

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

\*

Проблемы, стоящие перед классической оптикой. В течение XIX в. развилась новая отрасль физики, не укладывающаяся в рамки классической механики. Этой отраслью была электродинамика. Пока были известны только эффекты электростатического и магнитостатического характера, они могли трактоваться в рамках механики путем введения электростатических и магнитостатических потенциалов, зависящих лишь от расстояний между электрическими зарядами или магнитными полюсами.

Взаимосвязь электрических и магнитных полей требует иной трактовки. Это ясно следует уже из эксперимента Эрстеда, обнаружившего, что магнитная стрелка отклоняется от своего нормального направления север—юг током, текущим в том же направлении. С изменением направления тока, знак отклонения меняется на обратный. Очевидно, что магнитное действие электрических токов, т. е. движущихся зарядов, зависит не только от расстояния, но также и от скорости этих зарядов. Более того, сила в заданной точке не направлена по прямой, соединяющей эту точку с зарядом. Таким образом, идеи ньютоновской механики оказались здесь уже не применимыми.

Максвеллу удалось сформулировать законы электромagnetизма введением нового понятия — понятия о поле. Как мы видели в предыдущей главе, в механике система полностью описывается заданием положений составляющих ее точечных масс как функций времени. В теории Максвелла мы имеем дело с рядом переменных поля, каковыми являются компоненты напряженностей электрического и магнитного полей. В то время как координаты точек в механике определяются только как функции времени, переменные

поля определяются для всех значений, как временной координаты, так и трех пространственных координат, и являются, таким образом, функциями четырех независимых переменных<sup>1)</sup>.

В максвелловской теории поля предполагается далее, что изменение переменных поля во времени в заданной точке пространства зависит только от непосредственной окрестности этой точки. Возмущение поля в некоторой точке вызывает изменение поля в соседних точках, которые в свою очередь передают его дальше; таким образом, первоначальное возмущение распространяется с конечной скоростью и в конце концов передается на большие расстояния. Таким образом, «дальнодействие» может быть осуществлено полем, но всегда за конечный промежуток времени. Законы теории поля представляются дифференциальными уравнениями в частных производных, содержащими частные производные переменных поля по пространственным координатам и времени.

Сила, действующая на точечную массу, определяется полем в непосредственной окрестности этой точки. Наоборот, присутствие точечной массы может изменить и обычно изменяет поле.

Так как характер максвелловской теории электромagnetизма существенно отличен от механики Ньютона, то из справедливости принципа относительности в механике ни в коем случае не вытекает его справедливость в электродинамике. Вопрос о том, насколько применим этот принцип к электродинамике, должен быть предметом специального исследования.

Полное исследование такого рода должно было бы установить законы преобразования для интенсивностей электри-

---

1) В механике сплошных сред встречаются переменные, аналогичные переменным поля: плотность массы, плотность импульса, компоненты напряжений и т. д. Однако они имеют только статистический смысл, т. е. представляют собой полную массу среднего числа частиц на единицу объема и т. д. В электродинамике же переменные поля рассматриваются как основные физические величины.

ческого и магнитного полей при преобразовании Галилея, а затем выяснить, подчиняются ли эти трансформированные величины тем же законам в новых координатах. Такое исследование было осуществлено различными учеными, в частности Герцом и Лорентцом; однако наиболее важные результаты их исследований мы здесь получим более простым путем.

Вместо того чтобы исследовать уравнения Максвелла в общем виде, мы ограничимся рассмотрением одного частного случая, именно уравнения распространения электромагнитных волн.

Уже сам Максвелл установил, что электромагнитные возмущения, подобные тем, которые вызываются колеблющимися зарядами, распространяются в пространстве со скоростью, зависящей от свойств среды, заполняющей пространство. В пустоте их скорость распространения не зависит от направления и равна примерно  $3 \cdot 10^10$  см/сек. Это есть скорость света, поэтому Максвелл предположил, что свет является одним из видов электромагнитного излучения. С тех пор как Герцу при помощи специальной установки удалось получить электромагнитное излучение, максвелловская теория электромагнитного поля и электромагнитная теория света стали составной частью нашего физического мировоззрения.

