

тельнее, чем первый, так как первый может быть искажен большой систематической ошибкой. Все, что мы можем сказать, — это то, что первый ряд, *вероятно*, предпочтительнее второго, так как его случайная ошибка меньше и так как мы не имеем никакого основания утверждать, что систематическая ошибка для одного ряда больше, чем для другого: ведь мы об этом решительно ничего не знаем.

VII. Заключение. В настоящей главе я изложил немало проблем, не разрешив ни одной из них. Тем не менее я не сожалею о том, что написал о них, так как это, может быть, побудит читателя поразмыслить над этими тонкими вопросами.

Как бы то ни было, существует несколько пунктов, по-видимому, твердо установленных. Чтобы предпринять какое-либо вычисление вероятности — даже просто для того, чтобы это вычисление имело смысл, — надо взять в качестве исходной точки некоторую гипотезу или условное положение, которые всегда содержат известную долю произвола. При выборе этого условного положения мы не можем руководствоваться ничем, кроме принципа достаточного основания. К несчастью, этот принцип очень неопределенен и растяжим и, как мы видели в нашем беглом обзоре, принимает различные формы. Форма, под которой мы встречаем его чаще всего, — это вера в непрерывность: вера, которую трудно было бы оправдать убедительным рассуждением, но без которой никакая наука не была бы возможна. Наконец, исчисление вероятностей может быть с пользой применено в тех проблемах, в которых результат не зависит от принятой вначале гипотезы, лишь бы только эта гипотеза удовлетворяла условию непрерывности.

Глава XII

ОПТИКА И ЭЛЕКТРИЧЕСТВО¹⁾

Теория Френеля. Самый лучший пример, какой только можно избрать для иллюстрации всего ска-

¹⁾ Эта глава представляет собою частичное воспроизведение предисловий к двум моим сочинениям: «Математическая теория света» (Париж, 1889) и «Электричество и оптика» (Париж, 1901).

занного выше о методе физических наук и о значении гипотезы, представляет собой теория света и ее связь с теорией электричества. Благодаря Френелю оптика стала наиболее разработанной частью физики; так называемая волновая теория представляет собой нечто целое, действительно удовлетворяющее ум; не следует лишь требовать от нее того, чего она дать не может.

Математические теории не имеют целью открыть нам истинную природу вещей; такая претензия была бы безрассудной. Единственная цель их — систематизировать физические законы, которые мы узнаем из опыта, но которых мы не могли бы даже и выразить без помощи математики.

Для нас не так важно, существует ли эфир в действительности — пусть это решают метафизики; для нас важнее то обстоятельство, что все происходит так, как если бы он существовал, и что эта гипотеза удобна для истолкования явлений. А в конце концов, есть ли у нас другие основания для веры в существование самих материальных объектов? Вера в их существование — точно так же лишь удобная гипотеза. Только она никогда не перестанет существовать, тогда как гипотеза эфира, без сомнения, когда-нибудь будет отвергнута как бесполезная.

Но даже и тогда законы оптики и уравнения, выражающие их на языке анализа, останутся верными, по крайней мере в первом приближении. Поэтому всегда будет полезно изучать доктрину, которая связывает все эти уравнения в одно целое.

Волновая теория основывается на молекулярной гипотезе. Те, кто надеются за законами раскрыть причины, видят в этой гипотезе преимущество; для других же она служит основанием скептицизма. Но скептицизм вторых представляется мне столь же мало обоснованным, как и иллюзии первых.

Гипотезы этого рода играют лишь второстепенную роль. От них можно было бы отказаться; обычно этого не делают, потому что без них была бы потеряна ясность изложения, и это — единственное основание. В самом деле, при внимательном анализе можно убедиться, что теория Френеля заимствует у молекулярных гипотез лишь два положения: а) принцип сохранения энергии и б) линейную форму уравнений,

которая является общим законом малых движений, как и всех малых изменений вообще. Вот почему большая часть выводов Френеля сохраняет свое значение и после принятия электромагнитной теории света.

