». Однако в четырех прочитанных лекциях (23 октября, 4, 10 и 22 ноября 1935 г.) Л. И. Мандельштам успел только повторить содержание лекций 1—9 курса 1934 г. Записки этих четырех лекций были использованы при обработке помещаемого здесь курса, но сами они, будучи конспективными, повторением прочитанного ранее, здесь не помещены. Материал обработан С. М. Рытовым.]

Принцип относительности¹ позволил преодолеть эти трудности и непротиворечиво объяснить явления в движущихся телах. Мы увидим, что релятивистская точка зрения действительно позволяет дать непротиворечивую, стройную и удивительно убедительную теорию этих [механических и электромагнитных] явлений (правда, постольку, поскольку дело идет о макроскопических явлениях), в которую, естественно, укладывается огромный материал, не поддававшийся прежним теориям, и которая была и остается плодотворной основой для всего дальнейшего развития физики вообще. В этом главная и — с точки зрения физики — единственная заслуга принципа относительности. Но это удалось сделать ценой существенного и принципиального изменения, или, вернее, *уточнения* (что часто забывают), некоторых основных понятий, с которыми оперировала физика, и в первую очередь наших воззрений на пространственные и временные измерения. Вот почему принцип относительности перерос те рамки, которые были ему предначертаны непосредственными физическими заданиями. Вот почему им была захвачена и механика, а в конечном счете вся физика. Вот чем объясняется тот, как вы знаете, огромный интерес, который вызвала теория относительности в среде не только физиков.

По существу это здоровый интерес, но формы его удовлетворения нередко уродливы. В литературе, особенно в популярной, все подчас чрезвычайно вульгаризировано или заменено непонятным философствованием о непонятных вещах. Для того чтобы действительно понять теорию относительности, нужно, во-первых, знать физику, знать факты, знать те явления, для объяснения которых теория была создана. Во-вторых, речь идет о теории, но сегодня язык физической теории — математика. Нужно владеть тем математическим аппаратом, который адекватен данным проблемам. В настоящее время вряд ли возможно действительно понять и усвоить какую-нибудь теоретическую физическую дисциплину без математики просто потому, что это слишком трудно (это обстоятельство имеет, по моему мнению, глубокое основание). Во всяком случае, в вопросе о принципе относительности я не вижу возможности более или менее серьезной «безматематической» трактовки. Мне кажется, что популярные изложения хотя и дают, может быть, некоторое представление о нем, но главная (физическая) сторона из них ускользает.

И третье. Чтобы усвоить принцип относительности, нужно не бояться думать. Нужно желание передумать «привычные» вещи.

¹ [Л. И. Мандельштам сплошь и рядом пользовался термином «принцип относительности» в смысле, эквивалентном «теории относительности», принцип же относительности в более узком смысле он часто называл *постулатом относительности*.]

Усвоение принципа относительности может быть значительно облегчено, если по-настоящему вдуматься в (сравнительно тонкие) основные понятия физики до принципа относительности.

Неправильно полагать, что принцип относительности перевернул наши понятия о времени и пространстве в том смысле, что на место старых ясных и четких понятий он поставил такие же новые. Это не так. Одна из больших заслуг принципа относительности в том и состоит, что он показал, что основные понятия, которыми оперировали раньше — во всяком случае, в известной своей части, — вовсе не были определены, что многие высказывания не имели вообще никакого смысла и что это главным образом и было причиной тех недоразумений, с которыми сталкивались, когда старались подвести теоретическое обоснование под те или иные физические явления. Если мы в этом убедимся, то для нас станет очевидным, что по существу парадоксальность принципа относительности заключается, так сказать, не в его положительных высказываниях, а в том обстоятельстве, что нам не были ясны самые, как казалось, простые и элементарные понятия. Мы увидим далее, что *какое-нибудь* уточнение этих понятий неизбежно. И когда мы будем подготовлены к необходимости *какого-нибудь* ответа, то тот ответ, который дает принцип относительности, уже вряд ли нам покажется парадоксальным.

Теория относительности распадается на две части — специальную и общую теорию. Более подробно об этом мы будем говорить потом, когда войдем уже в круг идей принципа относительности. Пока же я ограничусь следующим замечанием.

