

**5. Принцип относительности и его следствия в современной физике**  
**А.Эйнштейн**

*Principe de relativité et ses conséquences dans la  
physique moderne (1910)*  
A.Einstein

**§ 1. Эфир**

С тех пор, как было признано, что между упругими колебаниями  
весомой материи и явлениями интерференции и дифракции света су-  
ществует глубокая аналогия, появилось убеждение, что свет должен

рассматриваться как колебательное состояние особого вида материи. Так как, кроме того, свет может распространяться там, где отсутствует весомая материя, ученые пришли к выводу, что в том случае, когда речь идет о распространении света, необходимо признать существование особого вида материи, отличного от весомай материи. Этот вид материи был назван эфиром. Поскольку в разреженных телах, например, в газе, скорость распространения света почти такая же, как и в пустоте, естественно было признать, что и в этих случаях эфир играл большую роль в световых явлениях. Наконец, гипотеза о существовании эфира внутри жидких и твердых тел была необходима для понимания законов распространения света в этих телах, поскольку невозможно было объяснить большую скорость распространения только упругими свойствами весомай материи. Из всего сказанного выше следует, что существование особой среды, пронизывающей всю материю, казалось неоспоримым и что гипотеза о существовании эфира составляла для физика прошлого столетия важную часть представления о Вселенной.

Возникновение электромагнитной теории света внесло некоторые изменения в гипотезу об эфире. Прежде всего, не вызывало сомнений, что электромагнитные явления необходимо свести к способам движения этой среды. Однако постепенно крепло убеждение в том, что никакая механическая теория эфира не дает ясного представления об электромагнитных явлениях, и тогда стали рассматривать электрические и магнитные поля как сущности, механическое толкование которых излишне. Прямым следствием такого толкования было то, что эти поля в пустоте стали рассматриваться как особые состояния эфира, не требующие более детального анализа.

Механическое и чисто электромагнитное толкование оптических и электромагнитных явлений имеет то общее, что в обоих случаях электромагнитное поле рассматривается как особое состояние гипотетической среды, заполняющей все пространство. Именно в этом указанные два толкования коренным образом отличаются от теории истечения Ньютона, согласно которой свет состоит из движущихся частиц. Согласно Ньютону, пространство должно рассматриваться как несодержащее ни весомай материи, ни лучей света, т.е. как абсолютно пустое. В то же время механическая и электромагнитная теория заставляют рассматривать само пространство как заполненное эфиром.

## § 2. Оптика движущихся тел и эфир

Приняв гипотезу о существовании эфира, нужно ответить на вопрос о механических связях, соединяющих эфир и материю. Когда материал приходит в движение, увлекается ли эфир полностью движущейся материей, или же он движется лишь частично, или, наконец, он остается неподвижным? Эти вопросы являются основными для оптики и электродинамики движущихся тел.

Проще всего было бы предположить, что движущиеся тела полностью увлекают эфир, который они содержат. Именно при этом предположении Герц построил непротиворечивую электродинамику движущихся тел. Тем не менее, как следует из знаменитого эксперимента Физо, эта теория неприемлема. Опыт Физо, который можно рассматривать как *experimentum crucis*, основан на следующих соображениях. Пусть  $u'$  — скорость распространения света в прозрачной и неподвижной среде. Сообщим этой среде равномерное и прямолинейное движение со скоростью  $V$ . Если среда заставляет двигаться весь содержащийся в ней эфир, что распространение света по отношению к среде будет таким же, как если бы среда была неподвижна; иначе говоря,  $u'$  будет также и скоростью распространения света по отношению к движущейся среде. Чтобы найти скорость по отношению к наблюдателю, не принимающему участия в движении среды, достаточно, следуя правилу сложения скоростей, к скорости  $u'$  прибавить векторно скорость  $V$ . В частном случае, если  $u'$  и  $V$  лежат на одной прямой, получается либо  $u' + V$ , либо  $u' - V$  в зависимости от того, одинаковое или разное направление имеют скорости  $u'$  и  $V$ . Однако даже самые большие скорости, которые можно было бы сообщить телу, очень малы по сравнению со скоростью света; следовательно, возникает необходимость в очень точном экспериментальном методе, который позволил бы убедительно показать влияние движения среды на эту скорость. Физо предложил следующий эксперимент. Рассмотрим два луча света, способных интерферировать друг с другом, и две трубы, наполненные одинаковой жидкостью. Пропустим вдоль каждой трубы параллельно ее оси пучки света так, чтобы они интерферировали друг с другом после их выхода из труб.