Теория Максвелла. Как известно, Максвелл впервые установил тесную связь между оптикой и электричеством — двумя областями физики, до тех пор совершенно чуждыми друг другу. Но растворившись в более обширном целом, в гармонии высшего порядка, оптика Френеля не утратила своей жизненности. Различные части ее продолжают существовать, и взаимосвязи их остаются все теми же. Изменился лишь язык, которым мы пользуемся для их выражения, и, с другой стороны, Максвелл открыл нам новые и неожиданные отношения между различными частями оптики и областью электричества.

Когда французский читатель в первый раз открывает книгу Максвелла, к его восхищению вначале примешивается чувство беспокойства и часто даже недоверия. Его удастся рассеять лишь ценою многих усилий, после продолжительного изучения; у некоторых выдающихся умов это чувство сохраняется навсегда.

Почему же идеи английского ученого воспринимаются у нас с таким трудом? Несомненно потому, что умственное воспитание, полученное большинством образованных французов, приучило их ценить точность и логическую строгость выше всех других качеств. Прежние теории математической физики давали нам в этом смысле полное удовлетворение. Все наши великие мастера, начиная с Лапласа и кончая Коши, действовали согласно одному и тому же методу. Исходя из ясно выраженных гипотез, они с математической строгостью выводили из них все следствия и затем сверяли эти следствия с опытом. Они как будто хотели каждой области физики придать точность, свойственную небесной механике.

Ум, привыкший восхищаться таким методом, нелегко удовлетворяется какой-нибудь теорией. Он не только не потерпит в ней ни малейшего признака внутреннего противоречия; он потребует, чтобы отдельные части ее были логически связаны друг с другом и чтобы число гипотез было сведено до минимума.

Это не все: он предъявит еще и другие требования — менее основательные, по моему мнению. Позади той материи, которая доступна нашим чувствам и которая нам знакома из опыта, он хочет видеть другую — единственно истинную, на его взгляд, — которая имела бы лишь чисто геометрические свойства и атомы которой были бы математическими точками, подчиненными исключительно динамическим законам. И тем не менее, бессознательно противореча самому себе, он будет стремиться представить себе эти невидимые и бесцветные атомы, тем самым возможно более сближая их с обычной материей. Только тогда он и будет вполне удовлетворен и сочтет, что проник в тайну Вселенной. Если это удовлетворение и обманчиво, от него нелегко отказаться.

Итак, раскрывая книгу Максвелла, французский читатель ожидает найти в ней теоретическое целое, столь же логическое и точное, как и физическая оптика, основанная на гипотезе эфира; тем самым он заранее готовит себе разочарование, от которого я желал бы избавить читателя, сразу предупредив его о том, что он должен искать у Максвелла и чего он не может у него найти.

Максвелл не дает какого-либо механического истолкования электричества и магнетизма; он ограничивается доказательством того, что такое истолкование возможно. Он указывает также, что оптические явления представляют собой лишь частный случай электромагнитных явлений. Поэтому из всякой теории электричества можно непосредственно вывести теорию света.

Обратное, к сожалению, неверно; имея полное объяснение световых явлений, мы не всегда можем извлечь полное объяснение электрических явлений. В частности, это нелегко сделать, исходя из теорий Френеля; без сомнения, это не невозможно; но и тогда пришлось бы задуматься над вопросом, не окажемся ли мы вынужденными отказаться от удивительных результатов, которые, казалось, были окончательным приобретением. Это похоже на шаг назад; и многие выдающиеся умы не захотели бы с этим смириться.

Если же читатель согласится ограничить, таким образом, свои ожидания, он столкнется еще с дру-

гими трудностями. Английский ученый не пытается построить здание, которое имело бы цельный и окончательный вид, все части которого были бы подчинены общему плану; скорее он как бы возводит множество предварительных, независимых одна от другой построек, сообщение между которыми затруднительно, а иногда и невозможно.

