

**ДЖЕМС КЛЕРК
МАКСВЕЛЛ**

**СТАТЬИ
И РЕЧИ**



Издательство «НАУКА» Москва 1968

Ответственный редактор

Л. С. ФРЕЙМАН

Составитель *У. И. ФРАНКФУРТ*

I

Доклад математической и физической секции Британской ассоциации

(О соотношении между физикой
и математикой)

Ливерпуль, 15 сентября 1870 г.

На прошлых съездах Британской ассоциации различные важные для секции математики и физики вопросы излагались в докладе, выбор предмета которого предоставлялся тогдашнему председателю этой секции. Меня, однако, миновала затруднительная обязанность выбора темы доклада.

Профессор Сильвестр, председатель секции А на съезде в Экстере, выступил в защиту чистой математики, продемонстрировав, так сказать, самый процесс математического мышления, а не то одеяние символов и скобок, которое составляет воображение математика, не те сухие результаты, которые являются лишь памятниками его побед; он показал самого математика со всеми присущими человеку способностями, с профессиональной проницательностью, направленной на отыскание, осознание и выявление той идеальной гармонии, которую он считает корнем всякого знания, источником всякого удовлетворения и условием всех действий.

Математик любит прежде всего симметрию. Профессор Сильвестр не только отметил симметрию своего доклада с докладами своих предшественников, но и наметил обязанности своего преемника в следующем характерном указании:

«М-р Споттисвуд в своей вступительной речи представил Секции доклад, содержащий общую историю развития

математики и физики. Доклад Тиндаля касался главным образом вопроса о границах физики. Печатаемый здесь доклад, говорит профессор Сильвестр, является попыткой дать слабый набросок природы математических наук в общем виде. Для построения идеальной пирамиды не хватает еще как бы четвертой сферы, опирающейся на три остальные, соединенные друг с другом, а именно: доклада о связи обеих отраслей науки (математики и физики) и их взаимном влиянии друг на друга. Это — великолепная тема, которой, надо надеяться, один из будущих председателей секции А увенчает здание и этим завершит тетралогию, символически изображенную через $A + A', A, A' AA'$ ».

Действительно, тема столь отчетливо сформулированная последним президентом для своих преемников, — великолепная тема, слишком великолепная для того, чтобы я пытался развить ее. Я стремился следовать за Споттисвудом, когда он с глубоким провидением устанавливает различия, характерные для тех научных систем, которые охватывают явления, наши знания о которых еще совершенно туманны. Острая пронизательность и убедительность выражений д-ра Тиндаля увлекли меня в «святыище мельчайших частиц и сил, где молекулы, подчиняясь законам своего существования, сталкиваются в бешеном соударении или сцепляются в еще более интенсивном соединении, таинственно создавая формы видимых вещей. Профессор Сильвестр повел меня на те безмятежные высоты,

Куда вовек не заплывает туча,
Где буйный ветер и вздохнуть не смеет,
И звездочкой снежинка не ложится,
Куда не донестись раскатам дальним грома,
Где стоны человеческого горя
Не услышать. И где ничто не может
Покой нарушить, вечный и священный...

Но кто введет меня в еще более скрытую туманную область, где Мысль сочетается с Фактом, где мы видим умственную работу математика и физическое действие молекул в их истинном соотношении? Разве дорога к ним не проходит через самое логовище метафизиков, усеянное останками предыдущих исследователей и внушающее ужас каждому человеку науки? С моей стороны было бы безрассудной затеей занять драгоценное время нашей лекции рассуждениями, требующими, как мы это знаем, тысяче-

летий для того, чтобы сложиться в понятную форму. Но мы собрались здесь как деятели математики и физики. В нашей повседневной работе мы приходим к вопросам того же рода, что и метафизики, но, не полагаясь на врожденную пронизательность нашего ума, мы подходим к ним подготовленные длительным приспособлением нашего образа мыслей к фактам внешней природы.

Как математики, мы выполняем определенные мысленные операции над символами чисел или величин; и, переходя шаг за шагом от простых операций к более сложным, мы получаем возможность выражать одну и ту же вещь во многих разных формах. Эквивалентность этих различных форм, хотя она и является необходимым следствием очевидных аксиом, не всегда кажется нам самоочевидной. Но математик, который благодаря длительной практике вполне освоился со многими из этих форм и приобрел большой навык к переводу одной формы в другую, часто может превратить запутанное выражение в другое, поясняющее его смысл более удобопонятным языком.

Как люди, изучающие физику, мы наблюдаем явления при различных обстоятельствах и пытаемся вывести законы их связи. Каждое явление природы представляется нам результатом бесконечно сложной системы условий. Мы занимаемся разбором этих условий и, рассматривая явление особым методом, который сам по себе односторонен и несовершенен, выбираем одну за другой основные черты явления, начиная с той, которая прежде всего привлекает наше внимание; таким образом постепенно мы узнаём, как рассматривать все явление в целом для того, чтобы получить все более ясное и четкое представление о нем. При этом неспециалистам наиболее часто бросается в глаза как раз не то обстоятельство, которое опытный ученый считает основным, между тем как успех всякого физического исследования зависит от правильного выбора того, что является наиболее важным, и от добровольного игнорирования тех обстоятельств, для успешного исследования которых, как бы ни были они интересны, наука еще развилась недостаточно.

Подобные интеллектуальные процессы имели место, начиная с возникновения языка, и продолжают еще и сейчас. Нет сомнения, что обстоятельство, которое в каждом явлении нас прежде всего и наиболее сильно затрагивает, есть приятное ощущение или боль, ему сопутствующие,

приятный или неприятный результат, за ним следующие. Созданная с этой точки зрения теория явлений природы воплощена в ряде наших слов и фраз и не исчезла даже из наших продуманных суждений.

Большой шаг вперед был сделан в науке тогда, когда люди убедились, что для понимания природы вещей они должны начать не с вопроса о том, хороша ли вещь или плоха, вредна или полезна, но с вопроса о том, какого она рода и сколь много ее имеется. Тогда впервые было признано, что основными чертами, которые нужно познать при научном исследовании, являются качество и количество.

По мере развития науки область количества стала повсеместно вторгаться в область качества, пока, наконец, научно-исследовательский процесс не превратился в простое измерение и регистрацию количеств в соединении с математическим обсуждением полученных таким образом численных данных. Именно этот метод, обращающий наше внимание на те особенности явлений, которые могут рассматриваться как количества, подводит физическое исследование под воздействие математических рассуждений. В работе Секции мы будем иметь много примеров успешного применения этого метода к самым последним научным завоеваниям; сейчас же я хочу обратить ваше внимание на некоторые моменты взаимодействия между прогрессом науки и теми элементарными понятиями, которые, как это нам иногда кажется, не могут быть подвержены изменению.