При исследовании всевозможных движений сразу же выделяется особый, специальный, наиболее простой случай движения — равномерное поступательное движение. Мы хотим изучать законы физических явлений именно в таких системах — движущихся равномерно и прямолинейно. По отношению к чему? По отношению к некоторой системе, являющейся почему-либо выделенной, особой.

Почему именно эта задача всегда привлекала внимание в первую очередь? Исторически ответ ясен. Мы работаем на Земле, которая вращается вокруг оси и движется вокруг Солнца. Периферические скорости суточного вращения гораздо меньше скорости поступательного движения по орбите. В первом приближении движение Земли можно считать именно прямолинейным и равномерным. И принцип относительности создавался, как вы знаете, двумя этапами.

Первый этап завершается в 1905 г., когда Эйнштейн опубликовал свою работу «Zur Elektrodynamik bewegter Körper»¹. Вы

¹ [Ann. Physik, 17, 891, 1905. Русский перевод в сборнике «Принцип относительности». ОНТИ, 1935.]

видите, какая здесь ставилась, по сути дела, еще скромная задача и как в самом названии работы отразился непосредственно предшествующий круг вопросов — электродинамика в движущейся среде. В этой работе Эйнштейн создал ту часть теории, которая теперь носит название *специального* принципа относительности и которая ограничивается прямолинейным и равномерным движением, т. е. связана с явлениями, происходящими на движущейся Земле. В работе Эйнштейна, несмотря на ее скромное название, заключена вся специальная теория относительности, и в дальнейшем сюда не было добавлено ничего принципиально нового.

Но вся постановка вопроса о принципе относительности вела к тому, чтобы распространить его на любые движения, а тогда неизбежно в круг рассмотрения входит гравитация. Так возникла *общая* теория относительности — второй этап, ознаменованный работой Эйнштейна «Zur allgemeine Relativitätstheorie», вышедшей в 1915 г.¹ В названии этой его работы уже нет речи ни об электродинамике, ни о гравитации, на первом плане — относительность.

Конечно, в наших беседах нет никакой возможности охватить все. Теория относительности пронизала теперь всю физику. Область тех вопросов, в которых она играет роль, необозрима, не говоря уже о содержании самой теории. Мы ограничимся почти без исключений специальной теорией относительности. Разумеется, и здесь есть множество вопросов — и физических, и математических, и философских. Я собираюсь сосредоточить внимание только на первых: на физических основах и на той математической структуре, в которую выливается принцип относительности на базе физических данных. Конечно, и эти вопросы невозможно рассмотреть полностью все. Но это, пожалуй, и не нужно. Я не считаю необходимым останавливаться на отдельных применениях теории и на математических выкладках, конечно, чрезвычайно важных, но, мне кажется, усваиваемых лучше при чтении литературы. Имеются учебники, и учебники отличные, и я вряд ли мог бы прибавить здесь что-нибудь существенное.

И, наконец, последнее замечание. Как правильней будет вести изложение? Вообще говоря, есть два пути: либо излагать теорию в ее современном виде, либо подойти к ней исторически. Мне кажется, дело здесь обстоит так. Знание исторического развития какой-нибудь основной теории всегда интересно и поучительно, но не всегда необходимо. Например, волновую оптику можно излагать без связи с корпускулярной оптикой Ньютона. Но в вопросе о принципе относительности положение, по моему

¹ [Berl. Ber., 778, 1915].

мнению, несколько иное, и это по целому ряду причин. Надо исподволь прийти к парадоксальным выводам теории относительности, надо осознать неизбежность этих выводов, надо знать, как пытались обойти трудности крупнейшие ученые и как это действительно не удавалось.

И затем — слишком жива еще связь принципа относительности с именем Лоренца и с предшествующими взглядами, в них уходят его корни, и хотя бы поверхностное знакомство с ними дает, мне кажется, чрезвычайно много для понимания самого принципа относительности.

Позвольте мне поэтому начать с небольшого исторического обзора, причем, конечно, я смогу остановиться только на основных этапах, и то поверхностно.

Основное открытие, явившееся той базой, без которой принцип относительности вообще не существовал бы, было открытие конечной скорости света Олафом Рёмером в 1675 г.

Наблюдая затмения ближайшего спутника Юпитера, время обращения которого в среднем из многих наблюдений было определено Кассини в $1\frac{3}{4}$ дня, он обнаружил уменьшение промежутков между затмениями, когда Земля находилась в *B*, и, наоборот, запаздывание затмений, когда она находилась в *A* (рис.1). Дело обстояло так, как будто движение спутника возмущено какой-то неизвестной причиной. Рёмер нашел правильное объяснение этому явлению в том, что свет распространяется с конечной скоростью. Он получил значение $3,1 \cdot 10^{10}$ см/сек.