Возьмем, например, главу, где электростатические притяжения объясняются давлениями и натяжениями в диэлектрической среде. Эту главу можно было бы изъять без ущерба для ясности и полноты всей остальной части книги; с другой стороны, она содержит теорию, которая существует сама по себе, и ее можно было бы понять, не прочитав ни одной строки из всего предшествующего и последующего. Но она не только лишена органической связи с остальной частью сочинения: ее даже трудно согласовать с основными идеями книги; и Максвелл не пытается достичь этого согласования, он просто говорит: «I have not been able to make the next step, namely, to account by mechanical considerations for these stresses in the dielectric»¹⁾.

Этот пример достаточно поясняет мою мысль. Я мог бы привести много других: например, кто мог бы предположить, читая страницы, посвященные магнитному вращению плоскости поляризации, что оптические и магнитные явления идентичны?

Итак, не следует обольщать себя надеждой избежать всякого противоречия, с этим надо примириться. В самом деле, две противоречащие друг другу теории могут обе явиться полезными орудиями исследования, лишь бы их не перепутывали и не искали в них сущности вещей. И, быть может, изучение Максвелла было бы менее поучительным, если бы оно не открывало нам такого множества новых расходящихся друг от друга путей.

Но основная идея книги вследствие этого несколько затемнена, так что в большинстве популярных изложений она представляет собой единственный пункт, который остается совершенно в стороне.

¹⁾ «Я не был в состоянии сделать следующий шаг, а именно, объяснить эти напряжения в диэлектрике с помощью механических соображений» (англ.). — *Примеч. ред.*

Чтобы показать ее важность, я считаю себя обязанным изложить, в чем состоит эта основная идея. В этих целях мне придется сделать небольшое отступление.

О механическом истолковании физических явлений. Во всяком физическом явлении мы можем проследить известное число параметров, обнаруживаемых непосредственным опытом и доступных измерению. Я буду называть их параметрами q .

Наблюдение позволяет нам узнать законы изменения этих параметров. Эти законы вообще могут быть выражены в форме дифференциальных уравнений, связывающих между собой параметры q и время.

В чем состоит механическое истолкование подобного явления?

Его стараются объяснить или некоторыми движениями обыкновенной материи, или движениями одного или нескольких гипотетических флюидов. Принимается, что эти флюиды состоят из очень большого числа отдельных частиц m .

Когда же мы можем сказать, что у нас имеется полное механическое истолкование явления? С одной стороны, когда нам станут известны дифференциальные уравнения, которым удовлетворяют координаты гипотетических частиц m , причем предполагается, что эти уравнения согласуются с принципами динамики; с другой стороны, когда мы будем знать соотношения, определяющие координаты частиц m в функции параметров q , доступных опыту. Повторяю, что уравнения должны согласоваться с принципами динамики, в частности с принципом сохранения энергии и с принципом наименьшего действия.

Первое из них гласит, что полная энергия остается постоянной и что она состоит из двух частей:

1) кинетической энергии или живой силы; она зависит от масс гипотетических частиц m и от их скоростей, — я обозначу ее через T — и

2) потенциальной энергии; она зависит исключительно от координат этих частиц — я обозначу ее через U . Сумма двух энергий T и U остается постоянной.

Далее, чему же учит нас принцип наименьшего действия? Он учит нас тому, что для перехода из на-

чального состояния, соответствующего моменту t_0 , в конечное состояние, соответствующее моменту t_1 , система должна двигаться таким путем, чтобы за промежуток времени между моментами t_0 и t_1 средняя величина «действия» (т. е. разности двух энергий T и U) была минимальной. Впрочем, первый из двух принципов является следствием второго.

Если обе функции T и U известны, этот принцип оказывается достаточным для определения уравнений движения. В самом деле, между всеми путями, позволяющими совершить переход от одного состояния к другому, есть, очевидно, один, для которого средняя величина действия меньше, чем для всех других. Далее, существует *только* один такой путь, и отсюда следует, что принцип наименьшего действия достаточен для определения *действительного* пути, а следовательно, для определения уравнений движения. Таким приемом мы приходим к так называемым уравнениям Лагранжа. В этих уравнениях роль независимых переменных играют координаты гипотетических частиц m ; но я теперь предполагаю, что в качестве переменных приняты доступные прямому опыту параметры q .