Если искусство математика позволило экспериментатору заметить, что измеряемые им количества связаны необходимыми соотношениями, то физические открытия показали математику новые формы количеств, которые он никогда бы не мог себе представить.

Я считаю, что в настоящее время самым важным из методов, при помощи которых математик приносит своими работами наибольшую пользу исследователю природы, является систематическая классификация величин.

Величины, изучаемые нами в математике и в физике, можно классифицировать двумя различными способами.

Исследователь, желающий овладеть какой-либо наукой, должен освоиться с различными величинами, относящимися к этой науке. Поняв взаимную связь между этими величинами, он рассматривает их как единую систему и относит всю систему именно к этой науке. Это — наиболее

естественная, с точки зрения физики, классификация, и обычно она является первой по времени.

Однако, ознакомившись с рядом различных наук, исследователь замечает, что математические процессы и ход рассуждения в разных науках так похожи один на другой, что знание им одной науки может стать чрезвычайно полезным подспорьем при изучении другой.

Вдумываясь в причины этого, он обнаруживает, что в двух различных науках он имеет дело с системами величин, в которых математическая форма связи одинакова, несмотря на то, что физическая природа их может быть совершенно различна.

Таким образом он приходит к классификации величин, основанной на новом принципе, согласно которому физическая природа величины подчинена ее математической форме. Эта точка зрения характерна для математика, но по времени она следует за физической точкой зрения, так как человеческий разум может представить себе различные величины только в том случае, когда он получает их из природы.

Я не ссылаюсь здесь на тот факт, что все величины как таковые подчиняются арифметическим и алгебраическим правилам и поэтому могут быть подвергнуты тем сухим расчетам, которые, по мнению многих, составляют единственную основу их представления о математике.

Человеческий ум редко бывает удовлетворен и, конечно, не выполняет своей наивысшей функции, когда производит работу счетной машины. Ученый, математик ли он или физик, стремится составить себе и развить ясное представление о предметах, с которыми он имеет дело. Для этого он согласен проделать длинные вычисления и даже сделаться на некоторое время вычислительной машиной, если тем самым он сделает свои идеи в конечном счете более ясными. Но если он видит, что ясные идеи нельзя получить с помощью процессов, этапы которых он, наверное, забудет, прежде чем придет к заключению, то гораздо лучше будет, если он обратится к другому методу и попытается понять предмет исследования при помощи удачно выбранных иллюстраций, взятых из более близких ему областей.

Мы все знаем, насколько иллюстративный метод изложения популярнее, чем метод, в котором главное место занимают голые рассуждения и расчеты.

Истинно научный иллюстративный метод есть метод, который позволяет понять какое-либо представление или закон одной отрасли науки с помощью представления или закона, взятых из другой отрасли, и который, отвлекаясь вначале от различия физической природы реальных явлений, направляет мысль на овладение математической формой, общей соответствующим идеям в обеих науках.

Точность такого иллюстративного метода зависит от того, действительно ли аналогичны по форме обе сравниваемые системы идей или, другими словами, действительно ли соответствующие физические величины принадлежат к одному и тому же математическому классу. При соблюдении этого условия метод иллюстрации весьма удобен для легкого и приятного обучения науке; но, помимо того, признание формальной аналогии между двумя системами идей приводит к более глубокому познанию обеих, чем познание, которое можно было получить, изучая каждую систему в отдельности.

Есть люди, которые могут полностью понять любое, выраженное в символической форме сложное соотношение или закон как соотношение между абстрактными величинами. Такие люди иногда равнодушны к дальнейшему утверждению, что в природе действительно существуют величины, удовлетворяющие этим соотношениям. Мысленная картина конкретной реальности скорее мешает, чем помогает их рассуждениям.

Но большинство людей совершенно неспособны без длительной тренировки удерживать в уме невоплощенные символы чистой математики, так что если наука должна когда-нибудь стать общедоступной, оставаясь, однако, на должной высоте, то это произойдет путем глубокого изучения и широкого применения принципов математической классификации величин, лежащих, как мы уже видели, в основе всякого истинно научного иллюстративного метода.

Существуют, как я уже сказал, такие умы, которые могут с удовлетворением рассматривать чистые количества, представляющиеся глазу в виде символов, а разуму в форме, которую не может понять никто, кроме математиков.

Другие получают большее удовлетворение, следя за геометрическими формами, которые они чертят на бумаге или строят в пустом пространстве перед собой.

Иные же не удовлетворяются до тех пор, пока не перенесутся в созданную ими обстановку со всеми своими физическими силами. Они узнают, с какой скоростью проносится в пространстве планета, и испытывают от этого чувство восхитительного возбуждения. Они вычисляют силы, с которыми притягивают друг друга небесные тела, и чувствуют, как напрягаются от усилия их собственные мышцы.

Для этих людей слова «момент», «энергия», «масса» не являются просто абстрактным выражением результатов научного исследования. Эти слова имеют для них глубокое значение и волнуют их душу, как воспоминания детства.

Для того чтобы удовлетворить людей этих различных типов, научная истина должна была бы излагаться в различных формах и считаться одинаково научной, будет ли она выражена в полнокровной форме или же в скудном и бледном символическом выражении.

Мне бы не хватило времени, если бы я попытался иллюстрировать на примерах научное значение классификации величин. Я упомяну лишь название чрезвычайно важного класса величин, имеющих направление в пространстве, которые Гамильтон назвал векторами и которые составляют предмет исчисления кватернионов. Эта отрасль математики, когда сторонники иллюстративного метода поймут ее до конца и облекут физическими иллюстрациями, станет, может быть, под каким-нибудь новым именем, могущественным методом сообщения истинно научных знаний лицам, очевидно, лишенным вычислительного духа.

Для того, кто изучает прогресс науки, взаимное воздействие различных областей мышления представляет чрезвычайный интерес; рискуя злоупотребить драгоценным временем, я хочу в нескольких словах коснуться одной из ветвей физики, которую еще недавно сочли бы ветвью метафизики. Я говорю об атомной теории, или, как ее теперь называют, о молекулярной теории строения тел.

Если бы нас спросили несколько лет тому назад, в какой из областей физики было меньше всего произведено открытий, то мы указали бы, с одной стороны, на безнадежно далекие неподвижные звезды, а с другой стороны, на непостижимо тонкое строение материальных тел.