Положение интерференционных полос изменится, если жидкость приходит в движение параллельно оси труб.

По различным положениям интерференционных полос в зависимости от изменения скорости течения можно определить скорость в движущейся среде. Физо нашел таким путем для суммы скоростей не

величину  $u' \pm V$ , как мы могли бы ожидать из всего предыдущего, а  $u' \pm \alpha V$ , где  $\alpha$  — число, заключенное в пределах между 0 и 1 и зависящее от показателя преломления  $n$  среды  $\alpha = 1 - 1/n^2$ .

Итак, частично свет увлекается движущейся жидкостью. Этот эксперимент отвергает гипотезу полного увлечения эфира. Следовательно, остаются две возможности:

- 1) эфир полностью неподвижен, т.е. он не принимает абсолютно никакого участия в движении материи;
- 2) скорость увлекается движущейся материей, но он движется со скоростью, отличной от скорости движения материи.

Развитие второй гипотезы требует введения каких-либо предположений относительно связи между эфиром и движущейся материей. Первая же возможность очень проста, и для ее развития на основе теории Максвелла не требуется никакой дополнительной гипотезы, могущей осложнить основы теории.

В 1895 г. Лоренц\*, предполагая эфир абсолютно неподвижным, предложил весьма совершенную теорию электромагнитных явлений. Эта теория позволила не только количественно предсказать результаты эксперимента Физо, но и очень просто объясняла почти все опыты, которые можно было представить себе в этой области.

Лоренц утверждает, что материя состоит из элементарных частиц, часть которых, по крайней мере, обладает электрическими зарядами. Движущаяся по отношению к эфиру заряженная частица может быть отождествлена с элементом тока. Действие электромагнитного поля на частицу и реакция частицы на поле — вот единственные связи между материей и эфиром. В эфире, там, где пространство свободно от частиц, электрическое и магнитное поля описываются уравнениями Максвелла для свободного эфира, в том случае, конечно, если уравнения относятся к системе отсчета, неподвижной по отношению к эфиру.

Большая плодотворность теории Лоренца состоит в том, что свойства материи, проявляющиеся в оптике и электромагнетизме, могут быть объяснены только относительными положениями и движениями заряженных частиц.

---

\* H.A. Lorentz. Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern. Leyden, 1895.

### § 3. Эксперименты и следствия, не согласующиеся в теории

Эксперимент Физо наталкивал на мысль, что движущаяся жидкость увлекает не весь эфир; происходит лишь частичное увлечение эфира. Однако, поскольку Земля вращается вокруг своей оси и вокруг Солнца и направление скорости ее движения в течение года сильно меняется, следовало подумать, что эфир в наших лабораториях принимает некоторое участие как в движении Земли, так и в движении жидкости в исследованиях Физо. Отсюда вытекает, что эфир движется по отношению к нашим приборам со скоростью, изменяющейся со временем. Кроме того, надо было бы ожидать, что в оптических явлениях будет наблюдаться анизотропия пространства; иначе говоря, эти явления должны были бы зависеть от ориентации приборов. Например, в пустоте или в воздухе свет в направлении движения Земли должен был бы распространяться быстрее, чем против движения Земли. Нельзя было и думать получить непосредственное экспериментальное подтверждение этого следствия теории; так как по порядку величины ожидаемый эффект равен отношению скорости Земли к скорости света, т.е.  $10^{-4}$ , то нечего было и думать о достижении подобной точности при прямом определении скорости света. Кроме того, — и это главное — способами измерения в земных условиях можно определить скорость света, используя лучи света, проходящие по замкнутому пути — туда и обратно, а не по прямой. Причина этого заключается в том, что необходимо определить момент выхода лучей и момент их возвращения с помощью одних и тех же приборов, например, с помощью зубчатого колеса.

