

только тогда, когда имеет место изменение в наших ощущениях, мы осознаем их качество.

Есть ряд интересных фактов о цветовых ощущениях, о которых я смогу лишь кратко упомянуть. Так, края сетчатки почти не чувствительны к красному цвету. Если вы возьмете в руку красный цветок и голубой и отведете руку назад настолько, чтобы еще ее видеть, то вы уже перестанете видеть красный цветок, а голубой все еще будет виден. Другой факт — то, что при ослаблении света красные предметы темнеют относительно быстрее, чем голубые. Третий факт — можно, приняв соответствующую дозу сантонина, создать искусственно тот вид цветовой слепоты, при которой отсутствует ощущение голубого цвета. Эта разновидность цветовой слепоты была описана доктором Эдмундом Розе из Берлина. Такая слепота только временна и не вызывает никаких более серьезных последствий, чем головная боль. Я прошу извинить меня, что не прошел курса лечения даже ради того, чтобы иметь возможность сообщить вам сведения об этой цветовой слепоте из первых рук.

## Джемс Клерк Максвелл и его значение для теоретической физики в Германии

---

*М. Планк*

Несомненно, значение крупного исследователя для мировой культуры находит свое выражение прежде всего в научных результатах, содержащихся в его трудах; они являются наиболее непосредственным и ценным результатом его деятельности. Но существует еще другой, не столь явный вид деятельности выдающейся личности, который иногда почти равноценен первому: то активизирующее и вдохновляющее влияние, которое она своей оригинальностью оказывает на других более или менее конгениальных современников, косвенно обогащая этим и самую науку. В области гуманитарных наук это различие между прямым и косвенным влиянием не всегда удается строго провести, потому что влияние на окружающую духовную среду само уже нередко составляет часть самостоятельной работы. Тем явственнее можно проследить в мире естественных наук, где исследователь и предмет исследования далеко отстоят друг от друга, как каждый выдающийся исследователь навсегда вносит свое имя в историю науки не только собственными открытиями, но и открытиями, к которым он побуждает других.

Конечно, каждый ученый, для которого физика — не описание отдельных человеческих переживаний, а исследование объективной природы, приходит к убеждению, что если бы все страны мира были бы полностью лишены культурных связей друг с другом, развитие физики в них произошло бы в основном один и тот же путь, и что, следовательно-

но, в общем вовсе не потребовалось бы взаимного влияния ученых отдельных стран. За это говорит и тот факт, что крупные физические или технические открытия производились в разных местах независимо, по мере создания для этого объективных предпосылок. В той мере, в какой естествоиспытатели в разных странах не зависят друг от друга, они работают самостоятельно.

Но все же в каждой отрасли науки имеются отдельные выдающиеся личности, богом одаренные натуры, влияние которых распространяется далеко за пределы своей страны, непосредственно углубляя и ускоряя исследования во всем мире. К таким натурам принадлежит Джемс Клерк Максвелл, столетие со дня рождения которого мы сегодня празднуем. Хотя мы и не должны сомневаться в том, что все, что он создал во всех областях физики, было бы и без него рано или поздно добыто наукой, все же ему принадлежит не только слава первооткрывателя многого, но и заслуга поощрения своих коллег во всех странах мира, а также избавления их от мучительных, быть может, обходных путей и бесполезной работы.

Великие мысли Максвелла не были случайностью: они, естественно, вытекали из богатства его гения; лучше всего это доказывается тем обстоятельством, что он был первооткрывателем в самых разнообразных отраслях физики, и во всех ее разделах он был знатоком и учителем.

В физических теориях в последнее время сформировались два, по существу противоположных подхода, и именно со времен Максвелла они все четче стали обособляться: это физика дискретных частиц и физика непрерывного. Они примерно, но не вполне точно соответствуют прежнему делению на физику материи и физику эфира. В каждой из этих областей Максвелл поощрительно влиял своими плодотворными идеями на ход развития науки. Если хотеть попытаться описать его значение для развития науки в Германии, то лучше всего это сделать, поставив вопрос о влиянии, оказанном Максвеллом на его немецких коллег, которые одновременно с ним или непосредственно после него стали руководителями в своей науке.