Действительно, если считать Конта в известной мере представителем научных взглядов его времени, то нужно

признать, что исследование явлений, совершающихся за пределами нашей солнечной системы, беспредельно трудно, если не совсем безнадежно.

Представление о том, что тела, которые мы видим, можем привести в движение или оставить в покое, разломать на части или разрушить, состоят из более мелких тел, которых мы не можем ни видеть, ни осязать, которые всегда находятся в движении и которых мы не можем ни остановить, ни разбить на части, ни разрушить или лишить малейшего из их свойств, — известно под названием атомной теории. Эта теория связана с именами Демокрита, Эпикура и Лукреция, и обычно считали, что она допускает только существование атомов и пустоты и исключает всякую другую основу тел.

Во многих физических умозаключениях и математических выкладках мы привыкли рассуждать так, как будто такие субстанции, как воздух, вода или металлы, которые кажутся нашим чувствам однородными и сплошными, являются однородными и сплошными и в строго математическом смысле.

Мы знаем, что можно разделить пинту воды на много миллионов частей, каждая из которых обладает всеми теми свойствами воды, какими обладает вся пинта в целом; и нам кажется вполне естественным вывод, что можно продолжать деление воды до бесконечности так же, как мы никогда не дойдем до предела при разделении пространства, в котором содержится эта вода. Мы слышали о том, как Фарадей разделил гран золота на непостижимое число отдельных частиц, мы можем видеть, как д-р Тиндаль образует из ничтожного количества бутилового нитрита огромное облако, мельчайшая видимая часть которого является все-таки облаком и поэтому должна содержать много молекул бутилового нитрита.

За последнее время, однако, из различных независимых источников собран ряд доказательств, которые заставляют нас допустить, что в дальнейшем ходе процесса деления мы в конце концов дойдем до предела, потому что каждая часть будет содержать только одну молекулу, т. е. одно индивидуальное тело, неделимое и неизменяемое никакими силами природы.

Даже при наших обыкновенных опытах с очень мелко разделенными веществами мы обнаруживаем, что вещество начинает терять те свои свойства, которые присущи ему,

когда оно образует большие массы, и что начинают преобладать явления, обусловленные индивидуальным действием молекул.

Изучение этих явлений в настоящее время указывает тот путь, по которому должно идти развитие науки о молекулах.

Одно из этих явлений заключается в поверхностном натяжении жидкости, которое называют капиллярным притяжением. Другая важная категория охватывает явления, обусловленные беспорядочным движением, которое непрерывно заставляет молекулы жидкости или газа перемещаться с одного места на другое и постоянно изменять свое направление, подобно людям, движущимся в толпе. От этого зависит степень диффузии газов и жидкостей друг в друга; изучению этой диффузии, являющейся одним из ключей науки о молекулах, неутомимый исследователь тайн природы, покойный профессор Грахам, посвятил очень много упорного труда.

Согласно теории Видемана, степень электролитической проводимости зависит от той же причины, а теплопроводность жидкостей, вероятно, обуславливается действием того же рода. Для газов молекулярная теория была разработана Клаузиусом и другими; эта теория поддается математической обработке и подверглась экспериментальной проверке. Почти все известные свойства газов объясняются, согласно этой теории, динамическими принципами, и свойства отдельных молекул газов скоро уже станут объектами научного исследования.

В настоящее время Стоней указывает на то, что численные результаты опытов с газами заставляют предполагать, что среднее расстояние между частицами газов, при обыкновенной температуре и давлении, есть величина порядка одной миллионной миллиметра*; после него сэр Вильям Томсон с помощью совершенно самостоятельной аргументации, построенной на таких различных по характеру явлениях, как электризация металлов посредством контакта, поверхностное натяжение мыльных пузырей и трение воздуха, доказал, что в обыкновенных твердых и жидких телах среднее расстояние между смежными молекулами меньше одной стомиллионной и больше двух миллиардных долей сантиметра**.

* «Phil. Mag.», Aug., 1868. (Звездочкой отмечены примечания Максвелла.— *Прим. ред.*)

** «Nature», March., 31, 1870.

Это, конечно, очень грубые приближения, и выведены они на основании измерений, из которых некоторые определенно весьма грубы; но если в настоящее время мы можем составить хотя бы приближенную программу получения результатов такого рода, то мы вправе надеяться, что по мере того, как методы экспериментального исследования будут становиться более точными и более разнообразными, наше понятие о молекуле станет более определенным, так что в недалеком будущем мы можем оказаться в состоянии определять вес молекулы с гораздо более высокой степенью точности.

Теория, которую сэр В. Томсон обосновал на велико-лепных гидродинамических теоремах Гельмгольца, пытается приписать молекулам свойства кольцеобразных вихрей в однородной, лишенной трения и несжимаемой жидкости. Такие вихревые кольца можно наблюдать, когда опытный курильщик искусно выпускает клубы дыма в неподвижный воздух, но, конечно, трудно себе представить более недолговечное явление. Кратковременность этого явления объясняется вязкостью воздуха; но Гельмгольц доказал, что в идеальной жидкости такое вихревое кольцо, раз оно уже образовалось, будет двигаться вечно и всегда будет составлять ту же самую порцию жидкости, которая была приведена в вихревое движение; это кольцо никогда не может быть разделено надвое какой-либо естественной причиной.

Вызвать к жизни кольцевой вихрь естественные причины также не в состоянии, но, будучи однажды образован, он обладает свойствами индивидуальности, количественного постоянства и неразрушимости. В то же время он является носителем импульса и энергии; и это все, что мы можем утверждать о материи. Эти кольцевые вихри способны к таким разнообразным соединениям и сложным изменениям формы, что свойства различных клубков таких вихрей, несомненно, настолько же различны, как и свойства разных видов молекул.

Если мы сможем построить теорию такого рода, преодолев огромные математические трудности данной проблемы, и сумеем в известной мере осветить действительные свойства молекул, то, конечно, такая теория займет в научном отношении положение, совершенно отличное от тех теорий, которые были созданы для исследования молекулы, подверженной действию произвольной системы цент-

ральных сил, специально придуманной для истолкования наблюдаемых явлений.

Теория вихрей-атомов не имеет в себе ничего произвольного, не оперирует никакими центральными силами или скрытыми свойствами какого-либо другого рода. Здесь мы имеем дело только с материей и движением, и раз вихрь образовался, то все его свойства определяются первоначальным импульсом и никакие другие допущения уже больше невозможны.

Даже при современном, мало разработанном состоянии этой теории рассмотрение обособленности и неразрушимости кольцевого вихря в идеальной жидкости не может не поколебать установившегося мнения, согласно которому молекула, для того чтобы быть неизменной, должна быть очень твердым телом.