Факты были настолько убедительны, что Кассини сначала принял это объяснение, невзирая на господствующие взгляды школы Декарта, согласно которым принципиально свет распространяется мгновенно. Однако наблюдения над другими спутниками Юпитера не дали такого же хорошего согласия с теорией Рёмера. Кассини от нее отказался. Сам Рёмер не дожил до подтверждения своей идеи.

Особенно настоятельная потребность в определении значения скорости света *c* возникла в XIX в. В 1849 г. Физо получил $3,14 \cdot 10^{10}$ см/сек; Фуко измерил *c* методом вращающегося зеркала (1862 г.); методом Фуко *c* измерял Корню (1874 г.). Измерение методом Фуко было с очень большой точностью повторено Майкельсоном в 1902 и 1926 гг. Он определял скорость света не только в воздухе, но также в воде и сероуглероде. Для сероуглерода результат оказался отличным от значения, вычисленного из пока-

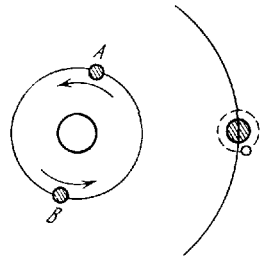


Рис. 1

зателя 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.

В 1926 г. Майкельсон получил наилучший из всех существующих результатов:

$$c = (299796 \pm 1) \cdot 10^5 \text{ см/сек.}$$

Я думаю, что эта точность несколько преувеличена. Современные таблицы дают обычно ± 4 , но и при такой точности c является наиболее точно измеренной из всех физических постоянных.

Тот факт, что свет распространяется с определенной конечной скоростью, в теории относительности приобрел совершенно исключительное значение. Мы увидим, что он имеет для учения о времени такое же значение, как факт существования твердых тел для учения о пространстве.

Следующее после Рёмера основное открытие, ставшее вместе с тем родоначальником всех последующих трудностей и вопросов оптики движущихся тел, было открытие Джемсом Брадлеем в 1728 г. абберрации. Он сообщает об этом в своем «Отчете о вновь

открытом движении неподвижных звезд»¹, присланном королевскому астроному Галлею. Брайлей нашел, что положение звезды γ Дракона меняется в течение года и что это изменение не является результатом параллакса. Он правильно понял, что это явление обусловливается движением Земли по орбите и конечной скоростью света. (Я должен оговориться, что слова «правильно понял» и вообще вся терминология, которую я пока употребляю, — это язык, на котором говорили до 1905 г.

Мы находимся пока целиком в кругу дорелятивистских понятий.) Брайлей стоял на точке зрения ньютоновской корпускулярной оптики, и вновь открытое явление — абберрация света — великолепно укладывалось в эту теорию. Действительно, подобное же явление мы наблюдаем, например, из окна железнодорожного вагона при падении дождевых капель.

Если мы смотрим на звезду через диафрагму C (рис. 2), то вследствие движения Земли световая корпускула, летящая от

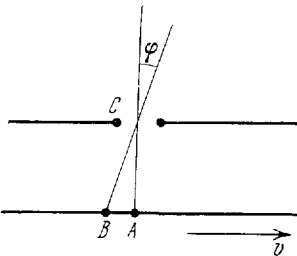


Рис. 2

¹ См. E. T. Whittaker. A History of the Theories of Aether and Electricity. Dublin, 1910, стр. 99.

звезды по линии CA , попадет не в точку A , а в точку B , которая станет на место A к моменту падения корпускулы на прямую AB . Для угла аберрации φ — угла между направлением AC на звезду при покоящейся Земле и направлением BC при движущейся Земле — получается, очевидно, $\operatorname{tg} \varphi = \frac{v}{c}$. Отсюда Бродлей мог определить скорость света. Он нашел для времени распространения света от Солнца до Земли значение 8 мин. 12 сек., что совпадало со средним из значений, определенных по методу Рёмера из затмений спутника Юпитера. Конечно, нужно было предположить, что сама Земля не действует заметно на частицы света. Замечу, что обнаружить аберрацию вообще можно лишь благодаря изменению направления движения Земли. Без этого мы не знали бы истинного направления на звезду.