Известно много оптических явлений, которые позволяют надежно фиксировать изменения скорости света порядка  $10^{-4}$ ; наблюдая эти явления, согласно теории, можно было бы ожидать, что результаты получатся различными в зависимости от ориентации приборов по отношению к скорости Земли. Не вдаваясь в подробности, скажем, что все эти эксперименты дали отрицательные результаты. Таким образом, эксперимент Физо приводил к гипотезе частичного увлечения эфира движущимися телами, а все иные эксперименты не подтверждали этой гипотезы. Теория Лоренца даст, по крайней мере, хоть какой-то ключ к решению этой загадки. Наличие постоянной скорости  $v$  прибора по отношению к эфиру оказывает влияние на оптические явления, однако это влияние на распространение интенсивности света оказалось очень слабым, соответствующие ему члены в уравнениях Лоренца пропорциональны  $(v/c)^2$  ( $c$  — скорость света в пустоте).

Казалось бы, таким образом объясняется отрицательный результат экспериментов, поставленных с целью доказать существование относительного движения Земли по отношению к эфиру. Тем не менее, один из этих отрицательных результатов оказался настоящей головоломкой для теоретиков. Мы имеем в виду знаменитый опыт Майкельсона и Морли. Эти физики исходили из следующего замечания. Пусть  $M$  и  $N$  — две точки твердого тела; световой луч испускается из точки  $M$  и идет к  $N$ , где он отражается и возвращается в  $M$ . В этом случае, если тело имеет постоянную скорость по отношению к эфиру, теория предсказывает для времени  $t$ , необходимого для прохождения замкнутого пути  $MNM$ , различные значения в зависимости от того, по этому направлению или перпендикулярно ему движется тело. Правда, разница времени прохождения очень невелика, поскольку она порядка  $(v/c)^2$ , где  $v$  — скорость Земли, т.е. порядка  $10^{-8}$ ; тем не менее Майкельсон и Морли смогли поставить интерференционный эксперимент, с помощью которого эту разницу можно было измерить. Основные идеи их опыта состоят в следующем. Световой луч из источника  $S$  (см. рис. 5.1) разделяется с помощью полупрозрачного зеркала в точке  $A$  на два пучка. Один из них отражается от зеркала в  $B$  и возвращается в  $A$ , где он снова разделяется и дает луч, который идет в  $I$ . Другой луч проходит через полупрозрачное зеркало  $A$  и идет в зеркало  $B'$ , где он отражается и попадет в  $A$ . В точке  $A$  он отражается снова и дает луч, также идущий в  $I$ . В точке  $I$  эти два луча интерферируют. Положение интерференционных полос зависит от разности хода обоих лучей  $ABA$  и  $AB'A$ . Эта разность хода должна зависеть от ориентации прибора.

Должно было бы наблюдаться смещение интерференционных полос, если бы вместо плеча  $AB'$  по направлению движения Земли было ориентировано плечо  $AB$ . Однако ничего подобного не было обнаружено, и основы теории Лоренца пошатнулись. Чтобы спасти эту теорию, Лоренц и Фицджеральд прибегли к странной гипотезе: они предположили, что размеры любого тела, движущегося относительно эфира, сокращаются в направлении движения на часть, или, что сводится к тому же, если рассматривать только члены второго порядка малости, — что длина тела в этом направлении уменьшается в отношении  $1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ .

В самом деле, эта гипотеза уничтожала разногласие между теорией и экспериментом. Однако эта теория не представляла собой единого целого. Она основывалась на существовании эфира, который нужно было считать движущимся относительно Земли, причем последствия этого движения невозможно было бы обнаружить экспериментально.