Электромагнитное излучение распространяется в пустоте с постоянной скоростью (в дальнейшем обозначаемой через  $c$ ). Это заключение может быть формулировано без рассмотрения внутренней связи между электрическими и магнитными полями. Оно ценно для нас потому, что мы можем изучать трансформационные свойства этого закона распространения света, не прибегая к рассмотрению законов преобразования переменных поля.

Теперь можно решить, будут ли законы электромагнитного поля ковариантны относительно преобразования Галилея. Рассмотрим систему координат  $S$ , по отношению к которой справедлив закон постоянства скорости света. Проведя преобразование Галилея типа (1.3), соответствующее равномерному прямолинейному движению новой си-

стемы  $S^*$  относительно  $S$ , получим, что скорость одного и того же светового луча в новой системе  $S^*$  не может быть равна  $c$  во всех направлениях. Если направление светового луча в системе координат  $S$  характеризовать углами этого луча с осями  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , то компоненты его скорости в этой системе будут:

$$\left. \begin{array}{l} u_x = c \cos \alpha, \\ u_y = c \cos \beta, \\ u_z = c \cos \gamma, \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

где

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1. \quad (3.2)$$

Согласно (2.9), компоненты скорости в новой системе  $S^*$  получим в виде:

$$\left. \begin{array}{l} u_x^* = c \cos \alpha - v_x, \\ u_y^* = c \cos \beta - v_y, \\ u_z^* = c \cos \gamma - v_z, \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

отсюда скорость света зависит от направления и определяется уравнением

$$\sqrt{u_x^{*2} + u_y^{*2} + u_z^{*2}} = \\ = \sqrt{c^2 + v^2 - 2c(v_x \cos \alpha + v_y \cos \beta + v_z \cos \gamma)}. \quad (3.4)$$

Она равна  $c$  только на некотором конусе направлений, осью которого является вектор  $v$ . В направлении  $v$  скорость света в системе  $S^*$  равна  $c - v$ , в противоположном направлении она равна  $c + v$ .

Принцип относительности, таким образом, оказывается несовместимым с законами электромагнитного излучения, а потому и с теорией электромагнитного поля. Если принять, что уравнения Максвелла верны, то должна существовать система отсчета, скажем, инерциальная система, в которой они принимают свою обычную форму. Всякая

другая система отсчета, движущаяся относительно вышеупомянутой, являлась бы менее удобной, по крайней мере с точки зрения электродинамики, даже если бы ее движение было равномерным и прямолинейным. Принцип относительности в таком виде, как мы его сформулировали в предыдущей главе, был бы в этом случае применим только к механике, но не ко всей физике.

С таким заключением трудно согласиться. Механика всегда считалась наиболее заслуживающей доверия областью физики, а принцип относительности — фундаментальным принципом всей природы. Было сделано много попыток преодолеть возникшие трудности. Мы рассмотрим наиболее важные из них.

**Корпускулярная гипотеза.** Одна из гипотез состояла в том, что скорость света равна *c* относительно системы отсчета, связанной с источником излучения, подобно тому, как скорость пули, выпущенной из движущегося поезда, должна быть отнесена к системе отсчета, связанной с поездом.

Это предположение не совместимо, однако, с волновой теорией света, предложенной Максвеллом, оно скорее соответствует корпускулярной теории света типа той, которую предлагал Ньютона. Однако оно совместимо с принципом относительности: законы распространения содержат явно скорости источников света. Таким образом, скорость света согласно этому предположению должна была бы трансформироваться так же, как скорости материальных тел, и закон распространения был бы ковариантен относительно преобразования Галилея.