Начнем с корпускулярной физики. Она пришла еще из древности, но пережила свое возрождение и модернизацию в середине прошлого столетия с возникновением кинетической теории газов, что последовало сразу за открытием механического эквивалента тепла. Примечательно и то,

что не только в разных странах, но и в различных местах одной страны эту теорию самостоятельно развивали различные исследователи, почти одновременно в Англии — Джоуль и Ватерстон, в Германии — Крениг и Клаузиус,

Максвелл тоже рано увлекся этой гипотезой — тогда новой, казавшейся чрезвычайно смелой и энергично оспаривавшейся позитивистами всех видов, как опасное заблуждение. По этой гипотезе, как давление, так и тепло какого-либо газа объясняются быстрыми движениями отдельных, беспорядочно проносящихся молекул, сталкивающихся то между собой, то со стенками сосуда. Однако Максвелл сейчас же прибавил к тем выводам, которые извлекли его предшественники из связи между средней скоростью молекулы, давлением и удельной теплотой газов, еще один своеобразный, существенный и далеко идущий. Он поставил вопрос о величине скорости отдельной, произвольно взятой молекулы, и ответ на этот вопрос стал основой новой отрасли науки — статистической физики. Потому что, само собой разумеется, ответ может быть получен только в виде вероятностного закона, т. е. такого закона, который указывает, при многократных повторениях одного и того же испытания, сколько из произвольно взятых молекул обладают определенной скоростью. Максвеллу удалось первым сформулировать такой вероятностный закон, который назван его именем — закон распределения скоростей. Он доказал, что этот закон совпадает с известным законом погрешностей Гаусса, если допустить, что три пространственные составляющие вектора скорости независимы друг от друга.

По-разному восприняли это открытие немецкие ученые. Крениг, по-видимому, не занимался детально законом распределения скоростей. Клаузиус, хотя и уделил ему достаточное внимание, но не придавал более глубокого значения. Он пытался доказать, что действие закона ограничивается случаем, рассматриваемым Максвеллом, когда молекулы взаимодействуют как упругие шары.

Совсем по-другому воспринял это Людвиг Больцман, который сразу же усмотрел фундаментальное значение закона распределения скоростей Максвелла для кинетической теории газов. Больцман выступил как настоящий пропагандист идей Максвелла в Германии, хотя, а вернее, так как он их подвергал острейшей критике.

Сначала Больцман уточнил и обобщил доказательство Максвелла, которое относилось лишь к одноатомным шаро-

образным молекулам, распространив его на многоатомные молекулы. Затем он доказал с помощью своей, ставшей знаменитой, так называемой *H*-теоремы, что максвелловское распределение скоростей не только является стационарным, если только оно однажды получилось, но что оно является единственным стационарным распределением, так как оно всегда должно получиться с течением времени, каким бы ни было начальное распределение. Вслед за этим Больцман доказал, что в стационарном состоянии газа на каждую степень свободы одной молекулы приходится соответствующая величина энергии.

Больцману удалось с успехом преодолеть трудность, с которой столкнулся Максвелл при расчете удельной теплоемкости и которая могла стать камнем преткновения для кинетической теории. Это связано с отношением удельной теплоемкости при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме, которое играет существенную роль при всех адиабатических процессах. Если для одноатомного газа, например паров ртути, значение отношения обеих удельных теплоемкостей, рассчитанных согласно газовой теории, при условии шарообразности молекул, равно  $5/3$ , превосходно согласуется с измеренным, то для многоатомных газов теория и опыт явно противоречат друг другу. Ибо если рассматривать молекулы не как симметричные шары, а придать им три различных момента инерции, получится отношение удельных теплоемкостей  $4/3$ , тогда как для водорода, кислорода, азота измерения дают  $7/5$ . Больцман указал простой выход из этого затруднения, предположив, что молекулы этих газов имеют не 3, а 2 различных момента инерции: это хорошо согласуется с тем положением, что эти газы двухатомные, следовательно, соединительная линия обоих атомов является непосредственно симметрической осью вращения молекулы. Вопрос о том, какое влияние оказывает та степень свободы, которая соответствует относительным колебаниям обоих атомов молекулы, не мог быть решен удовлетворительно ни Больцманом, ни Максвеллом; его решение стало возможным лишь на позднейшей стадии развития физики.