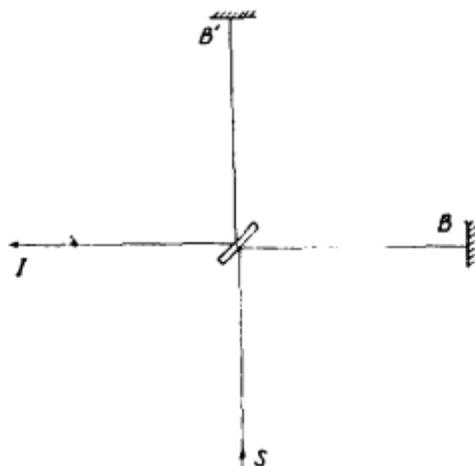


Рис. 5.1. Схема эксперимента Майкельсона

Такое странное свойство теории можно было объяснить только с помощью введения априори маловероятных гипотез. Можно ли действительно думать, что вследствие любопытной случайности законы природы представляются нам таким необычным образом, что ни один из них не позволяет изучить быстрое движение нашей планеты через эфир? Не правда ли, было бы более правдоподобным допустить, что нас завело в тупик какое-то ошибочное соображение?

Прежде чем сказать, как избавиться от этих трудностей, покажем, что даже в частных случаях теория, основанная на существовании эфира, не всегда удовлетворительно объясняет явления, хотя она может прямо и не противоречить эксперименту.

Итак, рассмотрим, например, магнитный полюс, движущийся относительно замкнутого проводника. Если число силовых линий, пересекающих поверхность проводника, изменяется с течением времени, то в проводнике возникает ток. Известно, что возникший ток зависит только от изменения потока через проводник. Это изменение зависит только от относительного движения полюса по отношению к проводнику, иначе говоря, с точки зрения конечного результата безразлично, будет ли это движущийся полюс и неподвижный проводник или же наоборот. Чтобы понять это явление с точки зрения теории эфира, необходимо приписать последнему состояния, в

корне различные в зависимости от того, полюс или проводник движутся относительно эфира. В первом случае следует помнить, что движение полюса изменяет в каждое мгновение напряженность магнитного поля в различных точках эфира. Полученное таким образом изменение создает электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями, существование которого не зависит от присутствия проводника. Это поле, как и любое другое электрическое поле, обладает определенной энергией; оно-то и создает электрический ток в проводнике. Если же, наоборот, проводник движется, а полюс остается в покое, то при этом не возникает никакого электрического поля. В этом случае на электроны, находящиеся в проводнике, действуют лишь ponderomotorные силы, получающиеся в результате движения этих электронов в магнитном поле; результатом же наличия этих сил является движение электронов, т.е. возникновение электрического тока.

Таким образом, чтобы с помощью теории эфира понять эти два в принципе не различающихся эксперимента, необходимо, чтобы эфиру были приписаны принципиально различные состояния. В конце концов, подобное раздвоение, чуждое природе явлений, вводится всякий раз, как только приходится обращаться к факту существования эфира для объяснения явлений, вызванных относительными движениями двух тел.

.....

### § 5. О двух произвольных гипотезах, неявно содержащихся в привычных понятиях времени и пространства

Мы видели, что, допуская существование эфира, мы экспериментальным путем пришли к необходимости рассматривать эту среду как неподвижную. Затем мы видели, что обоснованная таким образом теория позволяет предсказать основные экспериментальные факты. Тем не менее она имеет один пробел: она не признает принципа относительности, что находится в противоречии с экспериментальными данными. Таким образом, возникает вопрос: нельзя ли согласовать основные положения теории Лоренца с принципом относительности? Первым шагом к этому является отказ от гипотезы эфира (разрядка моя — В.А.) В самом деле, с одной стороны, мы должны были признать неподвижность эфира; с другой стороны, принцип относительности требует, чтобы законы явлений природы, отнесенные к системе отсчета  $S'$ , находящейся в равномерном движении, были идентичны законам тех же явлений, отнесенных к системе отсчета  $S$ , неподвижной по отноше-

нию к эфиру. Поэтому нет оснований допускать, как этого требуют теория и эксперимент, существование эфира, неподвижного по отношению к системе  $S$ , не делая такого допущения по отношению к системе  $S'$ . Эти две системы отсчета не могут отличаться одна от другой; признавая это, нелепо отводить роль одной из систем, считая ее неподвижной по отношению к эфиру. Отсюда следует, что нельзя создать удовлетворительную теорию, не отказавшись от существования некоей среды, заполняющей все пространство (разрядка моя — В.А.).

*Собр. науч. тр. М.: Наука. 1965. Т. 1. С. 682-689  
Arch. sci. phys. Natur., ser. 4, 1910, 29, 5-2, 125-144.*