После Бродлея в XVIII в. не было ни наблюдений, ни теоретических исследований по интересующим нас вопросам. Уиттэкер говорит о бесплодии этого периода¹. Физики XVIII в. почти все были приверженцами ньютоновской корпускулярной теории. Волновой точки зрения, выдвинутой Гюйгенсом в его знаменитом «*Traité de la lumière*» еще в 1690 г., придерживались лишь немногие, в частности Франклин и Эйлер; последний подчеркивал сходство света со звуком². Положение начало меняться лишь в самом конце XVIII в. с появлением Юнга. Ведущие ученые, возглавлявшие в это время французскую Академию наук, Лаплас, Пуассон, Био по-прежнему стояли на корпускулярной точке зрения, и последняя имела даже некоторые достижения. Так, например, Лаплас сумел довольно хорошо объяснить двойное лучепреломление.

В 1799 г. Юнг выступил с критикой господствующей теории. Он говорит, что корпускулярная теория его не удовлетворяет, ибо он не понимает, как она может объяснить установленный с огромной точностью факт независимости скорости света от его интенсивности... Волновая же теория объясняет это совершенно естественно. Трудно сказать, почему именно *это* было непонятно Юнгу, а не что-нибудь другое, но с этого он начинает свою критику.

Юнг — вообще замечательный человек. Оказывается, он еще тогда высказал мысль о существовании электрического эфира и о возможном тождестве его с эфиром световым³. «Но, — пишет Юнг, — я до сих пор не смог обнаружить, чтобы преломляющая сила эфира претерпевала какое-либо изменение под действием электричества». Юнг первый дал правильное объяснение интер-

¹ Loc. cit., стр. 100.

² Loc. cit., стр. 103.

³ Loc. cit., стр. 105.

ференции, он первый истолковал явления поляризации как результат поперечности световых колебаний. Надо иметь в виду, что это был чрезвычайно трудный шаг, ибо в то время теории упругости твердых тел еще не существовало, а в газах и жидкостях возможны лишь продольные волны.

В 1804 г. Юнг дает объяснение аберрации с точки зрения волновой теории. Это общеизвестное элементарное (кустарное) объяснение, но все же действительно объяснение. Оно основано на предположении, что эфир *не увлекается* Землей. Тогда волны, прошедшие через диафрагму (объектив трубы) и распространяющиеся в эфире так же, как если бы Земля покоилась, попадут левее того места AB , куда они пришли бы в случае неподвижной Земли (см. рис. 3). Равным образом в том случае, если эфир полностью увлекается Землей, волны попадут на AB , т. е. никакой аберрации не будет.

Мы видим, что весь вопрос приобретает принципиальный интерес, что здесь сразу же возникает та кардинальная проблема, которая потом оставалась не разрешенной вплоть до принципа относительности — проблема взаимодействия между движущейся Землей и эфиром, а тем самым и проблема взаимодействия между эфиром и материей вообще ¹.

Несмотря на мощный толчок, который получила волновая теория со стороны Юнга, корпускулярная теория не сдавалась. Дифракция света оставалась камнем преткновения для волновой теории, и, как говорит Уиттэкер, сторонники корпускул решили, что настало время для окончательной победы их теории ². И вот Парижская академия наук предложила «дифракцию» в качестве темы на премию на 1818 г. Однако надежды не оправдались: на конкурс была представлена работа, в которой с волновой точки зрения объяснялись все известные интерференционные, дифракционные и поляризационные явления. Автором этой работы был Френель.

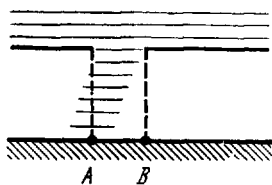


Рис. 3

Тогда и разыгрался знаменитый инцидент между Пуассоном и Френелем. Пуассон, бывший членом конкурсной комиссии, обратил внимание на «нелепый» вывод, вытекающий из теории Френеля: в центре тени круглого диска должно находиться светлое пятно. Араго тут же сделал опыт, и оказалось, что такое пятно

¹ [Л. И. Мандельштам везде пользовался термином «материя» в смысле старого термина «весомая материя», т. е. вещество.]

² Loc. cit., стр. 113.

действительно есть. Победа волновой теории была окончательной и ее признание — всеобщим.

