

ЭФИР И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ*

Каким образом у физиков наряду с представлением о весомой материи, возникшим в результате абстрагирования повседневного опыта, создалось представление о существовании некоторой другой материи—эфира? Конечно, в ее основу легли явления, которые породили теорию дальнего действия, и свойства света, которые привели к волновой теории света. Остановимся несколько более подробно на обоих этих вопросах.

За пределами физики мы ничего не знаем о силах, действующих на расстоянии. Желая установить причинную связь между наблюдаемыми нами явлениями, мы, по-видимому, встречаемся только с взаимодействиями, обнаруживающимися при непосредственном соприкосновении (например, передача движения толчком, давлением или тягой, нагревание или воспламенение и т. д.). Однако в повседневной жизни тяжесть, т. е. сила, действующая на расстоянии, играет одну из главных ролей. Но так как тяжесть тел является для нас чем-то постоянным, не меняющимся ни в пространстве, ни во времени, то мы не задумываемся над причиной тяжести тел, и поэтому для нас остается неосознанной и природа сил, действующих на расстоянии. Лишь теория тяготения Ньютона впервые поставила вопрос о причине силы тяжести, определив ее как силу, действующую на расстоянии и зависящую от масс. Действительно, теория Ньютона сделала самый большой шаг, который когда-либо был сделан на пути попыток установить причинную связь явлений природы; тем не менее, современники Ньютона встретили эту теорию весьма скептически. Им казалось, что она противоречит вытекавшему из всех других опытов принципу действия тел друг на друга через прикосновение.

.....
* *Aether und Relativitätstheorie*. Verlag von Julius Springer. Berlin, 1920. (Речь, произнесенная 5 мая 1920 г. в Лейденском университете по поводу избрания Эйнштейна почетным профессором этого университета. Перевод со 2-го немецкого издания.— Прим. ред.)

Стремление человека к познанию весьма неохотно мирится с такой двойственностью. Как можно сохранить единообразие в понимании сил природы? Можно, например, попытаться представить себе, что силы контактного типа действуют на расстоянии, но они становятся заметными лишь на очень малых расстояниях; такой путь избрали последователи Ньютона, всецело ставшие под знамена его учения. Но можно сделать и другое предположение, а именно, что ньютоновская сила лишь представляется нам силой, действующей на расстоянии, а что в действительности она передается или посредством движений или путем деформации в среде, заполняющей пространство. Таким образом, стремление к единообразию в понимании природы сил приводит к гипотезе об эфире. Впрочем, непосредственно эта гипотеза не имела влияния на развитие теории тяготения и физики вообще, так что на закон тяготения Ньютона привыкли смотреть как на некоторую аксиому, не требующую дальнейшего изучения. Но в представлениях физиков гипотеза об эфире все время играла некоторую роль, хотя первое время, быть может, и в скрытой форме.

Гипотеза об эфире приобрела новую поддержку в первой половине XIX столетия, когда стало очевидным глубокое сходство между свойствами света и свойствами упругих волн в материальных телах. Стало несомненным, что свет можно представить себе как колебательный процесс в упругой среде, обладающей инертной массой и заполняющей Вселенную. Далее, из явления поляризации света с необходимостью вытекало, что эта среда — эфир — должна быть подобна твердому телу, поскольку только в твердом теле, но не в жидкости, возможны поперечные колебания. Таким образом пришли к теории «квазиупругого» светового эфира, частицы которого могут совершать лишь небольшие деформационные движения, соответствующие световым волнам.

Эта теория, называемая также теорией неподвижного эфира, в дальнейшем нашла сильную поддержку в опыте Физо, из которого можно было заключить, что эфир не принимает участия в движении тел. Опыт Физо является фундаментальным и для специальной теории относительности. Явление абберации света точно так же говорило в пользу теории квазитвердого эфира.

Развитие теории электричества по пути, указанному Максвеллом и Лоренцом, привело к своеобразному и неожиданному повороту в развитии наших представлений об эфире. Правда, для самого Максвелла эфир все еще обладал чисто механическими, хотя и более сложными, чем у твердого тела, свойствами. Но ни самому Максвеллу, ни его последователям не удалось построить такую механическую модель эфира, которая давала бы удовлетворительное истолкование максвелловских законов электромагнитного поля. Законы эти — ясны и просты; механистическое истолкование их — неуклюже и непоследовательно. Почти

незаметно для себя физики-теоретики примирились с таким запутанным с точки зрения их механистической программы положением дела; особенно способствовали этому электродинамические исследования Г. Герца. Действительно, вначале они требовали от всякой законченной теории, чтобы она исходила исключительно из механических понятий (например, плотность, скорость, деформация, давление), а затем постепенно привыкли наряду с механическими понятиями допускать в качестве основных понятий напряженности электрических и магнитных полей, не требуя механистического истолкования. Таким образом, физики постепенно отказались от чисто механического воззрения на природу. Однако такой поворот привел к невыносимому дуализму в основных положениях. Желая избежать этого, делали попытки свести основные механические понятия к электрическим; в частности, опыты с β -лучами и быстрыми катодными лучами поколебали веру в непреложную справедливость уравнений механики Ньютона.