В действительности, одно из первых условий, которым должна удовлетворять молекула, по-видимому, не согласуется с предположением, что она является простым твердым телом. Спектроскопические исследования, бросившие такой яркий свет на многие отрасли науки, показали, что молекула может быть приведена в состояние внутренних колебаний, в котором она испускает в окружающую среду свет определенной преломляемости, т. е. определенной длины волны и определенного периода колебаний. Весьма замечателен тот факт, что все молекулы (например, молекулы водорода) веществ, имеющих в нашем распоряжении для опытов, будучи возбуждены теплом или электрической искрой, колеблются с одинаковой периодичностью или, говоря более точно, что их колебания являются системой простых колебаний, постоянно сохраняющих одни и те же периоды.

Я предоставляю другим описывать успехи ряда блестящих спектроскопических открытий, которые сделали химию небесных тел объектом человеческого исследования. Я скорее хочу обратить ваше внимание на тот факт, что одна и та же система периодов свободных колебаний свойственна не только каждой молекуле земного водорода, но что спектроскопическое исследование света Солнца и звезд выявило, что в областях, расстояния до которых мы с трудом можем себе представить, находятся молекулы, колеблющиеся так же точно в унисон с молекулами земного водорода, как два камертона, настроенные на одинаковую высоту тона, или как двое часов, отрегулированных по солнечному времени.

Несомненно, что такое абсолютное равенство количественных величин во всех частях Вселенной достойно нашего рассмотрения.

Размеры различных тел природы или довольно неопределенны, поскольку вопрос касается, например, планет, камней и деревьев, или же они изменяются в довольно умеренных пределах (например, яйца, семена и т. д.), но даже в случаях, когда наблюдаются небольшие количественные различия, они не меняют существенных свойств тела.

Даже кристаллы, которые столь определены в отношении геометрической формы, изменчивы в смысле своих абсолютных размеров.

Среди изделий человеческих рук мы часто наблюдаем известную степень единообразия; единообразны, например, пули, отлитые в одной и той же форме, и различные экземпляры книг, отпечатанные с одного набора.

Если мы будем рассматривать монеты или меры и веса в цивилизованной стране, то мы обнаружим единообразие, вызванное тщательным приспособлением к стандартам, изготовленным и предоставленным государством.

В этом вопросе мы, в качестве научной корпорации, горячо заинтересованы, и все мы знаем, как много научного труда было потрачено, и потрачено с пользой, на выработку весов и мер для коммерческих и научных целей.

Земля была обмерена, чтобы создать основу для постоянной меры длины, и все свойства металлов были исследованы, чтобы предупредить возможность изменения в материале, из которого изготовлены стандарты. Для того чтобы и взвесить или измерить какой-либо предмет с современной точностью, требуется ряд опытов и вычислений, для которых используются почти все отрасли физики и математики.

Со всем тем, однако, размеры нашей Земли и время ее обращения, хотя и весьма постоянные, если отнести их к тем мерам сравнения, которыми мы в настоящее время располагаем, не обладают этим постоянством, в силу какой-либо физической необходимости. Земля может сжаться благодаря охлаждению или может увеличиться в объеме благодаря падению на нее слоя метеоритов; скорость ее обращения может понемногу замедлиться, и все-таки она останется той же планетой, какой была. Но молекула, например, водорода, как только ее масса или время ее колеба-

ния уменьшится, хотя бы и минимально, перестанет быть молекулой водорода.

Если поэтому мы хотим получить абсолютно неизменные стандарты длины, времени и массы, то мы должны искать их не в размерах, или в движении, или в массе нашей планеты, но в длине волны, в периоде колебания и в абсолютной массе этих неразрушимых, неизменных и совершенно одинаковых молекул.

Если мы обнаружим, что и на Земле и в звездном небе существуют бесчисленные множества мельчайших тел и с совершенно одинаковой массой — столько-то и не больше гран — и колеблющихся всегда с одним и те же периодом — столько-то раз и не более в секунду — и если мы учтем, что никакая сила природы не может, хотя бы минимально, изменить массу или период колебания любого из этих тел, то мы дойдем по пути исследования природы до одной из тех точек, в которой уже приходится руководствоваться убеждением, что «то, что мы видим, не состоит из вещей, которые нам кажутся».

Одним из самых замечательных результатов успехов учения о молекулах является тот яркий свет, который наука пролила на природу необратимых процессов, т. е. процессов, которые всегда направлены в сторону какого-либо предельного состояния и никогда не совершаются в обратном направлении. Так, например, если мы поместим два газа в один и тот же сосуд, то они смешаются и смесь будет постоянно стремиться стать более однородной. Если мы поместим в сосуд два неодинаково нагретых количества одного и того же газа, то произойдет нечто в том же роде и весь газ будет стремиться приобрести одинаковую температуру. Если мы заставим соприкоснуться два неодинаково нагретых твердых тела, то будет иметь место непрерывное приближение их обоих к некоторой средней температуре.

В случае с двумя газами можно достигнуть разъединения химическим путем, но в других двух случаях прежнее положение вещей не может быть восстановлено никаким естественным процессом.

В случае теплопроводности или диффузии тепла процесс не только необратим, но он влечет за собой невозстановимое уменьшение той части полного запаса тепловой энергии, которую можно преобразовать в механическую работу.

Такова теория Томсона о необратимом рассеянии энергии; она эквивалентна учению Клаузиуса о возрастании того, что он называет «энтропией».

Необратимый характер этого процесса отчетливо воплощен в теорию Фурье о теплопроводности, где, как указывают формулы, возможное решение для всяких положительных величин времени неизменно стремится вылиться в форму однообразной диффузии тепла.

Если же мы пытаемся пойти против течения времени, придавая ему постоянно уменьшающиеся значения, то мы дойдем до такого положения вещей, при котором формула имеет так называемое критическое значение; если мы теперь исследуем положением вещей за мгновение перед этим, то мы убедимся, что формула становится абсурдной.

Таким образом у нас создается концепция такого положения вещей, которое не может пониматься как физический результат некоего предшествовавшего положения, и мы убеждаемся, что это критическое условие действительно существовало не в какую-либо бесконечно отдаленную эпоху, но отделено от настоящего времени определенным конечным интервалом.

Физические исследования недавнего прошлого сроднили нас с этой идеей начала в такой мере, какую не мог бы предвидеть никто из наблюдавших развитие научного мышления прежних времен.