В том же году Френель напечатал работу о влиянии движения Земли на оптические явления, в которой он высказался определенным образом и по вопросу о взаимодействии материи и эфира. Еще до этого Мичель обратил внимание на то, что при неувлекемом эфире коэффициент преломления тела должен быть различен в зависимости от того, движется ли тело навстречу источнику света (скорость световых частиц, падающих на тело, равна при этом $c + w$) или удаляется от него (скорость равна $c - w$). Следовательно, должно меняться и фокусное расстояние линзы, и угол отклонения луча призмой. Боскович указал на другие аналогичные явления.

И вот Араго, который стоял тогда еще на корпускулярной точке зрения, делает следующий опыт. Он смотрит, изменяется ли показатель преломления призмы для света от звезды благодаря движению Земли. Ожидаемое изменение угла отклонения луча составляло $1'$. Араго не получает никакого эффекта и делает заключение, что движение Земли на показатель преломления не влияет. Это заключение правильно, действительно не влияет. Но доказал ли это Араго своими опытами? Он не мог этого доказать: точность его опытов была недостаточна, чтобы обнаружить столь малый эффект, и он, по сути дела, — как это часто бывало в истории физики — *угадал* правильный вывод, интуитивно почувствовал, что зависимости от движения Земли нет.

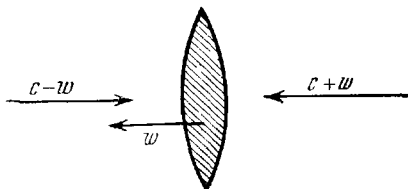


Рис. 4

Так или иначе, этот отрицательный результат считался фактом и требовал объяснения. Сам Араго, насколько можно судить, видел только следующий, правда довольно остроумный, выход из положения, который он излагает в своем письме к Френелю в 1818 г. Предположим, пишет Араго, что свет состоит из частиц, вылетающих из источника со всевозможными скоростями, но наш глаз чувствителен только к частицам со скоростью c . Тогда в случае движущейся призмы (т. е. призмы, движущейся вместе с нами со скоростью w к источнику) мы увидим те час-

тицы, скорость которых относительно источника равна $c - w$, а скорость относительно призмы равна $(c - w) + w = c$, и, таким образом, никакого влияния движения призмы не обнаружим. Однако Араго не был удовлетворен этим объяснением, и в конце письма он обращается к Френелю с просьбой подумать, нельзя ли объяснить отсутствие эффекта с волновой точки зрения.

В ответном письме Френель дает свое объяснение. Гипотезу Араго он считает действительно неудовлетворительной, ибо трудно допустить столь резкую избирательность нашего глаза, что малейшее отклонение скорости от c уже делает свет невоспринимаемым. И он дает свою теорию вопроса, теорию волновую, основанную на предположении о том, что все пространство заполнено *неподвижным* эфиром. Кстати говоря, что понимали под словом «неподвижный»? Говоря об *абсолютном* движении Земли, физики имели в виду ее движение по отношению к «неподвижным» звездам. Таким образом, «неподвижный эфир» означало неподвижный в системе неподвижных звезд.

Теория Френеля оказала громадное влияние на все последующее. В его письме содержится предсказание «частичного увлечения» эфира — и по сей час одного из наиболее важных явлений в движущихся телах. Всякая теория, в том числе и принцип относительности, должна объяснить это явление.

Френель говорит так: действительно, скорость света в стекле иная, чем в пустоте, но само стекло здесь, так сказать, *ни при чем*. Дело просто в том, что стекло, как и другие тела, *сгущает* заключенный в нем эфир. Плотность эфира в стекле (ρ_1) больше, чем в пустоте (ρ), упругость же эфира неизменна (модуль сдвига N). Так как скорость распространения поперечных колебаний равна $\sqrt{\frac{N}{\rho}}$, то коэффициент преломления в случае неподвижного стекла есть

$$n = \frac{c}{c_1} = \sqrt{\frac{N}{\rho}} : \sqrt{\frac{N}{\rho_1}} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho}}. \quad (1)$$