Обе части энергии должны тогда выражаться в функции параметров q и их производных; ясно, что именно в таком виде они представляются экспериментатору: он, естественно, будет стремиться определить потенциальную и кинетическую энергию с помощью величин, которые он может непосредственно наблюдать ¹⁾.

Таким образом, система всегда будет переходить из одного состояния в другое таким путем, что средняя величина действия окажется наименьшей. При этом несущественно, что T и U теперь выражены через параметры q и их производные, несущественно, что с помощью этих же параметров мы определяем начальное и конечное состояние; принцип наименьшего действия остается справедливым во всяком случае. И здесь из всех путей, могущих служить пере-

¹⁾ Добавим, что U будет зависеть только от q ; T будет зависеть от q и от их производных по времени и представится однородным многочленом второй степени относительно этих производных.

ходом от начального состояния к конечному, найдется один и только один, для которого средняя величина действия будет наименьшая. Таким образом, принцип наименьшего действия достаточен для нахождения дифференциальных уравнений, определяющих изменения параметров q . Получаемые этим приемом уравнения представляют собой другую форму уравнений Лагранжа.

Для того чтобы составить эти уравнения, нам нет надобности знать ни соотношений, которые связывают параметры q с координатами гипотетических частиц, ни масс этих частиц, ни выражения U в функции координат этих частиц. Все, что нам нужно знать, это выражение U в функции q и выражение T в функции q и их производных, т. е. выражения кинетической и потенциальной энергий в функциях экспериментальных данных.

Затем будет иметь место одно из двух: либо для надлежащим образом выбранных функций T и U уравнения Лагранжа, составленные в соответствии с только что сказанным, окажутся тождественными с дифференциальными уравнениями, выведенными из опыта; либо же вовсе не будет таких функций T и U , для которых такое согласие имело бы место. Ясно, что во втором случае никакое механическое истолкование невозможно.

Итак, *необходимое* условие возможности механического истолкования состоит в том, чтобы можно было выбрать функции T и U , которые удовлетворяли бы принципу наименьшего действия и вытекающему из него принципу сохранения энергии.

Впрочем, это условие и *достаточно*; в самом деле, пусть удалось найти функцию U параметров q , представляющую одну из частей энергии; пусть другая часть энергии, обозначенная нами через T , является функцией q и их производных и имеет вид однородного многочлена второй степени относительно этих производных; и, наконец, пусть лагранжевы уравнения, образованные с помощью этих двух функций T и U , согласуются с данными опыта.

Что же нужно для получения отсюда механического истолкования? Для этого нужно лишь, чтобы U можно было рассматривать как потенциальную энергию системы, а T — как живую силу той же системы.

В отношении U здесь нет никаких трудностей; но можно ли T рассматривать как живую силу материальной системы? Легко показать, что это всегда возможно, и притом бесчисленным множеством способов. За подробностями я отсылаю читателя к предисловию моего сочинения «Электричество и оптика».

Итак, если нельзя удовлетворить принципу наименьшего действия, то невозможно и механическое истолкование; если же можно ему удовлетворить, то существует бесконечное множество таких. Отсюда следует, что коль скоро имеется одно механическое истолкование, то возможно бесконечное множество других механических истолкований.

Еще одно замечание.

Одни из величин, доступных нашему непосредственному опыту, мы примем за функции координат наших гипотетических частиц (*molécules*): это — те же параметры q ; другие из них мы будем считать зависящими не только от координат, но и от скоростей, или, что то же, от производных параметров q , или от некоторых сочетаний этих параметров и их производных.

Теперь возникает вопрос: как из всех величин, доступных опыту и измерению, выбрать те, которые будут играть роль параметров q и какие мы будем рассматривать в качестве производных этих параметров? Выбор этот остается в широкой степени произвольным: достаточно иметь возможность выполнить его так, чтобы не нарушалось согласие с принципом наименьшего действия — и механическое истолкование будет возможным.