Однако человеческой мысли несвойственно, по примеру нагретого тела у Фурье, неизменно устанавливаться в состоянии окончательного уравновешенного покоя, которое мы можем предсказать заранее. Наша мысль скорее подобна дереву, выпускающему побеги, которые тянутся к свету, или же корням дерева, извивающимся среди различных пластов земли, в которые они зарываются. Мы, которые дышим воздухом нашего века и знаем только характеристики современного мышления, — мы не можем предсказать общий тон науки будущего, так же как не можем предвидеть тех открытий, которые принесет это будущее.

Физические исследования постоянно обнаруживают перед нами новые особенности процессов природы, и мы вынуждены находить новые формы мышления, соответствующие этим особенностям. Отсюда вытекает необходимость тщательного изучения взаимоотношений между математикой и физикой, определяющих те условия, при которых идеи, заимствованные из одной отрасли физики,

могут быть с уверенностью использованы для построения идей, применимых в новой отрасли той же науки.

Обороты речи и мышления, с помощью которых мы переносили терминологию знакомой нам науки в область науки, менее нам знакомой, можно назвать «научными метафорами».

Так, например, термины «скорость», «момент», «сила» и т. д. получили определенное точное значение в элементарной динамике. Ими пользуются также в динамике связанных систем в смысле, хотя и вполне аналогичном элементарному значению, но более широком и обобщенном.

Такие обобщенные формы элементарных идей можно назвать метафорическими терминами в том смысле, в каком каждый абстрактный термин является метафорой. Характер действительно научной системы метафор таков, что каждый термин в его метафорическом употреблении сохраняет все те формальные соотношения с другими терминами системы, какие он имел при своем первоначальном употреблении. Данный метод является в этом случае истинно научным, т. е. он есть не только законный продукт науки, но, в свою очередь, может способствовать ее развитию.

Существуют известные электрические явления, которые связаны между собой соотношениями такой же формы, какие наблюдаются между динамическими явлениями. Применение к этим электрическим явлениям динамической фразеологии с соответствующими отличиями и предварительными ограничениями является метафорическим методом, несколько более смелого характера; тем не менее этот метафорический метод вполне оправдан, поскольку он дает правильную идею об электрических взаимоотношениях тем лицам, которые уже освоились с динамикой.

Допустим, что мы с успехом использовали некоторые идеи какой-либо элементарной науки, метафорически применив их к совершенно новой категории явлений. Тогда становится важным философским вопросом определить, в какой мере применимость старых идей к новым объектам свидетельствует о том, что новые явления физически родственны старым.

Вопрос наилучшим образом разрешается в тех случаях, когда одному и тому же предмету дают два различных объяснения. Наиболее известным примером подобного рода являются теории о корпускулярной и о волновой природе

света. Обе теории до известного предела одинаково хорошо объясняют световые явления; дальше этого предела одна из них становится несостоятельной.

Для того чтобы понять правильное соотношение между этими теориями в той области, в которой они кажутся одинаково применимыми, мы должны рассматривать их в том освещении, которое придал им своим открытием Гамильтон и которое заключается в том, что каждой брахистохронной проблеме соответствует проблема свободного движения; обе учитывают различные скорости и времена, но в результате получается один и тот же геометрический путь. На эту тему очень интересную статью написал профессор Тэт.

Согласно теории электричества, которая с большим успехом разрабатывается в Германии, две электрические частицы непосредственно действуют одна на другую на расстоянии, с силой, которая, по Веберу, зависит от их относительной скорости, а по теории, намеченной Гауссом и разработанной Риманом, Лоренцом и Нейманом, действует не мгновенно, а после известного промежутка времени, зависящего от расстояния. Нужно изучить эту теорию, чтобы оценить ту убедительность, с которой она, в обработке названных выдающихся ученых, объясняет все виды электрических явлений.

Другая теория электричества, которую я лично предпочитаю, отрицает действие на расстоянии и приписывает электрическое действие натяжениям и давлениям во всепроникающей среде, причем напряжения принадлежат к тому же роду, который известен технике, среда же идентична той, в которой, как мы предполагаем, распространяется свет.

Обе эти теории объясняют не только те явления, с помощью которых они были первоначально построены, но и другие явления, о которых в то время не думали и которых, может быть, тогда не знали; обе теории совершенно самостоятельно привели к одним и тем же численным результатам, выражающим абсолютную скорость света в электрических единицах.

Тот факт, что две теории, по-видимому, столь существенно противоположные, верны в очень широкой области, общей для них обеих, действительно, имеет философское значение, которое мы сможем полностью оценить только тогда, когда достигнем такой высоты научного понимания,

с которой нами может быть усмотрена действительная связь между столь различными гипотезами.

Я хочу сделать еще одно замечание о соотношении между математикой и физикой. По существу одна предпочитает заниматься чисто умственными операциями, предмет же другой составляет пляска молекул.

Молекулы имеют свои собственные законы; мы избираем некоторые из них, как наиболее нам понятные и как наиболее доступные для вычислений. По этим частичным данным мы строим теорию и приписываем всякое отклонение действительных явлений от теории возмущающим причинам. В то же время мы признаем, что называем «возмущающими причинами» просто ту область действительных условий, которую мы не знаем или которой пренебрегли, и обещаем учитывать ее в будущем. Таким образом мы признаем, что так называемое возмущение — простая фикция нашего ума, а вовсе не природный факт и что в действиях природы нет никаких возмущений.

Но это не единственный путь, которым может нарушаться гармония между материалом и мыслительной операцией. На мысль математика влияют очень много нарушающих факторов: например, усталость, пробелы памяти, слишком поспешные заключения; по этим причинам и по многим другим у математиков бывают ошибки.

Один из самых глубоких математиков и мыслителей нашего времени, покойный Джордж Буль, рассуждая о точном и почти математическом характере законов правильного мышления, по сравнению с чрезвычайно запутанными, хотя, может быть, столь же определенными, законами фактического мышления, подверженного ошибкам, стал на такую точку зрения, с которой наука как бы заглядывает за пределы своей собственной области.

«Мы должны допустить, — говорит он, — что существуют законы (мышления), которых даже их строгие математические формы не могут защитить от нарушения. Мы приписываем им авторитетность, отнюдь не основанную на силе, и верховенство, которое не поддается истолкованию по аналогии с ненарушимым порядком, царствующим в мире природы».

Вводная лекция по экспериментальной физике

(Значение эксперимента в теоретическом познании)

(Прочитана в октябре 1871 г.)