Пусть теперь стекло движется по отношению к эфиру со скоростью w , т. е. эфир *вне стекла* обтекает его со скоростью $-w$. Но скорость эфира по отношению к стеклу *внутри стекла* будет иной, так как плотность эфира там другая, а мы требуем *сплошности*, неразрывности эфира на поверхности S (рис. 5). Другими словами, количество эфира, притекающее каждую секунду извне на единицу поверхности S , т. е. ρw , должно равняться количеству эфира, оттекающего от этой единицы поверхности за то же время *внутрь*, т. е. $\rho_1 w_1$:

$$\rho w = \rho_1 w_1.$$

Отсюда и из (1) получаем

$$w_1 = w \frac{\rho}{\rho_1} = \frac{w}{n^2}.$$

Таким образом, внутри, где эфир уплотнен, его скорость по отношению к стеклу есть $w_1 < w$, а по отношению к внешнему эфиру она равна, следовательно,

$$w - w_1 = w \left(1 - \frac{1}{n^2}\right). \quad (2)$$

Выражение $1 - \frac{1}{n^2}$ и есть знаменитый френелевский коэффициент увлечения. Он означает, что эфир увлекается стеклом ($w_1 \neq w$), но не полностью ($w_1 \neq 0$), а *частично*. Конечно, мы модернизировали изложение Френеля. Стокс писал, что у Френеля нет соображений о сплошности эфира. Лармор считал, что вообще у него не все понятно. Дело в том, что сам Френель пишет о том, что стеклом увлекается (полностью) лишь *избыток плотности эфира в стекле*... Именно эта трактовка считалась туманной и непонятной. Разумеется, взгляды Френеля далеки от современных, но просто поразительно, как по-своему он сумел предугадать дальнейшее развитие вопроса, а именно то его освещение, которое он получил потом в электронной теории.

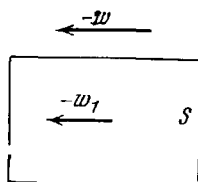


Рис. 5

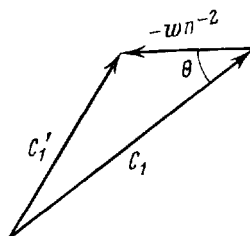


Рис. 6

Имея (2), нетрудно ответить и на следующий вопрос: какова скорость света в стекле по отношению к наблюдателю, движущемуся вместе со стеклом? Вопрос этот чисто кинематический и решается сразу. По отношению к эфиру внутри стекла свет распространяется со скоростью c_1 , но сам эфир движется относительно стекла со скоростью $-wn^{-2}$. Скорость c_1' равна просто геометрической сумме $c_1 - wn^{-2}$ (рис. 6), откуда с точностью до членов второго порядка относительно $\frac{w}{c_1}$

$$c_1' = c_1 - wn^{-2} \cos \theta.$$

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 совершенно изменило бы дело, и т. д. Но так или иначе результат получается у него верный. Действительно, говорит Френель, угол преломления зависит от w из-за изменения скорости падающей волны, но этот эффект *в первом порядке компенсируется эффектом частичного увлечения*. Таким образом, ответ Френеля совершенно иной, чем у Араго.

Резюмируем. Эфир существует и неподвижен. Благодаря этому преломление света в движущемся теле должно отличаться от преломления в неподвижном. Опыт говорит, что этого нет. Френель возражает: есть, но эффект этот очень мал, так как в первом порядке он компенсирован частичным увлечением. Это утверждение мы теперь и докажем. Заметим, что при *полном увлечении* эфира оптические явления, конечно, протекали бы в точности одинаково как для движущегося, так и для неподвижного наблюдателя. Но тогда не было бы аберрации.

Мы докажем даже гораздо больше, а именно, что движение относительно эфира не оказывает влияния на *любые* оптические явления с точностью до второго порядка относительно $\frac{w}{c}$, т. е. с точностью, которая только и была доступна во времена Френеля и еще долгое время после него. Я приведу доказательство Френеля в той модернизированной форме, которую дал ему Лоренц.

Пусть луч света распространяется в некоторой среде, показатель преломления которой n есть функция точки, прерывная или непрерывная — безразлично. Если эта среда покоится, то время, в течение которого свет идет из A в B , выразится интегралом

$$\tau = \int_A^B \frac{ds}{c_1},$$

где $c_1 = c_1(x, y, z)$. Если же среда движется со скоростью w вдоль оси x , то вместо c_1 нужно взять c'_1 , т. е. с точностью до $\frac{w^2}{c^2}$ время прохождения из A в B будет

$$\tau' = \int_A^B \frac{ds}{c'_1} = \int_A^B \frac{ds}{c_1 - wn^2 \cos \theta} \approx \int_A^B \frac{ds}{c_1} + \frac{w}{c^2} \int_A^B \cos \theta ds = \tau + \frac{w}{c^2} (x_B - x_A).$$

Таким образом, время прохождения меняется уже в первом порядке, но это изменение зависит лишь от положения начальной и конечной точек и не зависит от формы пути.