Итак, мы видим, как оба исследователя, взаимно обогащаясь, работали в благородном соревновании, создавая молодую статистическую механику; особенно приятно проследить, как они, каждый следуя своему способу мышления, независимо друг от друга движутся вперед, постепен-

но при взаимном контроле охватывая все большую область, чтобы в конце встретиться у намеченной цели. Так, например, существует известное различие в методах Максвелла и Больцмана. Первый для получения определенной статистической закономерности в случае сложной составной механической системы рассматривает одновременно множество экземпляров этой системы в разных состояниях. Больцман же предпочитает прослеживать многообразие изменений состояния одной и той же системы за очень продолжительное время. Оба способа рассмотрения, проведенные последовательно, ведут к одним и тем же статистическим законам. Обоим исследователям была совершенно ясна тесная связь между статистической механикой и термодинамикой. В частности, оба они были того мнения, что второе начало термодинамики, рассматриваемое с точки зрения механики, является вероятностным законом и вследствие этого в отдельных случаях допускает исключения.

Немало осложнений для кинетической теории газов создали законы протекания необратимых процессов, таких, как трение, диффузия, теплопроводность. Если некоторые из полученных выводов, как, например, найденная Максвеллом независимость коэффициента трения от давления, прекрасно согласуются с опытом, то, с другой стороны все попытки определения точного численного значения коэффициента трения поставили теорию в неприятное положение. Ведь для проведения этих сложных расчетов требуются принятие упрощающих гипотез, например, что скорость всех молекул одинакова, или еще дальше идущее предположение, что распределение скоростей при течении газа аддитивно определяется распределением скоростей в покоящемся газе и скоростью течения. Но при каждом из таких предположений, из которых ни одно точно не оправдывается, возникают внутренние противоречия, потому что среди величин, которыми мы пренебрегаем, находятся величины того же порядка, какого учитываемые величины. Таким образом, в конце концов каждый из шести или более исследователей в этой области находил свое значение для отношения коэффициента трения к коэффициенту теплопроводности в зависимости от метода расчета.

Больцман показал принципиальный выход из этого тупика, установив для распределения скорости в потоке газа совершенно точную формулу. Но теперь трудность состояла в том, что оказалось невозможным удовлетворительно

решить это уравнение хотя бы для самого простого случая — упругой шарообразной молекулы. Со свойственными ему последовательностью и упорством Больцман затратил значительную, пожалуй, несоразмерно большую долю своей драгоценной энергии на то, чтобы решить эту проблему последовательными приближениями, путем разложения в ряды. О проведенных при этом длительных и трудоемких вычислениях ясное представление дают нам его три статьи: «К теории трения газов», со страницами, заполненными чуть не бесконечными формулами и числами.

Максвелл поступил иначе: вместо того чтобы, подобно Больцману, упорно добиваться формульного решения для случая упругих шарообразных молекул, он изменил всю постановку проблемы, подставив вместо молекул с упругими свойствами молекулы со свойствами, более удобными для его выкладок. Возможность такого приема вытекала из того соображения, что свойства давления газа, его трение и т. д. должны быть в высокой мере независимы от того частного закона, который управляет столкновением двух молекул, лишь бы при ударе имели место закон сохранения энергии и импульса, потому что удар занимает относительно мало времени. В случае твердого упругого тела удар — вполне дискретное явление, так как соударяющиеся молекулы до момента удара не меняют своей скорости ни по величине, ни по направлению, а затем их скорости вдруг претерпевают определенный скачок. Поскольку нас интересует окончательный результат, можно представить себе удар как непрерывный, хотя и быстрый переход от начальной скорости к конечной, предполагая, что молекулы отталкиваются друг от друга с силой, обратно пропорциональной не слишком малой степени их взаимного расстояния. При таких условиях эти молекулы будут двигаться почти независимо друг от друга, т. е. с постоянной скоростью, пока расстояние между ними велико, и только при значительном сближении их скорости испытают резкое изменение, как при ударе.

Для закона силы величина показателя степени расстояния между молекулами, равная пяти, оказалась самой удобной. При таком законе наименьшее расстояние, которое достигается двумя молекулами при центральном столкновении, обратно пропорционально квадратному корню их относительной скорости перед ударом. Показатель степени 5 потому особенно удобен, что из формул для трения совершенно выпадает относительная скорость молекулы и

поэтому нет нужды в общей формуле для распределения скоростей в потоке газа. Оттого Максвелл сразу ввел в свою теорию такой закон силы, т. е. он постулировал наличие между двумя молекулами силы отталкивания, обратно пропорциональной пятой степени расстояния между ними, и благодаря этому сравнительно просто получил точное решение проблемы трения.