Но экспериментальные данные свидетельствуют против этой гипотезы. Если бы скорость света зависела от скорости источников, то при наблюдении двойных звезд обнаруживались бы специфические явления. Расстояния между двойными звездами очень малы в сравнении с расстояниями от них до нашей солнечной системы. С другой стороны, двойные звезды движутся со сравнительно большими скоростями друг относительно друга. Поэтому следовало бы

ожидать, что свет, испущенный ими одновременно в таком положении, когда одна из них быстро удаляется от нас, а другая приближается к нам, дошел бы до нас в различные моменты времени. Поэтому их движение в пространстве и друг относительно друга представлялось бы нам в искаженном виде. В некоторых случаях одни и те же двойные звезды наблюдались бы одновременно в различных местах, и эти «звездные привидения» появлялись бы и исчезали в согласии с их периодическим движением.

Эти эффекты были бы пропорциональны расстоянию двойных звезд от Земли, так как время следования света равно расстоянию, деленному на его скорость. Если  $v$  означает изменение скорости одной компоненты двойной звезды, мы имели бы

$$t = \frac{d}{c}, \quad \Delta c \sim v, \quad \frac{\Delta t}{\Delta c} \sim -\frac{d}{c^2}, \quad \Delta t \sim -\frac{vd}{c^2}.$$

( $d$  — расстояние от двойной звезды до Земли,  $c$  — скорость света,  $t$  — среднее время, за которое свет достигает Земли). Разумные предположения о порядке величин  $v$ ,  $d$  и  $c$  такие:

$$\begin{aligned} c^2 &\sim 10^{21} \text{ см}^2/\text{сек}^2, \\ v &\sim 10^8 \text{ см}/\text{сек}, \\ d &> 10^{18} \text{ см}, \end{aligned}$$

откуда

$$\Delta t > 10^3 \text{ сек.}$$

Поскольку существует много двойных звезд с  $d$ , превышающим  $10^{21}$  см, и с периодом, меньшим  $10^6$  сек, то этот эффект не мог бы ускользнуть от наблюдения.

Однако никаких следов этого эффекта не было обнаружено. Этого совершенно достаточно для исключения из рассмотрения корпускулярной гипотезы.

**Передающая среда как система отсчета.** Была выдвинута другая гипотеза, согласно которой в качестве «локальной» привилегированной системы отсчета принимается материальная среда, в которой происходит распростране-

ние света. В атмосфере Земли скорость света должна была бы быть постоянной относительно геоцентрической системы отсчета.

Эта гипотеза также неудовлетворительна во многих отношениях. Чтобы подтвердить это аргументацией, предположим, что имеется среда и задано ее состояние движения, чем определяется скорость света. Предположим теперь, что электромагнитное излучение распространяется из одной среды с некоторым состоянием движения во вторую среду с другим состоянием движения. Скорость света должна при этом меняться; это изменение зависит от относительной скорости двух сред и от направления распространения излучения (а также, конечно, и от разности коэффициентов преломления). Если этот эксперимент производить со все более и более разреженными средами, взаимодействие между средой и излучением будет становиться все меньше и меньше в отношении таких процессов, как отражение, рассеяние и т. д., но изменение скорости *u* останется тем же самым. В случае бесконечного разрежения, т. е. в вакууме, мы имели бы конечный скачок *u* без видимой причины.

Существует также экспериментальное доказательство, связанное с проверкой этой гипотезы. Чтобы выяснить влияние движения среды на скорость света, Физо проделал следующий опыт. Он направлял луч света вдоль трубы с движущейся жидкостью и измерял скорость света как вдоль потока, так и в противоположном направлении. Он определил эти скорости очень точно путем измерения положений интерференционных полос.