Кембриджский университет в соответствии с законом своего развития, согласно которому, придерживаясь строжайшей непрерывности между последовательными фазами своей истории, он с большей или меньшей быстротой приспосабливается к требованиям времени, недавно ввел курс экспериментальной физики. Курс этот, требуя поддержания способностей к вниманию и анализу, столько времени культивировавшихся в университете, требует также упражнения наших чувств в наблюдении и наших рук в общении с приборами. Привычные принадлежности — перо, чернила и бумага — не будут достаточны, и нам потребуются большее пространство, чем пространство кафедры, и большая площадь, чем поверхность доски. Мы обязаны щедрости нашего ректора тем, что, каков бы ни был в других отношениях характер экспериментальной работы, которую мы надеемся вести в будущем, материальные условия для ее широкого развертывания будут на уровне, до сих пор еще непревзойденном.

Итак, главной опорой экспериментальной физики в Кембридже является Девонширская физическая лаборатория¹, и я считаю желательным, прежде чем мы углубимся в какие-либо специальные исследования, рассмотреть сегодня, каким образом мы, Кембриджский университет, как некий живой организм, можем включить в себя и вдохнуть

¹ Первоначальное название Кавендишской лаборатории.— *Прим. ред.*

жизнь в этот новый организм, внешняя оболочка которого должна скоро возникнуть перед нами.

Учебный курс нашего университета всегда включал наравне с чистой математикой и теоретическую физику. Распространять солидное значение физики и насыщать умы студентов правильно понимаемыми принципами динамики давно считалось одной из наших высших функций, и очень немногие из нас могут поставить себя теперь в те условия, в которых приходилось работать даже таким ученым, как великий Декарт, до того как Ньютон провозгласил истинные законы движения тел. Действительно, изучение и распространение правильных идей о динамике уже произвело значительное изменение в языке и мышлении даже тех, кто не претендует на ученость, и мы ежедневно получаем новые доказательства того, что популяризация научных доктрин производит такие же большие изменения в умственном состоянии общества, какие материальные приложения науки вызывают в его внешней жизни. И на самом деле, почтение к науке так велико, что даже самые абсурдные мнения получают распространение, если только они выражены языком, вызывающим в памяти какие-нибудь хорошо известные научные фразы. Если общество подготовлено таким образом к восприятию всякого рода научных доктрин, то на нас лежит обязанность позаботиться о распространении и развитии не только истинно научных принципов, но и духа здорового критицизма, основанного на рассмотрении данных, на которых основываются утверждения, кажущиеся научными.

Когда мы сможем использовать при обучении науке не только сосредоточенное внимание студента и его знакомство с символическими обозначениями, но и зоркость его глаза, остроту слуха, тонкость осязания и ловкость его пальцев, мы не только распространим наше влияние на целую группу людей, не любящих холодных абстракций, но, раскрывая сразу все ворота познания, обеспечим ассоциирование этих научных доктрин с теми элементарными ощущениями, которые образуют смутный фон всех наших сознательных мыслей и придают блеск и рельефность идеям, которые, будучи представлены в абстрактной форме, могут совершенно исчезнуть из памяти.

В курсе экспериментальной физики мы можем считать ведущим элементом либо теорию, либо опыт. Мы можем

либо использовать опыты для иллюстрации определенной отрасли физики, либо можем произвести некоторые физические исследования в качестве примера определенного экспериментального метода. Мы должны начать в лекционном зале с курса лекций в какой-нибудь отрасли физики, пользуясь опытами как иллюстрацией, и закончить в лаборатории рядом исследовательских опытов.

Позвольте мне сказать несколько слов об этих двух типах опытов — опытах иллюстративных и опытах исследовательских. Целью иллюстративных опытов является освещение некоторых научных идей для того, чтобы сделать их понятными студенту. Условия опыта подобраны так, чтобы явление, которое мы хотим наблюдать или показать, выступало на первый план, а не затемнялось и запутывалось другими явлениями, как это имеет место, когда явление происходит в обычных естественных условиях. Важным разделом наших обязанностей является постановка иллюстративных опытов, поощрение других к постановке их и развитие всевозможными способами освещаемых ими идей. Чем проще материалы иллюстративного опыта и чем более они привычны учащемуся, тем глубже он поймет идею, которую должен иллюстрировать этот опыт. Воспитательная ценность таких опытов часто обратно пропорциональна сложности приборов. Студент, пользующийся самодельной, неточно работающей установкой, часто научается большему, нежели тот, которым он может доверять, но которые он не смеет разбирать на части.

Весьма необходимо, чтобы те, кто пытается узнать из книг факты физики, могли распознать эти факты с помощью нескольких иллюстративных опытов, когда они встретятся с ними во внешнем мире. Наука представляется нам в совершенно другом виде, когда мы обнаруживаем, что можем увидеть физические явления не только в аудитории проецированными при помощи электрического света на экран, но можем найти иллюстрацию самым высоким областям науки в играх и гимнастике, в морских и сухопутных путешествиях, в бурях на суше и на море и повсюду, где имеется материя в движении.

Эта привычка различать первопричины среди бесконечного разнообразия их действия ничуть не понижает наше ощущение величия природы, не мешает наслаждению ее красотой. Напротив, она стремится спасти наши научные идеи от того неопределенного состояния, в котором мы их

слишком часто оставляем погребенными среди других плодов ленивой доверчивости, и стремимся поднять их до соответствующего им положения среди тех доктрин, наша вера в которые так велика, что мы всегда готовы действовать согласно им.

Иллюстративные опыты могут быть самого различного рода. Некоторые могут быть использованием самых обычных действий из области обыденной жизни, другие — тщательно организованными демонстрациями некоторых явлений, имеющих место лишь при особых условиях. Однако они не имеют того общего, что их целью является представить некоторые явления студенту таким образом, чтобы он мог ассоциировать с ними соответствующую научную идею. Если он усвоил эту идею, то иллюстративный опыт выполнил свое назначение.

С другой стороны, в исследовательских опытах это не является главной целью. Правда, люди, не знакомые еще с результатами опыта, могут считать исследовательским такой опыт, главной целью которого является наблюдение того, что случится при определенных условиях, но в экспериментальных исследованиях, в строгом смысле этого слова, конечной целью является измерение чего-то такого, что мы уже наблюдали, получение численного значения некоторой величины.

Опыты такого рода, заключающие какие-либо измерения, и являются истинным делом физической лаборатории. В каждом опыте мы должны сначала приучить наши чувства к явлению, но, не останавливаясь на этом, должны выяснить, какие из его основных свойств поддаются измерению и какие измерения требуются для полного описания явления. Мы должны произвести затем эти измерения и вывести из них искомый результат.

