

способы измерения этой абсолютной скорости или, как было принято говорить, обнаружения «эфирного ветра».

Поиски эфирного ветра и изучение всех связанных с этим вопросом проблем сыграли огромную роль в развитии физики. Отрицательный результат этих поисков привел к коренному пересмотру понятий пространства и времени, реализованному в созданной Эйнштейном теории относительности (1905 г.). Первые фундаментальные результаты в этом направлении были получены при изучении электродинамических и оптических явлений. Затруднения электродинамики движущихся тел уже отмечались в т. II, § 39. В следующих же параграфах мы остановимся на оптических проблемах, связанных с эфиром.

#### § 24. Оптика движущихся сред и проблема эфира

Волновая теория света привела к возникновению в физике понятия об эфире как о всепроникающей среде, в которой могут распространяться упругие возмущения и волны. Эта среда должна обладать ничтожно малой плотностью, чтобы не создавать заметного сопротивления движению небесных тел, не обнаруженного многовековыми наблюдениями астрономов.

Установленная при изучении поляризационных явлений поперечность световых волн заставила считать эфир несжимаемым и способным испытывать лишь упругие деформации сдвига. Обозначая через  $G$  модуль сдвига и  $\rho$  — плотность эфира, получаем (т. I, § 56) для скорости света выражение

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (24.1)$$

Свет распространяется не только в пустоте, но проходит через различные прозрачные тела (стекло, вода, воздух и т. д.). Следовательно, эфир заполняет не только межпланетное пространство, но и заключен внутри тел. Скорость света в среде меньше его скорости в пространстве между телами. Следовательно, свойства эфира в телах изменяются. Воздействуя на заключенный внутри них эфир, тела уменьшают его упругость  $G$  или увеличивают его плотность  $\rho$ .

Таковы вкратце основные представления о свойствах мирового эфира, якобы объяснявшие большинство оптических явлений.

Возникновение электромагнитной теории света не изменило существа проблемы. Один из основоположников теории электромагнетизма — Фарадей — представлял себе электрическое и магнитное поля как определенного рода деформации эфира. Максвелл, отказавшись от попыток построения механической модели эфира,

рассматривал объединенные им уравнения электромагнитного поля как уравнения, описывающие свойства этого эфира.

Таким образом, в электромагнитной теории изменились лишь частности, но осталось неприкосновенным основное представление о существовании эфира, заполняющего все мировое пространство вне и внутри тел.

Итак, примем, что свет распространяется в эфире. Если это предположение справедливо, то при движении источника, наблюдателя или прозрачного тела световой сигнал по отношению к ним будет распространяться иначе, чем по отношению к неподвижным телам. Измеряя пути и времена распространения сигналов в движущихся системах, можно было бы определить абсолютную скорость их движения по отношению к эфиру. Разберем три группы подобных оптических явлений.

1. Звездная аберрация. Рассмотрим, во-первых, как сказывается движение по отношению к лучу света на видимом положении источника света. Впервые на этот эффект обратил внимание Брайлей (1728 г.) при наблюдении смещений звезд на небесной сфере, вызванных годичным движением Земли.

Пусть луч света распространяется от звезды  $S$  к входному отверстию телескопа  $A$  (для простоты телескоп изображен в виде трубы с входным и выходным отверстиями  $A$  и  $B$ ). На рис. 1.126, *а* представлен случай, когда телескоп неподвижен либо движется вдоль луча света. Как видно из рисунка, луч света, пройдя последовательно сквозь отверстия  $A$  и  $B$ , достигнет фотопластины  $\Phi$  и даст на ней след. На рис. 1.126, *б* представлен случай, когда телескоп движется перпендикулярно к лучу света со скоростью  $U$ . Луч света распространяется вдоль прямой  $SAO$ . Если бы ось телескопа была параллельна этой прямой, то свет, прошедший в отверстие  $A$ , не прошел бы отверстия  $B$ : отверстие  $B$  совпадало бы с  $O$  в момент прохождения света через  $A$ . Но за время движения света вдоль трубы отверстие  $B$  сместилось бы от точки  $O$  вправо. При длине трубы  $l$  и скорости света в ней  $c$  время прохождения светом трубы  $\Delta t$  равно

$$\Delta t = \frac{AO}{c} \approx \frac{l}{c}; \quad (24.2)$$

последнее равенство имеет место в силу крайней малости угла  $\Delta\varphi$ .