Еще у Герца этот дуализм ничем не был смягчен. У него материя выступала носителем не только скоростей, кинетической энергии и давлений, но и электромагнитных полей. Так как эти поля могут существовать также и в пустоте, т. е. в свободном эфире, то и эфир считался также носителем электромагнитных полей, совершенно подобным и родственным весомой материи. Эфир, находящийся внутри материальных тел, принимает участие в их движении; эфир в пустоте всюду имеет такую скорость, что она во всем пространстве распределена непрерывно. Эфир Герца ничем существенно не отличается от весомой материи (частично состоящей из эфира).

Теория Герца не только страдала тем недостатком, что приписывала материи и эфиру, с одной стороны, механические, а с другой — электрические состояния, которые немислимо связать между собой; она, кроме того, противоречила результату важного опыта Физо относительно скорости распространения света в движущихся жидкостях, а также и другим не вызывавшим сомнения опытным данным.

Таково было положение дела, когда выступил Г. А. Лоренц. Он привел теорию к согласию с опытом, начав с удивительного упрощения основных теоретических положений. Он достиг этого важнейшего со времени Максвелла успеха тем, что лишил эфир его механических, а материю — ее электрических свойств. Как в пустоте, так и внутри материальных тел носителем электромагнитных полей является только эфир, но не материя, которую мы представляем раздробленной на атомы. По теории Лоренца, движутся одни только элементарные частицы материи; их электромагнитное действие обусловлено лишь тем, что они несут электрические заряды. Таким образом, Лоренцу удалось описать все электромагнитные явления на основе уравнений поля, установленных Максвеллом для пустоты.

Что касается механической природы лоренцова эфира, то в шутку можно сказать, что Г. А. Лоренц оставил ему лишь одно механическое свойство — неподвижность. К этому можно добавить, что все изменение, которое внесла специальная теория относительности в концепцию эфира, состояло в лишении эфира и последнего его механического свойства. Сейчас мы поясним, как это следует понимать.

Теория электромагнитного поля Максвелла — Лоренца послужила моделью для теории пространства и времени и кинематики специальной теории относительности. Таким образом, теория Максвелла — Лоренца удовлетворяет условиям специальной теории относительности; но с точки зрения последней она приобретает новый вид. Пусть K — некоторая координатная система, относительно которой эфир Лоренца покоится; тогда уравнения Максвелла — Лоренца будут справедливы прежде всего относительно K . Но, согласно специальной теории относительности, те же самые уравнения в совершенно неизменном виде будут справедливы и относительно всякой другой координатной системы K' , движущейся равномерно и прямолинейно относительно системы K . Теперь невольно возникает вопрос: почему мы должны приписывать системе K , в отличие от физически совершенно подобной ей системе K' , то свойство, что эфир относительно K неподвижен? Такая асимметрия теоретического построения, совершенно не опирающаяся ни на какую асимметрию опытных данных, недопустима. Мне кажется неприемлемой (хотя логически и не вполне ложной) физическая равноценность систем K и K' при одновременном допущении, что эфир покоится относительно системы K и движется относительно системы K' .

В этом вопросе можно встать на следующую точку зрения. Эфира вообще не существует. Электромагнитные поля представляют собой не состояния некоторой среды, а самостоятельно существующие реальности, которые нельзя свести к чему-либо другому и которые, подобно атомам весомой материи, не связаны ни с какими носителями. Такая концепция является тем более естественной, что, согласно теории Лоренца, электромагнитное излучение, подобно весомой материи, обладает импульсом и энергией, и что материя и излучение, согласно специальной теории относительности, являются только особыми формами энергии, распределенной в пространстве; таким образом, весомая масса теряет свое особое положение и является лишь особой формой энергии.

Между тем ближайшее рассмотрение показывает, что специальная теория относительности не требует безусловного отрицания эфира. Можно принять существование эфира; не следует только заботиться о том, чтобы приписывать ему определенное состояние движения; иначе говоря, абстрагируясь, нужно отнять у него последний механический признак, который ему еще оставил Лоренц. Позднее мы увидим, что общая теория

относительности оправдывает такое представление; мыслимость же этого представления мы выясним сейчас на одном, правда, не совсем удачном примере.