Эксперимент показал, что скорость света зависит от скорости потока жидкости, но не в такой степени, чтобы можно было просто складывать скорости света и среды. Если обозначить скорость света через *c*, скорость жидкости через *v* и коэффициент преломления через *n*, то согласно нашим предположениям можно ожидать, что наблюдаемая скорость света будет равна:

$$u = \frac{c}{n} \pm v, \quad (3.5)$$

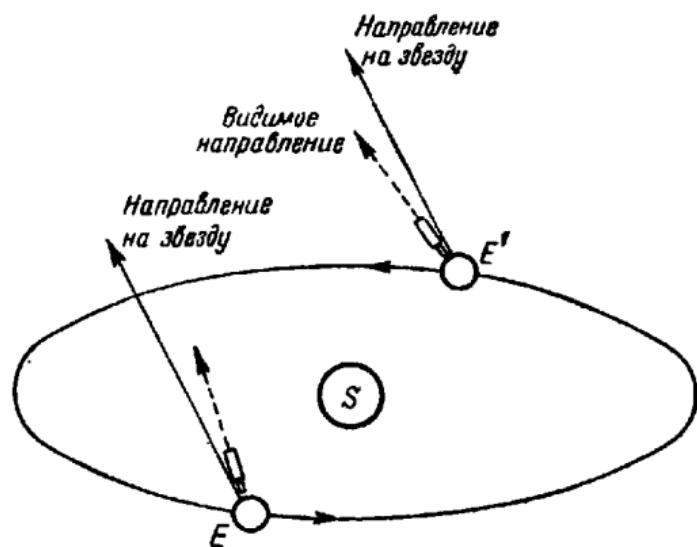
где знак зависит от относительного направления скоростей

света и жидкости. Фактически в пределах экспериментальной ошибки получается соотношение:

$$u = \frac{c}{n} \pm v \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right). \quad (3.6)$$

Приведенное выше выражение не относится к результату, полученному из опыта; при бесконечном разрежении среды показатель преломления  $n$  стремится к 1, зависимость  $u$  от  $v$  становится незаметной и в вакууме  $u$  просто становится равным  $c$ .

Другим эффектом, указывающим, что скорость света не зависит от движения разреженной передающей среды, является aberrация. Удаленные неподвижные звезды



Фиг. 2. Кажущееся изменение положения неподвижных звезд в течение года (абберрация). На чертеже это изменение преувеличено, в действительности оно составляет не более 20,5".

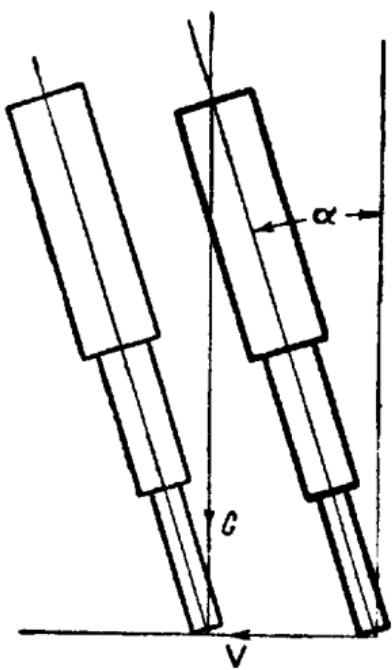
систематически меняют свое положение на небе с периодом в один год. Их траекториями являются эллипсы с фиксированным центром и с большой осью, равной во всех случаях примерно 41''. Звезды, расположенные около небесного полюса, движутся приблизительно по окружностям, в

то время как звезды, расположенные близ плоскости эклиптики, движутся почти по прямым линиям.

На фиг. 2 показано, каким образом мы видим звезду смещенной из своего нормального положения (в центре эллипса) в двух противоположных точках земной орбиты.

Аберрация может быть объяснена следующим образом (фиг. 3): поскольку телескоп твердо связан с Землей, он движется в пространстве со скоростью приблизительно в  $3 \cdot 10^6$  см/сек. Поэтому, когда световой луч попадает в телескоп, скажем, прямо сверху, последний должен быть наклонен таким образом, чтобы нижний его конец к моменту, когда его достигнет луч, оказался под предшествующим положением верхнего конца. Тангенс угла аберрации  $\alpha$  есть отношение между расстояниями, которые проходят Земля и луч света за один и тот же промежуток времени, или просто отношение скорости Земли к скорости света. Это отношение равно:

$$\frac{v_{\text{земли}}}{c} \sim \frac{3 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \sim 10^{-4};$$



Фиг. 3. Объяснение аберрации.