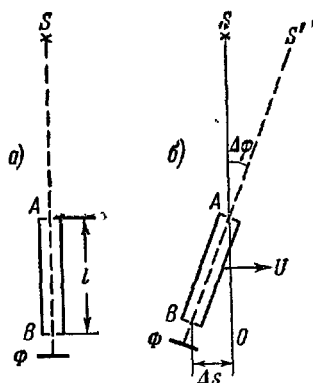


Рис. 1.126.

Величина смещения  $\Delta s$  при скорости трубы  $U$  равна

$$\Delta s = U \Delta t \approx \frac{Ul}{c}. \quad (24.3)$$

Для того чтобы свет, прошедший через  $A$ , прошел затем  $B$ , нужно наклонить трубу так, чтобы в момент прохождения света через  $A$  точка  $B$  отстояла от  $O$  на  $\Delta s$  слева, как это показано на рис. 1.126,б. В этом случае идущий сверху луч света и движущееся слева отверстие  $B$  одновременно сойдутся в точке  $O$  и на фотопластинке будет получен след звезды.

В рассматриваемом случае ось телескопа оказывается наклонной к истинному направлению луча света  $SAO$  под углом  $\Delta\varphi$ . В силу малости этого угла (так как всегда  $U \ll c$ ) можем считать  $\Delta\varphi \approx \sin \Delta\varphi \approx \text{tg } \Delta\varphi$ . Поэтому

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta s}{l} \approx \frac{Ul}{cl} = \frac{U}{c}. \quad (24.4)$$

Звезда, расположенная на небесной сфере в направлении  $AS$ , будет в результате движения телескопа видима в направлении  $AS'$  под углом  $\Delta\varphi = \frac{U}{c}$  к истинному положению.

Через полгода вектор орбитальной скорости Земли меняет знак, следовательно, меняет знак и угол  $\Delta\varphi$ . Измеряя отклонения положений звезд, обусловленные рассмотренным эффектом, Брайден нашел для скорости света величину, весьма близкую к истинной:  $c = 303\,000$  км/сек.

Отметим сразу же, что возможность наблюдения aberrации звезд обусловлена не истинной скоростью Земли относительно звезд или эфира, а только и з м е н е н и е м направления скорости Земли.

В самом деле, какое положение звезды на небесной сфере мы можем отметить как истинное, не обусловленное aberrацией? Единственное, что можно отметить, это изменение aberrации, обусловленное изменением скорости самой Земли при ее движении по орбите.

Наличие aberrации можно объяснить и с корпускулярной, и с волновой точек зрения. Но результаты объяснения будут различны.

**К о р п у с к у л я р н а я т е о р и я.** Свет есть поток корпускул, покидающих источник света со скоростью  $c$  по отношению к нему. К ним применим закон сложения скоростей. По результатам aberrации можно, следовательно, определить относительную скорость источника света и наблюдателя. Понятие абсолютной скорости смысла не имеет. Принцип относительности Галилея остается в силе.

Волновая теория. Для ее интерпретации пригоден тот же рис. 1.126, но только вдоль прямой SAO следует представить себе не поток летящих корпускул, но узкий (однако не искаженный в отверстии A дифракцией) поток волн. Отличие в трактовке будет в следующем. Волны, покидающие источник, распространяются в несущей среде в соответствии с ее свойствами. Их скорость по отношению к среде (эфиру) постоянна и не зависит от скорости источника. Аберрация определяется скоростью телескопа по отношению к эфиру. Абсолютная скорость (скорость по отношению к эфиру) имеет смысл. Принцип относительности оказывается неверным.

2. Эффект Доплера. Акустический эффект Доплера рассмотрен в т. I, § 57. В случае движения вдоль одной прямой имеем следующее. Пусть  $\nu_0$  — частота источника волн,  $\nu$  — скорость волн относительно несущей среды,  $u_n$  — величина скорости наблюдателя относительно среды,  $u_s$  — величина скорости источника волн относительно среды. В приводимой формуле верхний знак (в числителе и знаменателе) берется, если при движении наблюдателя или источника происходит их сближение, нижний знак отвечает удалению,  $\nu$  — наблюдаемая частота:

$$\nu = \nu_0 \frac{\nu \pm u_n}{\nu \mp u_s}. \quad (24.5)$$

Если скорости наблюдателя  $u_n$  и источника  $u_s$  относительно среды много меньше  $\nu$ , т. е. если

$$\frac{u_n}{\nu} \ll 1, \quad \frac{u_s}{\nu} \ll 1, \quad (24.6)$$

формула (24.5) упрощается. С точностью до членов второго порядка относительно малых величин (24.6) имеем:

$$\nu = \nu_0 \left( 1 \pm \frac{u_n + u_s}{\nu} \right). \quad (24.7)$$

Обозначая через  $u$  величину относительной скорости сближения наблюдателя и источника  $u = u_n + u_s$ , получаем:

$$\nu = \nu_0 \left( 1 \pm \frac{u}{\nu} \right), \quad (24.8)$$

где знак плюс берется при сближении, минус — при взаимном удалении источника и наблюдателя. Таким образом, в случае (24.6), т. е. малых скоростей источника волн и наблюдателя, эффект Доплера позволяет установить лишь относительную их скорость, но не скорость по отношению к среде.

Пулковскому астроному А. А. Белопольскому принадлежит идея использовать эффект Доплера для измерения относительных

лучевых (т. е. направленных по лучу зрения) составляющих вектора скорости звезд. Для этого нужно было установить, имеет ли место эффект Доплера в оптике, и проверить применимость формулы (24.8). Опыт в земных условиях был поставлен Белопольским в 1900 г. Белопольский увеличил эффективную скорость источника за счет многократного отражения света от движущихся зеркал.

Схема прибора изображена на рис. 1.127. Два колеса с укрепленными на них зеркалами  $Z$  вращаются в противоположных направлениях с большой скоростью. Источник света  $S$  неподвижен. Если линейная скорость зеркал

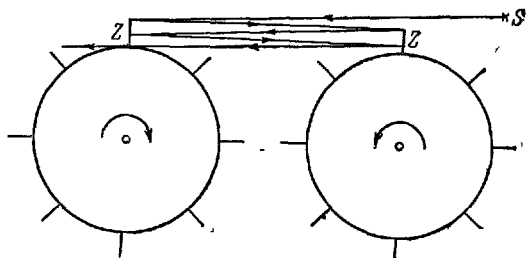


Рис. 1.127.

равна  $v$ , а  $n$  — число отражений от каждого из зеркал, то суммарный эффект их действия будет таким, как если бы источник перемещался по отношению к спектро스코пу со скоростью  $\omega$ , равной

$$\omega = 2nv. \quad (24.9)$$

Показанное на рисунке направление вращения отвечает случаю приближения источника, обратное — удалению.

В дальнейшем аналогичные опыты многократно повторялись. Они подтверждали пригодность формулы (24.8) при неизменном соблюдении условия (24.6).

Доплер-эффект по самой своей природе, казалось бы, может быть истолкован лишь в рамках волновой теории. Но, как уже подчеркивалось, в силу условий (24.6) эффект позволял судить лишь об относительной скорости источника света и наблюдателя, но не давал возможности решить поставленную выше задачу: определить скорость движения относительно эфира. Из-за огромной величины скорости света было технически невозможно выйти за рамки условий (24.6).

Работы Белопольского принесли большой успех астрономии. Они позволили надежно определять лучевые скорости небесных тел, скорости выброса газов неустойчивыми звездами («новыми» и «сверхновыми»), скорости расширения и сжатия пульсирующих звезд («цефеид»), лучевые скорости облаков межзвездного газа и т. д. Во всех этих работах измеряется частота линии поглощения какого-либо элемента. Затем она сравнивается с частотой той же спектральной линии, полученной в лабораторных условиях. Для достижения

высокой точности оба спектра — спектр звезды с линиями поглощения и спектр (испускания) элемента, линии поглощения которого обнаруживаются в спектре звезды, фотографируются на одну пластинку. Таким образом достигается высокая точность в определении  $\Delta\nu = \nu - \nu_0$ . При наблюдении радиолокационными методами за движением искусственных спутников и космических ракет эффект Доплера позволяет с высокой точностью определять их лучевую скорость.

3. Увлечение эфира веществом. Опыт Физо. Одновременно с проблемой движения тел по отношению к эфиру возникла и другая проблема — возможное увлечение эфира движущимися телами. Как упоминалось в начале параграфа, вещество воздействует на заключенный в нем эфир, изменяя скорость распространения света. Если вещество движется в эфире, то остается ли эфир совершенно неподвижным, увлекается ли он веществом и если увлекается, то в какой степени?