Эта работа Максвелла произвела на Больцмана такое большое впечатление своей формой изложения, что он отнес ее к разряду законченных художественных произведений. В порыве восхищения он сравнил работу Максвелла с могучей музыкальной драмой, развертывание которой он описал в манере, характеризующей его не в меньшей мере, чем Максвелла:

«Сначала величественно выступают вариации скоростей, затем вступают с одной стороны уравнения состояния, а с другой уравнения центрального движения, и все выше вздымается хаос формул, но вдруг звучат четыре слова: «Возьмем  $n = 5$ ». Злой демон  $V$  (относительная скорость двух молекул) исчезает так же внезапно, как неожиданно обрывается в музыке дикая, до сих пор все подавлявшая партия басов. Как от взмаха руки кудесника, упорядочивается то, что раньше казалось неукротимым. Не к чему объяснять, почему произведена та или другая подставка: кто этого не чувствует, пусть не читает Максвелла. Он не автор программной музыки, который должен комментировать свои ноты. Стремительно раскрывают перед нами формулы результат за результатом, пока нас не ошеломит заключительный эффект — тепловое равновесие тяжелого газа, и занавес падает».

И мы тоже опускаем сейчас этот занавес и обращаемся к другой отрасли физики, в которой исследовательский дух Максвелла одержал несравненно большую победу, а именно к физике эфира, или электродинамике.

Если в кинетической теории газов Максвелл выступает как вождь, хотя и делит эту роль с некоторыми другими исследователями, то в учении об электричестве его гений предстает перед нами в своем полном величии. Именно в этой области после многолетней тихой исследовательской работы на долю Максвелла выпал такой успех, который мы должны причислить к наиболее удивительным деяниям человеческого духа. Ему удалось выманить у природы в результате одного лишь чистого мышления такие тайны, ко-

которые лишь спустя целое поколение и лишь частично удалось показать в остроумных и трудоемких опытах. Тот факт, что вообще такая работа была возможна, может показаться совсем непостижимым, если не принять во внимание, что между законами природы и законами духа имеются какие-то очень тесные связи.

Конечно, мы не должны забывать, что Максвелл строил свою теорию электродинамики не на пустом месте: из ничего ничего не возникает. Он опирался на произведения Майкла Фарадея, опыты которого стали надежной основой и его теорией, и чествование памяти Фарадея находится в прекрасном созвучии с сегодняшним праздником. Но Максвелл в своей смелой фантазии и математической проницательности пошел дальше Фарадея; он и уточнил и обобщил его идеи, создав теорию, которую не только можно поставить наравне с прежними теориями электричества и магнетизма, но которая намного превзошла эти теории своими успехами. Ни одна теория столь блестяще не прошла испытание на продуктивность, т. е. на применимость не только к тем явлениям, для которых она создавалась, как теория Максвелла. Ни Фарадей, ни Максвелл в первоначальных своих размышлениях об основных законах электродинамики не думали об оптике. И все-таки вся область оптики, которая упорно сопротивлялась в течение более чем ста лет попыткам объяснить ее с позиций механики, сразу и без остатка вошла в состав максвелловской электродинамики, так что с тех пор каждый оптический процесс может рассматриваться как электродинамический. Это, без сомнения, один из величайших триумфов человеческого стремления к познанию.

Конечно, максвелловская теория, в силу ее своеобразия, прошла сложный путь. Невозможно составить себе простое и наглядное представление о ее формулах с помощью механических аналогий, что с самого начала необычайно затрудняло ее понимание и значительно ослабляло ее убедительность.

В Германии эта трудность действовала особенно тормозяще. Именно здесь в середине прошлого столетия разработка электродинамики проходила исключительно под знаком теории потенциала, которую развил Гаусс на основе ньютоновского закона дальнего действия как раз для статических электрических и магнитных полей и которую он довел до высокой степени математического совершенства.