угол, отвечающий этому тангенсу, равен  $20,5''$ ; это соответствует наибольшей аберрации от центра эллипса.

Такое объяснение аберрации также противоречит предположению, что скорость света полностью определяется состоянием движения передающей среды. Действительно, если бы это предположение было справедливо, световой луч, попадая в атмосферу, «увлекался бы» ею, и явление аберрации не наблюдалось бы.

**Абсолютная система отсчета.** Все эти аргументы подтверждают независимость законов электромагнетизма как от движения источников, так и от движения передающей среды. Казалось бы, другой альтернативой является отказ от принципа относительности и допущение существования универсальной системы отсчета, в которой скорость света не зависит от направления распространения. Как указывалось выше, уравнения электромагнитного поля должны принять в такой системе отсчета свою обычную форму. Поскольку ускорения заряженных частиц пропорциональны полю, то можно было бы ожидать, что эта система будет инерциальной, так что ускорения обращались бы в нуль вместе с полем.

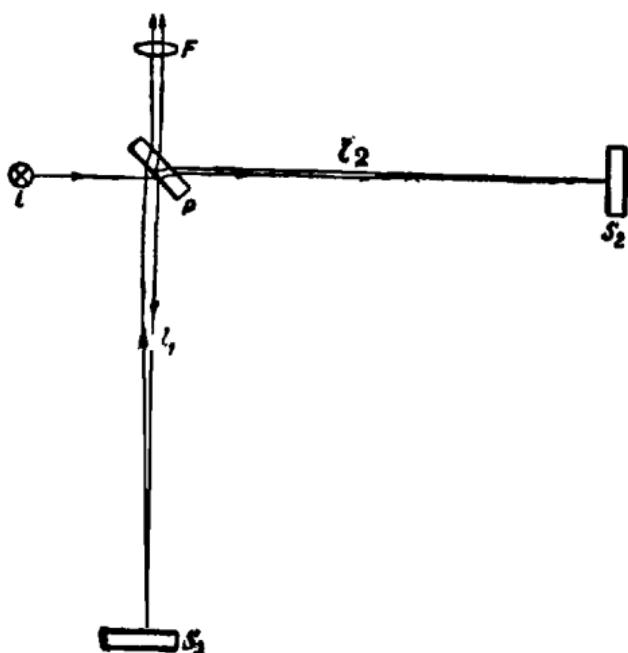
**Эксперимент Майкельсона - Морлея.** Основываясь на этом предположении, Майкельсон и Морлей поставили эксперимент, предназначенный для определения скорости Земли относительно привилегированной системы отсчета, в которой скорость света одинакова во всех направлениях. Основной идеей их эксперимента было сравнение наблюдаемых скоростей света в двух различных направлениях.

Перед тем как дать описание их экспериментальной установки, рассмотрим ожидаемые с точки зрения этой новой гипотезы результаты. Земля не может служить в качестве привилегированной системы отсчета, так как она постоянно испытывает гравитационное притяжение со стороны Солнца и в системе координат, связанной с центром инерции солнечной системы, имеет скорость порядка  $3 \cdot 10^6$  см/сек. Эта скорость испытывает изменение порядка  $6 \cdot 10^6$  см/сек в течение полугода в системе отсчета, аппроксимирующей инерциальную систему гораздо лучше, чем система, связанная с Землей. Поэтому, если даже в некоторый момент времени движение Земли и совпадает с движением привилегированной системы отсчета, то через полгода скорость Земли по отношению к этой системе будет равна  $6 \cdot 10^6$  см/сек.

Во всяком случае по отношению к некоторой инерциальной системе Земля в течение полугода обладает ско-

ростью, не меньшей  $3 \cdot 10^6$  см/сек. Скорость света равна  $3 \cdot 10^{10}$  см/сек. Движение Земли можно обнаружить, если поставить эксперимент, в котором измерялась бы скорость света в двух перпендикулярных направлениях с относительной точностью, превышающей  $10^{-4}$ , и если этот эксперимент осуществляется в течение периода, превышающего 6 месяцев.