Представим себе волны на поверхности воды. В этом явлении можно различать две стороны. Прежде всего можно исследовать, как с течением времени меняется волнистая поверхность, разделяющая воду и воздух. Но можно также — например, при помощи маленьких плавающих тел — исследовать, как изменяется с течением времени положение отдельных частиц воды. Однако предположим, что мы принципиально отказываемся от применения таких плавающих тел для исследования движения частиц воды; тогда мы сможем во всем явлении заметить только изменение во времени пространственного положения поверхности воды; в таком случае у нас нет никаких оснований предполагать, что вода состоит из подвижных частиц. Но мы все же можем спокойно считать воду непрерывной средой.

Нечто подобное существует и в электромагнитном поле. Именно, поле можно представить себе состоящим из силовых линий. Если смотреть на эти силовые линии как на нечто материальное в обычном смысле слова, то можно попытаться представить себе динамические явления как явления движения этих силовых линий, исследовать, таким образом, поведение каждой силовой линии с течением времени. Но, как известно, такой способ рассмотрения приводит к противоречиям.

Обобщая, мы можем сказать: путем расширения понятия физического объекта можно представить себе такие объекты, к которым нельзя применить понятие движения. Эти объекты нельзя мыслить состоящими из частиц, поведение каждой из которых поддается исследованию во времени. На языке Минковского надо сказать так: не всякое образование, заполняющее четырехмерное пространство, можно представить себе состоящим из мировых линий. Специальная теория относительности запрещает считать эфир состоящим из частиц, поведение которых во времени можно наблюдать, но гипотеза о существовании эфира не противоречит специальной теории относительности. Не следует только приписывать эфиру состояние движения.

Очевидно, с точки зрения специальной теории относительности гипотеза об эфире лишена содержания. В уравнения электромагнитного поля входят, кроме плотности электрических зарядов, только напряженности поля. Электромагнитные явления в пустоте вполне определяются содержащимися в этих уравнениях законами, независимо от других физических величин. Электромагнитное поле является первичной, ни к чему не сводимой реальностью, и поэтому совершенно излишне постулировать еще и существование однородного изотропного эфира и представлять себе поле как состояние этого эфира.

С другой стороны, можно привести некоторый важный аргумент в пользу гипотезы об эфире. Отрицать эфир — это в конечном счете значит принимать, что пустое пространство не имеет никаких физических свойств. С таким воззрением не согласуются основные факты механики. В самом деле, механическое поведение некоторой свободно движущейся в пустом пространстве системы тел зависит не только от относительных положений (расстояний) и относительных скоростей этих тел, но и от состояний вращения, которое невозможно охарактеризовать каким-либо признаком, относящимся к системе. Чтобы можно было рассматривать вращение системы, по крайней мере формально, как нечто реальное, Ньютон объективизирует пространство. Тем, что он причисляет свое абсолютное пространство к реальным вещам, он принимает и вращение относительно абсолютного пространства как нечто реальное. Ньютон мог бы с полным правом назвать свое абсолютное пространство «эфиром»; ведь для того, чтобы смотреть на ускорение или вращение как на нечто реальное, существенно только наряду с наблюдаемыми объектами считать еще реальной некоторую другую чувственно невоспринимаемую вещь.

Правда, Мах пытался избежать необходимости принимать за реально существующее нечто недоступное наблюдению, когда в механике вместо ускорения относительно абсолютного пространства вводилось среднее ускорение относительно всей совокупности масс в мире. Но инерция в случае ускорения относительно далеких масс предполагает прямое действие на расстоянии. Так как современный физик уверен в возможности обойтись без него, то он при подобном способе рассмотрения вновь приходит к эфиру, который должен явиться средой, передающей инерцию. Но такое представление об эфире, приводящее к маховскому способу рассмотрения, существенно отличается от представлений об эфире Ньютона, Френеля и Г. А. Лоренца. Эфир Маха не только обуславливает поведение инертных масс; состояние самого эфира зависит от инертных масс.

Мысль Маха находит свое полное развитие в эфире общей теории относительности. Согласно этой теории, метрические свойства пространственно-временного континуума в окрестности отдельных пространственно-временных точек различны и зависят от распределения материи вне рассматриваемой области. Представление о физически пустом пространстве окончательно устраняется такой пространственно-временной изменчивостью масштабов и часов; соответственно, признание того факта, что «пустое пространство» в физическом отношении не является однородным и изотропным, вынуждает нас описывать его состояние с помощью десяти функций — гравитационных потенциалов $g_{\mu\nu}$. Но, таким образом, и понятие эфира снова приобретает определенное содержание, которое совершенно отлично от содержания понятия эфира механической теории света. Эфир общей теории относительности есть среда, сама по себе

лишенная в с е х механических и кинематических свойств, но в то же время определяющая механические (и электромагнитные) процессы.