Поэтому обобщения для динамических процессов искали в расширении ньютоновского закона тяготения, допуская, что величина силы притяжения зависит не только от положения, но и от скорости или от ускорения взаимодействующих центров масс. Утверждение Фарадея и Максвелла, что непосредственного дальнего действия не существует и что силовое поле обладает самостоятельным физическим существованием, было так чуждо всему этому ходу мыслей, что теория Максвелла не имела вообще в Германии никакой почвы и вряд ли принималась во внимание. В лучшем случае электромагнитную теорию света рассматривали как интересный курьез.

Лишь немногие физики считали своим долгом заниматься ею серьезно. К ним относится Людвиг Больцман, который изучал указанную Максвеллом связь между показателем преломления и диэлектрической постоянной и полностью подтвердил ее особо тщательно поставленными опытами над разными веществами, а именно — газами. Естественно, менее успешными были его настойчивые попытки сделать более понятными электродинамические уравнения Максвелла посредством механических моделей.

Герман Гельмгольц, который высоко оценил теорию Максвелла из-за ее особой формальной простоты, стал на примирительную точку зрения. Ему удалось получить общий закон для взаимодействия незамкнутых электрических токов, частными случаями которого являются как разные теории дальнего действия, так и соответствующая формула Максвелла. Такой подход не устраняет основного противоречия между теориями дальнего действия и ближнего действия. Окончательно решить теоретический спор в пользу теории Максвелла как в Германии, так и во всем мире было суждено Генриху Герцу — самому замечательному ученику Гельмгольца. Примечательно, что Герц путем теоретических рассуждений, еще за много лет до проведения своих выдающихся опытов, пришел к убеждению, что максвелловская теория, расцениваемая с точки зрения известных тогда физических фактов, принципиально превосходит теории дальнего действия. Так как ход его мыслей, по-видимому, не везде был должным образом оценен, то разрешите мне на этом кратко остановиться.

Если имеется только один-единственный вид электрической энергии и если, следовательно, сила, с помощью

которой натертая эбонитовая палочка притягивает или отталкивает заряженный электричеством бузиновый шарик, — это та же сила, с которой подвижный магнит индуцирует электрический ток в проводнике, тогда этот же магнит должен привести в движение заряженный бузиновый шарик; и наоборот, по механическому принципу действия и противодействия, электростатически заряженное тело должно действовать на подвижный магнит пондеромоторно, и, наконец, подвижный магнит должен действовать на другой подвижный магнит, без учета обычно магнитного действия, пондеромоторно, с электрической силой, зависящей от относительного движения магнитов. Но электродинамика, построенная на дальном действии, знает лишь такие пондеромоторные действия между магнитами, которые зависят от мгновенного магнетизма, но не от его изменений во времени; отсюда вытекает, что эта электродинамика, рассматриваемая с принятой нами точки зрения, несовершенна.

Добавление соответствующего члена вносит определенную поправку, правда, очень маленькую, потому что она содержит в знаменателе квадрат так называемой критической скорости. Но нельзя на этом остановиться. Изменение пондеромоторного действия, по принципу сохранения энергии, влечет за собой изменение индукционного действия. Но так как индукционные силы идентичны пондеромоторным, то за этим следует новая поправка пондеромоторного действия, и так до бесконечности. Если каждый раз действительно вносить соответствующую поправку, тогда, очевидно, получим как для пондеромоторного, так и для индукционного действия электрического и магнитного характера бесконечные ряды по убывающим четным степеням критической скорости, которые сходятся в общем случае. Примечательно то, что эти ряды точно удовлетворяют дифференциальным уравнениям для электромагнитных полей, составленным Максвеллом, и, согласно уравнениям, эти поля распространяются с критической скоростью.

Этот своеобразный вывод теории Максвелла, исходя из представления о дальном действии, Герц, естественно, не рассматривал как доказательство правильности теории, потому что из сомнительного предположения никогда нельзя вывести надежный результат, но оно достаточно для обоснования такого вывода. «Если только выбор ле-

жит между обычной системой и максвелловской, то последняя, безусловно, имеет преимущество».

По странному совпадению, одновременно с появлением этой работы Герца максвелловская теория света получила в Германии новый сильный импульс благодаря не большой, но ставшей знаменитой работе Больцмана о зависимости температуры теплоизлучения черного тела, в которой эмпирически найденный закон Стефана получен из максвелловского лучевого давления с помощью второго начала термодинамики.