Обратимся теперь к описанию опыта Майкельсона-Морлея (фиг. 4). Свет от земного источника  $L$  разделяется



Фиг. 4. Установка Майкельсона-Морлея.

на два луча в стеклянной пластинке  $P$ , покрытой тонким слоем серебра. На примерно равных расстояниях от  $P$  перпендикулярно друг к другу расположены два зеркала  $S_1$  и  $S_2$ , отражающие свет обратно к  $P$ . Там лучи, отраженные от  $S_1$  и  $S_2$ , соединяются вновь и наблюдаются в зрительной трубе  $F$ . Так как свет, исходящий из  $L$ , проходит почти равные по величине пути, соответственно  $L - P - S_1 - P - F$  и  $L - P - S_2 - P - F$ , то наблюдаются интерференционные полосы, точное положение которых зависит от разности расстояний  $l_1$  и  $l_2$ .

До сих пор мы предполагали, что скорость света одинакова во всех направлениях. Если этого предположения не делать, то положение интерференционных полос в  $F$  будет зависеть также и от разности скоростей в направлениях  $l_1$  и  $l_2$ . Предположим, что Земля, а с ней и аппаратура, движется в направлении  $l_1$  со скоростью  $v$  относительно «абсолютной» системы отсчета. Скорость света относительно прибора вдоль пути  $P - S_1$  равна  $(c - v)$ , а вдоль пути  $S_1 - P$  равна  $(c + v)$ . Время, необходимое для прохождения пути  $P - S_1 - P$ , будет

$$t_1 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = \frac{2l_1/c}{1-v^2/c^2}. \quad (3.7)$$

Относительная скорость света, идущего по пути  $P - S_2 - P$ , также будет изменена. Пока свет проходит путь от  $P$  до  $S_2$ , весь прибор смещается в сторону на расстояние  $\delta$

$$\frac{\delta}{\sqrt{l_2^2 + \delta^2}} = \frac{v}{c}, \quad \delta = \frac{v}{c} \frac{l_2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \quad (3.8)$$

и истинное расстояние, проходимое светом, равно

$$l_2^* = \sqrt{l_2^2 + \delta^2} = \frac{l_2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (3.9)$$

На обратном пути свет проходит такое же расстояние. Время, за которое свет проходит путь  $P - S_2 - P$ , равно поэтому

$$t_2 = \frac{2l_2/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (3.10)$$

После поворота прибора на  $90^\circ$  вокруг его оси, время, необходимое для прохождения расстояний  $P - S_1 - P$  и  $P - S_2 - P$ , станет, соответственно, равно

$$\left. \begin{aligned} \bar{t}_1 &= \frac{2l_1/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \\ \bar{t}_2 &= \frac{2l_2/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Разности времени, за которое свет проходит два различных пути, соответственно до и после поворота аппаратуры, равны:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \left( \frac{l_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - l_2 \right) \quad (3.12)$$

и

$$\Delta \bar{t} = \bar{t}_1 - \bar{t}_2 = \frac{2/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \left( l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right). \quad (3.12a)$$

Изменение в  $\Delta t$ , обусловленное вращением аппаратуры, будет поэтому равно:

$$\Delta \bar{t} - \Delta t = - \frac{2/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} (l_1 + l_2) \left( \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right). \quad (3.13)$$

Мы разложим правую часть равенства (3.13) в ряд по степеням  $\left(\frac{v}{c}\right)^2$  и ограничимся первым неисчезающим членом, поскольку величина  $\left(\frac{v}{c}\right)^2$  порядка  $10^{-8}$ . Тогда получим приближенно:

$$\Delta \bar{t} - \Delta t = - \frac{1}{c} (l_1 + l_2) \frac{v^2}{c^2}. \quad (3.14)$$