Как известно, вся геометрическая оптика может быть основана на принципе Ферма: из всех возможных путей луч пойдет по тому, который дает экстремальное значение τ (в нашем случае линзы или призмы действительный путь даст $\tau = \min$). Отыскивая действительный путь луча из A в B , мы в случае неподвижной среды будем требовать $\tau = \min$, а в случае движущейся среды — $\tau' = \min$. Но второй член в τ' не зависит от формы пути и, следовательно, никак не скажется на виде экстремали. А это значит, что *ход лучей, вся геометрическая оптика, в первом порядке будут для покоящейся и для движущейся среды одни и те же*. Это верно лишь в первом порядке, но ведь только на такую точность и могли претендовать все тогдашние опыты.

Однако это еще не все. Легко видеть, что *интерференционные и дифракционные явления в первом порядке тоже не зависят от движения среды*. Действительно, во всех интерференционных явлениях имеютс я два пути света и явление зависит *лишь от разности* времен пробега лучей. Но добавочный член в τ' не зависит от формы пути, и потому из разностей времен он выпадает. Тем самым все оптические опыты, в которых путь света замкнут (опыты с одними часами), могут обнаружить движение относительно эфира только во втором порядке относительно $\frac{v}{c}$. Однако на времени пробега в *одном* направлении движение по отношению

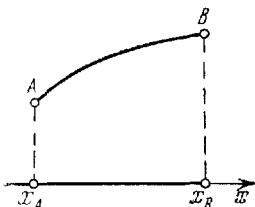


Рис. 7



Рис. 8

к эфиру должно сказаться уже в первом порядке. Таким образом, опыт, в котором измерялось бы самое время пробега (опыт с двумя часами), дал бы отличие уже в порядке $\frac{v}{c}$.

Один такой опыт мы знаем. Это опыт Рёмера, и еще Максвелл предлагал решить с его помощью вопрос об увлечении или неувлечении эфира Землей. До теории относительности считали, что *опыт неосуществим лишь из-за недостаточной точности измерений*, и не замечали того, что он попросту лишен смысла. Не вдаваясь сейчас в детальное обсуждение, замечу лишь следующее

Опыт аналогичен известному опыту Штурма и Колладона, которые измеряли скорость звука в воде на Женевском озере. В одном пункте производился звук и одновременно давалась световая вспышка, а в другом пункте измерялось время между вспышкой и приходом звука. Но что будет служить такой вспышкой, если измеряется скорость света? Именно здесь кроется вся трудность, в этом — гвоздь вопроса, хотя дорелятивистская физика не видела здесь ничего принципиального.

В 1851 г. Физо подтвердил френелевскую формулу коэффициента увлечения опытами с распространением света в движущейся воде. Майкельсон и Морлей (1878 г.) также нашли полное согласие с формулой Френеля. Не так давно коэффициент увлечения был очень точно измерен Зеemanом. Его устройство несколько отличалось от майкельсоновского, и соответственно была переработана теория. Результат и здесь дал полное подтверждение формулы Френеля. Замечу, что в теории относительности френелевский «коэффициент увлечения» является просто следствием релятивистского закона сложения скоростей.

Нужно указать еще на одно из величайших открытий — эффект Допплера. В 1842 г. Христиан Допплер теоретически показал, что цвет света должен зависеть от движения наблюдателя и источника. Наблюдаемый период колебаний T' связан с истинным периодом T соотношением

$$\frac{T'}{T} = \frac{c - w_{\text{ист}}}{c - w_{\text{набл}}}, \quad (3)$$

где $w_{\text{ист}}$ и $w_{\text{набл}}$ — скорости вдоль по лучу. Если наблюдатель и источник движутся вместе, то $T' = T$, но во втором порядке есть разница между случаем, когда наблюдатель приближается к неподвижному источнику [$T'/T = c/(c + w)$], и случаем, когда источник приближается к неподвижному наблюдателю [$T'/T = (c - w)/c$] (рис. 9).