Так накапливались указания на то, что идеи Максвелла имеют универсальное значение, а затем целеустремленные опыты Генриха Герца с весьма быстрыми электрическими колебаниями увенчались беспримерным успехом — получением электрических волн сантиметровой длины. Благодаря этому открытию, которое привлекло внимание физиков всех стран, идеи Максвелла стали претворяться в делах и началась новая эпоха в развитии экспериментальной и теоретической физики.

Значение опытов Герца для теории Максвелла окажется еще более важным, если учесть, что Герц с самого начала исходил вовсе не из того, чтобы утвердить теорию Максвелла. Насколько Герц был свободен от влияния теории Максвелла, яснее всего подтверждается тем фактом, что он долгое время, в противоположность теории Максвелла, полагал, что установил в своих опытах разницу в скорости распространения электрических волн в воздухе и по проводам. Лишь потом Герц выяснил, что эта разница была обусловлена помехами из-за находившихся поблизости проводников.

Отныне победа максвелловской теории была обеспечена и ближайшей задачей стало ее дальнейшее развитие в различных направлениях, в частности, в области получения и исследования волн, занимающих промежуточное положение (по своей длине) между электрическими и оптическими волнами. Среди немецких физиков, которые прославились в этой области, следует в первую очередь отметить Генриха Рубенса, который одновременно с Эрнстом Хагеном добился важного результата: он доказал, что экспериментальные данные относительно отражения света от металлов, истолкование которых представило серьезные трудности для самого Максвелла, во всех деталях соответствуют теории Максвелла, если применять

свет большей длины волны. Так то, что было предметом забот, стало одним из достижений теории Максвелла.

Правда, остается еще неясным вопрос об отражении коротковолнового света от металла. Здесь мы действительно подходим к рубежу, который не могут преодолеть уравнения Максвелла, в их первоначальном виде допускающие, что материя непрерывно распределена в пространстве, и намечается необходимость введения атомистических представлений. По мере развития точных методов измерения стало ясно, что одной атомистикой вещества дело не обойдется, что и энергия в известном смысле обладает атомистической структурой. Становится ясным и то, что различие между корпускулярными и волновыми процессами, до сих пор считавшееся чем-то само собой разумеющимся и которое мы положили в основу наших рассуждений, принципиально не осуществимо и его можно вводить лишь как предельный случай. Ибо как, с одной стороны, в однородной волне энергия фактически находится в дискретных частицах, так, с другой стороны, при столкновении двух молекул всегда наблюдаются интерференционные явления, как при наличии двух групп волн.

Максвелл не был свидетелем этого переворота, его задачей могло быть только построение и завершение классической теории, и, выполняя эту миссию, он достиг наивысшего из того, что можно себе представить. Имя его блистает на вратах классической физики и мы имеем право сказать о нем: по рождению он принадлежит Эдинбургу, как личность он принадлежит Кембриджу, а труды его — достояние всего мира.

## Влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности

---

А. Эйнштейн

Вера в существование внешнего мира, независимого от воспринимающего субъекта, лежит в основе всего естествознания. Но так как чувственное восприятие дает лишь косвенные сведения об этом внешнем мире, или «физической реальности», последняя может быть познана нами только спекулятивным путем. Отсюда вытекает, что наши представления о физической реальности никогда не могут быть окончательными. Мы всегда должны быть готовы менять эти представления, т. е. аксиоматическую основу физики, для того чтобы логически наиболее совершенным путем объяснить результаты наблюдений. Обзор развития физики показывает, что эта аксиоматическая основа действительно претерпевала со временем глубокие изменения.

После основания теоретической физики Ньютоном наиболее значительное изменение ее аксиоматической основы было вызвано исследованием электромагнитных явлений Фарадеем и Максвеллом. Попытаемся уточнить этот вопрос рассматривая его развитие как до этих исследований, так и после них.

Согласно системе Ньютона, физическая реальность характеризуется понятиями *пространства, времени, материальной точки, силы* (или эквивалентным ей взаимодействием материальных точек), а физические явления нужно рассматривать как подчиняющиеся определенным законам движения материальной точки в пространстве. Материальная точка является единственным представителем реаль-