И вот Максвелл задал себе вопрос, может ли он сделать этот выбор и выбор двух энергий T и U таким образом, чтобы электрические явления удовлетворяли упомянутому принципу? Опыт показывает нам, что энергия электромагнитного поля распадается на две части: энергию электростатическую и энергию электродинамическую. Максвелл показал, что если первую из них принять за потенциальную энергию U , вторую — за кинетическую энергию T , если, далее, электростатические заряды проводников рассматривать как параметры q , а силы токов — как производные параметров q , то при этих условиях, говоря я, Максвелл признавал, что электрические явления

удовлетворяют принципу наименьшего действия. Поэтому стала несомненной возможность механического истолкования. Если бы Максвелл изложил эту мысль в начале своей книги, вместо того чтобы помещать ее в отдаленном углу второго тома, то она не ускользнула бы от внимания большинства читателей.

Таким образом, если некоторое явление допускает какое-либо одно полное механическое истолкование, то оно допускает и бесконечное число других, которые одинаково хорошо будут объяснять все особенности, обнаруживаемые опытом.

Это находит свое подтверждение в истории всех областей физики; например, в оптике Френель считал световые колебания перпендикулярными к плоскости поляризации, Нейман же рассматривал их как параллельные этой плоскости. Долгое время искали «*ехреgrimentum crucis*», который позволил бы решить спор двух теорий, но найти его так и не могли. Приведем другой пример, из области электричества: как теория двух жидкостей, так и теория одной жидкости с совершенно одинаковым успехом могут служить основой для объяснения электростатических явлений. Все факты подобного рода легко объясняются при помощи указанных выше свойств лагранжевых уравнений.

Теперь нетрудно понять, в чем состоит основная идея Максвелла. Для доказательства возможности механического истолкования электрических явлений нам нет необходимости заботиться об описании самого истолкования: достаточно знать выражение двух функций T и U — двух частей энергии, затем с помощью этих функций составить уравнения Лагранжа и, наконец, сравнить эти уравнения с экспериментальными законами.

Как же нам сделать выбор между всеми этими возможными механическими истолкованиями, если опыт отказывает нам в помощи? Может быть, настает время, когда физики потеряют интерес к такого рода вопросам, недоступным для позитивных методов, и предоставят их метафизикам. Но это время еще не пришло: человеку не так-то легко покориться неизбежности вывода — никогда не узнать сущность вещей.

Итак, при нашем выборе мы можем руководствоваться лишь такими соображениями, в которых большую роль играет личная оценка; есть такие решения, которые будут всеми отвергнуты вследствие их причудливости, в то время как другие привлекут всех своей простотой.

Что касается области электричества и магнетизма, то Максвелл воздержался от решительного выбора. Это не означает, что он систематически уклонялся от всего недоступного для позитивных методов: время, посвященное им развитию кинетической теории газов, достаточно убеждает в противном. Добавлю, что хотя в своем большом труде он не развивает полного детального истолкования, но раньше он попытался дать нечто подобное — в статье, опубликованной в *Philosophical Magazine*. Необычность и сложность гипотез, которые он при этом должен был сделать, побудили его потом отказаться от этой попытки.

На всем протяжении его книги господствует один и тот же дух: все существенное, т. е. все, что должно остаться общим для всех теорий, выдвинуто на первый план; все, что относится лишь к специальным теориям, почти всегда обходится молчанием. Таким образом, читатель видит перед собой некоторую форму, почти лишенную содержания, форму, которая вначале производит впечатление чего-то мимолетного и неуловимого, как тень. Однако трудности, которые он вынужден преодолевать, побуждают сильнее работать его мысль, и в конце концов он начинает понимать, сколь часто искусственными были теоретические построения, которыми он прежде восхищался.

Глава XIII

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

С нашей точки зрения, история электродинамики особенно поучительна. Ампер дал своему бессмертному труду такое название: «Теория электродинамических явлений, основанная *исключительно на опыте*». Он полагал, следовательно, что он не создал *ни одной* гипотезы; но как мы вскоре увидим, он их создал; только он сделал это, сам того не замечая. Однако эти гипотезы были замечены его преемниками, так