Эфир общей теории относительности принципиально отличается от эфира Лоренца тем, что его состояние в любом месте динамически определяется с помощью дифференциальных уравнений материей и состоянием эфира в соседних точках, в то время как состояние эфира Лоренца в случае отсутствия электромагнитных полей ни от чего, кроме самого эфира, не зависит и всюду одно и то же. Мысленно можно превратить эфир общей теории относительности в эфир Лоренца, если заменить все описывающие его функции пространственных координат постоянными и не обращать внимания на причины, обуславливающие его состояние. Можно сказать еще и так: эфир общей теории относительности мы получаем из эфира Лоренца, релятивировав последний.

Нам пока еще не ясно, какую роль новый эфир призван играть в картине мира будущего. Мы знаем, что он определяет метрические соотношения в пространственно-временном континууме, например, возможные конфигурации твердых тел или различные гравитационные поля, но мы не знаем, участвует ли он в построении элементарных электрических частиц, образующих материю. Мы не знаем также, отличается ли его структура от структуры эфира Лоренца только вблизи весомых масс, применима ли евклидова геометрия к пространственным областям космических размеров. Но мы можем, основываясь на уравнениях тяготения теории относительности, утверждать, что в пространственных областях космических размеров только тогда могут быть отклонения от евклидовой геометрии, когда во Вселенной будет существовать хотя бы весьма малая положительная средняя плотность материи. В этом случае мир с необходимостью должен быть пространственно замкнутым и конечным, определяемым величиной упомянутой выше средней плотности.

Если мы будем с точки зрения гипотезы о существовании эфира рассматривать гравитационное и электромагнитное поля, то мы заметим замечательную принципиальную разницу между ними. Не может быть пространства, а также и части пространства без потенциалов тяготения; последние сообщают ему метрические свойства — без них оно вообще немислимо. Существование гравитационного поля непосредственно связано с существованием пространства. Напротив, очень легко представить себе любую часть пространства без электромагнитного поля; в противоположность гравитационному полю поле электромагнитное каким-то образом лишь вторично связано с эфиром, причем природа электромагнитного поля вовсе не определяется природой эфира поля тяготения. При современном состоянии теории кажется, что электромагнитное поле в отличие от гравитационного поля определяется совершенно другой формальной причиной; как будто бы природа могла наделить гравитационный эфир

вместо полей типа электромагнитного поля, также и полями совершенно другого типа, например скалярными.

Так как, по нашим современным воззрениям, и элементарные частицы материи по своей природе представляют собой не что иное, как сгущения электромагнитного поля, то, следовательно, в нашей современной картине мира существуют две совершенно различные по содержанию реальности, хотя и связанные между собой причинно, а именно, гравитационный эфир и электромагнитное поле; их можно назвать пространством и материей.

Естественно, что большим шагом вперед было бы объединение в одну общую картину гравитационного и электромагнитного полей. Тогда была бы достойно завершена эпоха теоретической физики, начатая Фарадеем и Максвеллом; сгладилась бы противоположность между эфиром и материей, и вся физика стала бы замкнутой теорией, подобной общей теории относительности, охватывающей геометрию, кинематику и теорию тяготения. Исключительно остроумная попытка в этом направлении сделана математиком Г. Вейлем, однако я не думаю, что его теория может выдержать сравнение с опытом. Размышляя о ближайшем будущем теоретической физики, мы, безусловно, не можем отрицать возможности встретиться с непреодолимыми границами для теории поля, которые могут поставить факты, охватываемые квантовой теорией.

Резюмируя, можно сказать, что общая теория относительности наделяет пространство физическими свойствами; таким образом, в этом смысле эфир существует. Согласно общей теории относительности, пространство немислимо без эфира; действительно, в таком пространстве не только было бы невозможно распространение света, но не могли бы существовать масштабы и часы и не было бы никаких пространственно-временных расстояний в физическом смысле слова. Однако этот эфир нельзя представить себе состоящим из прослеживаемых во времени частей; таким свойством обладает только весома материя; точно так же к нему нельзя применять понятие движения.

Доклад «Эфир и принцип относительности» издавался совместно с докладом «Геометрия и опыт» (см. примечание к статье 55); отдельным изданием он выходил на польском и французском языках. Русский перевод был издан «Научным книгоиздательством» в 1921 году, а также в сборнике «О физической природе пространства» (Берлин, 1922 г.), в котором, кроме того, напечатана работа «Геометрия и опыт» (статья 61, том II).