Эффект Допплера является прямым следствием конечной скорости распространения света и хорошо укладывается в теорию неувлекаемого эфира. В этом предположении формула (3) выводится элементарно. Физо первый (в 1848 г.) указал на громадное значение эффекта Допплера для астрономии, для определения лучевых скоростей звезд независимо от величины расстояния до них ¹.

Позвольте мне резюмировать. С одной стороны, имеется аберрация, с другой — независимость оптических явлений от дви-

¹ [Исследование оптического эффекта Допплера в лабораторных условиях (с помощью наземного источника света) впервые было проведено в 1894—1900 гг. А. А. Белопольским.]

жения Земли. Правда, независимость лишь в первом порядке, но еще не было опытов, которые могли бы пойти дальше. Ведь для Земли $\frac{w^2}{c^2} \sim 10^{-8}$. Френель показал, как совместить в первом порядке результаты наземных опытов с абберацией, и в течение некоторого времени царило благополучие. Но потом, не столько даже из-за новых фактов, сколько в результате углубленного исследования, начались неприятности. Эфир, когда за него взялись всерьез и начали вникать во все детали, стал создавать одну трудность за другой.

Для возможности поперечных колебаний надо принять, что эфир — твердое тело. Но как примирить такое представление с тем, что все планеты свободно проходят сквозь него? Согласившись все же с тем, что эфир твердое тело, мы сталкиваемся с рядом трудностей в вопросе об отражении света. На границе раздела упругих сред должно соблюдаться *шесть* условий непрерывности — для трех скоростей и трех напряжений. Поперечные же колебания могут удовлетворить только *четырем* условиям. Еще в 1837 г. Стокс показал, что отражение и преломление поперечных волн в упругих средах неизбежно должно сопровождаться возникновением продольных волн. Но в оптике таких волн нет.

Другой вопрос — о плоскости поляризации. Френель, исходя из своей теории эфира, обладающего всюду одинаковой упругостью, считал, что колебания происходят перпендикулярно к плоскости поляризации. Нейман доказывал, что колебания совершаются параллельно плоскости поляризации, так как он принимал постоянной плотность эфира, а различной его упругость.

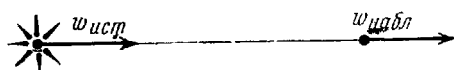


Рис. 9

Делал он это неспроста. По Френелю получается, что в *анизотропных* телах различна по разным направлениям *плотность* эфира. Но ведь она все-таки скаляр...

Стокс полагал, что ему удалось доказать возможность абберации в случае увлекаемого эфира в предположении, что он несжимаем и движение его безвихревое. Однако впоследствии Лоренц показал, что это неверно. При наличии потенциала скоростей несжимаемая жидкость неизбежно должна скользить по поверхности движущегося в ней шара. Это скольжение достигает $1,5 w$.

Планк попытался спасти аберрацию в увлекаемом эфире, допустив, что он сжимаем. Тогда плотность его у поверхности Земли должна быть в e^{11} раз больше, чем в межзвездном пространстве. Наряду с этим скорость распространения света c и тут и там одинакова. Подобные вещи могут нравиться или не нравиться, но удовлетворить они не могут.

Возникли такие трудности, что эфир вообще утерял что-либо общее с обычными телами. Большое количество попыток дать механическую теорию эфира предпринимал Виллиам Томсон. Так, например, он указал на возможную аналогию со смолой: она течет при медленных движениях (отсутствие сопротивления эфира движению планет), но камертон, сделанный из смолы, звучит, т. е. для быстрых колебаний она ведет себя как твердое тело (распространение в эфире поперечных световых колебаний). Однако с аналогиями много не сделаешь. Количественно все это не получалось. Ведь нужно было, чтобы сопротивление движению планет было не «очень мало», а *совсем отсутствовало*. В этом отношении вопрос напоминает проблему сверхпроводимости, где тоже нельзя построить теорию приближенно (т. е. допустить «очень малое» сопротивление). Таким образом, теория эфира как упругого тела зашла в тупик. Удовлетворительного разрешения проблемы не было.

В 60-х годах весь вопрос получил совершенно другую постановку. В эти годы Максвелл в ряде работ создал свое учение об электрических и магнитных явлениях и дал электромагнитную теорию света. Наступил перелом. Как обстояло дело со всеми этими вопросами в теории Максвелла — об этом в следующий раз.