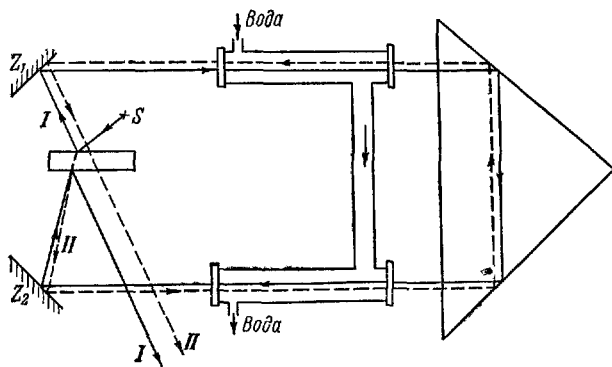


Рис. 1.128.

Для ответа на этот вопрос следовало произвести измерение скорости света в движущихся средах. Такой опыт был поставлен впервые Физо в 1851 г., затем повторен с высокой точностью Майкельсоном в 1887 г. На рис. 1.128 изображена установка Майкельсона. Лучи света от источника  $S$  расщепляются плоскопараллельной стеклянной пластинкой на два пучка, отражаемых зеркалами  $Z_1$  и  $Z_2$  в трубы с водой. Они движутся по трубам по встречным направлениям, затем часть луча  $I$ , прошедшая сквозь пластинку, и часть  $II$ , отраженная от нее, идут параллельно, так что можно наблюдать их интерференцию. Наблюдая вначале интерференционную картину при неподвижной воде, а затем изменения этой картины по мере увеличения скорости воды, можно судить о добавочной разности хода, возникающей в силу того, что один луч движется по течению, другой — против. Опыт показал, что при скорости света в

неподвижной воде  $u = \frac{c}{n}$  ( $n$  — показатель преломления воды) и при скорости воды  $v$  скорость света в ней  $w$  равна

$$w = u + v \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{c}{n} + v \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right). \quad (24.10)$$

Если бы эфир совершенно не увлекался средой, то скорость света в движущейся среде не должна бы отличаться от скорости света в неподвижной среде:  $w$  должно было бы равняться  $u$ . Если бы эфир, заключенный в теле, перемещался вместе с ним, то скорость света по отношению к среде должна бы равняться  $u$ , а следовательно, для  $w$  получилось бы значение  $w = u + v$ . Формула (24.10) была истолкована в том смысле, что имеет место «частичное увлечение», тем большее, чем больше  $n$ . Теоретический вывод формулы (24.10) был сделан лишь много позже и с иной точки зрения (см. § 28).

Все рассмотренные выше опыты требовали своего истолкования. Но для такого толкования необходимо было сформулировать законы электромагнетизма или хотя бы оптики движущихся сред.

Ранее уже указывалось, что признание неподвижного эфира влечет за собой отказ от установленного в механике принципа относительности. Понятие скорости приобретает абсолютный смысл, а различные инерциальные материальные системы уже неравноправны, так как обладают разными скоростями по отношению к эфиру. Гипотеза о полном увлечении эфира спасала принцип относительности — равноправие всех инерциальных систем. Действительно, если каждое материальное тело увлекает целиком весь заключенный в нем эфир, то процессы в каждом из них подчиняются тем же законам, что и в любых других.

Г. Герц избрал именно этот путь. Он попытался на основе электродинамики Максвелла построить электродинамику движущихся тел, вполне увлекающих в своем движении эфир. Однако в этой теории, как и следовало ожидать, звездная aberrация не должна была бы возникать вовсе, а для скорости света  $w$  в движущейся со скоростью  $v$  среде получалось выражение  $w = u + v$  — полное увлечение, что противоречило результатам опытов Физо (24.10).

Создатель электронной теории вещества Лоренц пошел по другому пути. Он предпочел признать неподвижный эфир и отказаться от принципа относительности. Не останавливаясь на встречающихся им трудностях, укажем, что и этот путь оказался неверным.

Задача была решена А. Эйнштейном после удивительных по точности работ Майкельсона, изучавшего зависимость скорости света от движения материальных систем, в которых эта скорость определяется.