Эта характеристика современных экспериментов — то, что они заключаются главным образом в измерениях, — настолько бросается в глаза, что, по-видимому, распространилось мнение о том, что через несколько лет все основные физические постоянные будут с достаточной точностью определены и единственным оставшимся для ученых занятием будет достижение при дальнейших измерениях следующих десятичных знаков.

Если таково действительное положение вещей, к которому мы приближаемся, то наша лаборатория станет, быть может, знаменита своей добросовестной работой и совер-

шенством экспериментального мастерства; но она будет не на месте в университете и должна быть скорее отнесена к ряду знаменитых мастерских нашей страны, где подобное умение направлено на более полезные цели.

Но мы не вправе так думать о непостижимых богатствах творения или о неиспытанной еще продуктивности тех смелых умов, в которые будут продолжать изливаться эти богатства. Возможно, что в некоторых областях исследования, открывающихся тем грубым наблюдением, которые можно сделать без искусственных приемов, великие исследователи прошлого действительно завладели почти всем ценным и что оставленные ими крохи подбираются скорее из-за своей таинственной непонятности, нежели ради истинной, присущей им ценности. Но история науки показывает, что даже в течение этой фазы своего развития, в которой она посвящает себя уточнению численных измерений давно знакомых ей величин, она подготавливает материалы для подчинения новых областей, которые остались бы неизвестными, если бы наука довольствовалась грубыми методами своих ранних пионеров. Я мог бы привести примеры из любой отрасли науки, показывающие, как работа над тщательными измерениями была вознаграждена открытиями новых областей исследования и развитием новых научных идей. Так, история науки о земном магнетизме дает нам достаточный пример того, что можно сделать «объединенными опытами», какие мы и надеемся когда-нибудь произвести в нашей лаборатории.

На знаменитого путешественника Гумбольдта произвело глубокое впечатление научное значение объединенных усилий наблюдателей всех национальностей для точного измерения земного магнетизма; и мы главным образом обязаны его научному энтузиазму, его высокой репутации, его широкому влиянию тем, что он побудил принять участие в этом предприятии не только отдельных ученых, но и правительства большинства цивилизованных наций, в том числе и нашей. Но фактической разработкой плана и организацией, при которых вся работа наблюдателей должна была дать наилучший результат, мы обязаны великому математику Гауссу, работавшему в Геттингенской магнитной обсерватории вместе с Вебером, будущим основателем науки об электромагнитных измерениях. В этой работе им помогало искусство изготовлявшего приборы механика Лейзера. Эти люди, однако, работали не

одни. Многие ученые объединили свои усилия, изучили способ употребления новых инструментов и новые методы постановки опытов; и в каждом европейском городе можно видеть в определенно установленное время, как они сидят в холодных деревянных сараях, прижав глазом к зрительной трубе, внимательно прислушиваясь к часам и отмечая карандашом в записной книжке мгновенное положение подвешенного магнита.

Таким образом было осуществлено бэконовское представление об «объединенных опытах», разрозненные научные силы превращены в регулярную армию, соревнование и зависть сделались неуместны, так как полученные любым из наблюдателей результаты не имели никакой цены, не будучи объединены с результатами остальных.

Полученное при помощи нового метода увеличение точности и полноты магнитных наблюдений открыло новые области исследования, о существовании которых вряд ли подозревали люди, производившие более примитивным способом наблюдения над магнитной стрелкой. Мы должны отложить до соответствующего места в нашем курсе подробное описание возмущений, которым, оказывается, подвергается земной магнетизм. Некоторые из этих возмущений периодичны и связаны с равномерным движением Солнца и Луны. Другие внезапны и называются магнитными бурями, но, подобно атмосферным бурям, они имеют уже известную нам периодичность. Последнее и наиболее таинственное из этих магнитных изменений есть то вековое изменение, благодаря которому постепенно изменяется весь характер Земли, как огромного магнита, поскольку магнитные полюсы медленно, по извилистому пути, продвигаются из века в век в полярных областях.

Мы узнаем, таким образом, что внутренность Земли подвержена влиянию небесных тел и что, кроме этого, непрерывно происходит некоторое постоянное и прогрессивное изменение, причина которого совершенно неизвестна. Во всех магнитных обсерваториях во всем мире работает установка, при помощи которой подвешенный магнит направляет луч света на специальную движимую часовым механизмом полосу бумаги. На этой бумаге не знающее покоя сердце Земли чертит теперь телеграфными знаками, которые будут когда-нибудь расшифрованы, запись его пульсаций и колебаний, а также запись медленного, но мощного движения, предупреждающего нас, что мы не

должны считать внутреннюю историю нашей планеты законченной.

Это грандиозное исследование земного магнетизма оказало длительное влияние на прогресс науки вообще. Мне достаточно будет привести один или два примера. Новые методы измерения сил были успешно применены Вебером к числовым определениям всех электрических явлений, и вскоре затем электрический телеграф, придавая коммерческое значение точным числовым измерениям, в большой мере способствовал как успехам, так и распространению научных знаний.

Но это влияние чувствовалось не только в этих более новых отраслях науки. Гауссу, Магнитному объединению и магнитным наблюдателям вообще мы обязаны освобождением от нелепого метода измерения сил переменной единицей, так долго господствовавшего даже среди ученых. Гаусс первый обосновал практическое измерение магнитной силы (и, следовательно, всякой другой силы) теми давно установленными принципами, которыми, несмотря на то, что они воплощены в каждом динамическом уравнении, обычно настолько пренебрегали, что эти самые уравнения, хотя и правильно приведенные в наших кембриджских учебниках, обычно объяснялись в них при допущении, в добавление к переменной единице силы, переменной же и потому незаконной единицы массы.

Таковы некоторые научные результаты, последовавшие в данном случае от объединения математических способностей, экспериментальной прозорливости и лабораторного искусства для помощи и руководств работой целого коллектива усердных наблюдателей. Поэтому, если мы хотим для нашей собственной пользы и для славы нашего университета, чтобы Девонширская лаборатория успешно работала, мы должны постараться поддерживать живую связь ее с другими органами и факультетами нашей ученой корпорации. Поэтому прежде всего рассмотрим, в каком отношении находится наша работа к тем долгое время процветавшим среди нас математическим исследованиям, касавшимся тех же вопросов, которыми занимались и мы и которые отличаются от наших экспериментальных исследований лишь тем, как они преподносятся.