Вследствие этого изменения  $\Delta t$  следует ожидать смещения интерференционных полос в зрительной трубе. Отношение величины этого смещения к ширине полосы должно равняться разности  $(\Delta \bar{t} - \Delta t)$ , деленной на период колебания световой волны  $\frac{1}{v}$ :

$$\frac{\Delta s}{s} = - \frac{v}{c} (l_1 + l_2) \frac{v^2}{c^2}. \quad (3.15)$$

Скорость Земли относительно «абсолютной» системы отсчета  $v$  порядка  $3 \cdot 10^6$  см/сек  $\left(\frac{v}{c}\right)^2$  поэтому порядка

$10^{-8}$ ;  $\frac{v}{c}$  — волновое число, которое для видимого света равно примерно  $2 \cdot 10^4$  см $^{-1}$ . Отсюда мы имеем:

$$\frac{\Delta s}{s} \sim -\frac{l_1 + l_3}{5 \cdot 10^3}. \quad (3.15a)$$

При помощи многократного отражения Майкельсон и Морлей сумели довести эффективные расстояния  $l_1$  и  $l_2$  до нескольких метров. После исключения ошибок, обусловленных такими причинами, как напряжения, температурные эффекты и т. п., обнаружилось, что отсутствует какой бы то ни было эффект.

Таким образом, возникла следующая трудность: не существует последовательной теории, согласующейся с экспериментами Физо, Майкельсона-Морлея и явлением aberrации света. В этом направлении было проделано много других экспериментов. Однако они не меняют существа дела, и мы их здесь не будем рассматривать. Требуются не дополнительные эксперименты, а новая теория, которая объяснила бы возникшие противоречия.

**Гипотеза эфира.** Прежде чем заняться этой новой теорией — теорией относительности, — скажем несколько слов о гипотезе, имеющей теперь лишь исторический интерес. Физики привыкли пользоваться главным образом механическими представлениями. Неудивительно, что, когда Фарадей, Максвелл и Герц создали первую теорию поля, многими физиками были сделаны попытки объяснить новые поля на основе механических понятий. Сами Максвелл и Герц также работали в этом направлении. Существует область механики, пользующаяся понятиями и методами, подобными тем, которые употребляются в теории поля, — это механика сплошных сред. Поэтому электромагнитное поле было объяснено напряжениями гипотетической материальной среды, так называемого эфира.

Однако эта интерпретация электромагнитного поля неудовлетворительна по многим причинам. Например, эфир должен обладать свойствами, которыми не обладает ни

одно из известных веществ; он должен проникать сквозь все тела, не испытывая никакого сопротивления трения; он не обладает массой и не испытывает гравитационного притяжения. Кроме того, уравнения Максвелла во многом отличаются от уравнений, которым подчиняются упругие волны. «Продольные» упругие волны, например, не имеют аналогии в электродинамике.

В конце девятнадцатого столетия эфир, однако, рассматривался как наиболее обещающая и даже необходимая гипотеза. Конечно, делались попытки на основе этого представления решить проблему, обсуждавшуюся в этой главе, именно, найти систему координат, в которой скорость света была бы равна  $c$  во всех направлениях. Идея эфира предполагала наличие системы координат, в которой он поконится. Эта теория, однако, мало помогла в решении фундаментальной трудности. Она лишь по-другому сформулировала проблему, поскольку определить состояние движения эфира можно только путем измерения скорости света или в результате аналогичных экспериментов. На основании опытов Майкельсона-Морлея следует поэтому предположить, что по крайней мере в непосредственной близости от Земли эфир должен увлекаться ею. Движение небольших масс, как, например, в опыте Физо, также должно увлекать эфир, но не полностью. Однако существование эффекта аберрации совместимо с гипотезой эфира только в том случае, если эфир не увлекался бы Землей даже в непосредственной близости от ее поверхности, т. е. там, где свет попадает в телескоп. <sup>1)</sup>

---

1) Более подробное обсуждение различных экспериментов, на которых базируется теория относительности, можно найти в книге С. И. Бавилова «Экспериментальные основания теории относительности» ГИЗ, 1928 (Прим. ред.).