Нет лучшего метода сообщения уму знаний, чем метод преподнесения их в возможно более разнообразных формах. Когда проникшие в наш ум различными путями идеи

объединяются в крепости ума, занимаемое ими положение становится неприступным. Оптики говорят нам, что соединение в нашем мозгу восприятий предмета, полученных из двух положений, отстоящих друг от друга не далее, чем оба наших глаза, достаточно, чтобы создать впечатление объемности видимого предмета; и мы видим, что это впечатление получается даже тогда, когда мы сознаем, что в действительности рассматриваем плоские изображения в стереоскопе. Поэтому естественно ожидать, что физические знания, полученные при помощи соединенного применения математического анализа и экспериментальных исследований, будут более прочны и долговечны, чем знания только математиков или только экспериментаторов.

Но какое влияние окажет на университет тот факт, что люди, слушающие курс, давший столько выдающихся, окончивших с отличием по математике людей, отвлекаются для экспериментальной работы? Не будут ли их посещения лаборатории расцениваться не только как время, отнятое у изучения основной специальности, но и как введение смущающего элемента, пятнающего их математические представления материальными иллюстрациями и подрывающего их веру в формулы учебников? Помимо этого, мы уже слышали жалобы на чрезмерное расширение университетского курса и увеличение напряжения, налагаемого на наших оканчивающих студентов тяжестью обучения, жалобы, которые они пытаются заявить правлению университета. Если мы теперь попросим их изучить свой предмет не только при помощи книг и записей, но одновременно и при помощи наблюдений и опытов, то не падут ли они окончательно духом? Нам говорят, что физическая лаборатория, может быть, принесет пользу тем, кто будет заниматься естественными науками, а не математикой, но что пытаться соединить оба эти рода изучения в течение пребывания в университете — это больше, чем может вынести голова одного человека.

Несомненно, есть некоторые основания для такого мнения. Многие из нас уже превозмогли начальные трудности математического обучения. Продвигаясь теперь в нашей работе, мы чувствуем, что она требует усилий и заключает в себе трудности, но мы уверены, что если будем упорно работать, то успех обеспечен.

С другой стороны, некоторые из нас уже имели опыт в повседневной экспериментальной работе. Как только мы

научаемся читать шкалы, наблюдать время, фокусировать зрительную трубу и т. д., такого рода работа перестает требовать значительных умственных усилий. Мы можем, пожалуй, утомить глаза и спины, но мы не очень утомляем наши умы.

Лишь пытаясь связать теоретическую часть нашего обучения с практической, мы начинаем испытывать все воздействие того, что Фарадей назвал «умственной инерцией» — не только трудность обнаружить среди находящихся перед нами конкретных объектов абстрактные соотношения, которые мы почерпнули из книг, но затруднительную работу обращения нашего внимания от символических обозначений к объектам и от объектов, обратно, к символам. Такова, однако, цена, которую мы должны платить за новые идеи.

Однако, преодолев эти затруднения и успешно перебросив мост через пропасть между абстрактным и конкретным, мы не просто получаем некоторые знания: мы приобрели зачатки некоторого постоянного вклада в наше мышление. Когда, повторением подобного рода усилий, мы шире разовьем научные способности, то применение этих способностей к открытию научных принципов природы и к направлению практики теорией перестает быть скучным и становится неистощимым источником радости, к которому мы прибегаем так часто, что, наконец, даже наши случайные мысли начинают бежать по научному руслу.

Я признаю, что наша умственная энергия количественно ограничена, и знаю, что много усердных студентов пытаются сделать больше, нежели это для них полезно. Но вопрос о введении экспериментальных занятий не является всецело вопросом количества. Он в значительной мере является вопросом распределения энергии. Мы знаем, что некоторые распределения энергии более ползны, чем другие, так как они более пригодны для тех целей, которых мы желаем достигнуть.

Однако при обучении большая часть утомления часто возникает не от умственных усилий, с помощью которых мы овладеваем предметом, но от тех, которые мы тратим, собирая наши блуждающие мысли; и эти усилия внимания были бы гораздо менее утомительны, если бы можно было устранить рассеянность, нарушающую умственную сосредоточенность.

Поэтому-то человек, вкладывающий в работу всю свою душу, всегда успевает больше, нежели человек, интересы которого не связаны непосредственно с его занятием. В последнем случае побуждения, которыми он пользуется для стимулирования своих падающих сил, сами становятся средством отвлечения его от работы.

Может быть, и существуют математики, занимающиеся своими исследованиями исключительно для собственного удовольствия. Однако большинство людей предполагает, что главная польза математики заключается в применении ее для объяснения природы. Человек, изучающий какую-нибудь отрасль математики для того, чтобы рассчитать наилучшую постановку какого-нибудь опыта, который он собирается сделать, будет меньше отвлекаться, чем если бы его единственной целью было изощрение своего ума для успешного применения закона или для получения одного из первых мест в списке студентов-математиков, окончивших Кембриджский университет с отличием.

Я знал людей, которые, будучи в школе, никак не могли понять пользы математики, но, поняв ее, в дальнейшем не только становились выдающимися учеными-инженерами, но достигали больших успехов в занятиях абстрактной математикой. Если наш экспериментальный курс поможет кому-либо из вас увидеть пользу математики, это освободит нас от большого беспокойства, так как не только обеспечит успех вашего дальнейшего учения, но и сделает менее вероятным его вред для вашего здоровья.

Но зачем нам стараться доказывать пользу практической науки для университета? Поговорим лучше о той помощи, которую университет может оказать науке, когда люди с хорошей математической подготовкой, пользующиеся хорошо оборудованной лабораторией, объединят свои усилия для выполнения какого-нибудь экспериментального исследования, которое не мог бы предпринять ни один отдельный работник.

Вначале, вероятно, нашей главной экспериментальной работой должно быть иллюстрирование отдельных отраслей науки, но по мере продвижения вперед мы должны будем присоединить к этому изучение научных методов, причем один и тот же метод часто иллюстрируется применением его к исследованиям, принадлежащим к различным отраслям науки.

Можно себе даже представить экспериментальный курс, расположение которого основывалось бы на классификации не предметов исследования, но методов. Комбинация этих двух планов нравится мне больше, чем каждый из них в отдельности, и, пользуясь любым случаем для изучения методов, мы постараемся не отделять метод от научного исследования, к которому он приложен и которому он обязан своей ценностью.

Поэтому мы расположим наши лекции согласно классификации главных явлений природы, как тепло, электричество, магнетизм и т. д.

С другой стороны, в лаборатории место различных инструментов будет определяться классификацией на основании таких методов, как взвешивание и измерение, наблюдение времени, оптические и электрические методы наблюдения и т. д.

Определение времени, когда должен быть проделан тот или иной опыт, зависит от находящихся в нашем распоряжении средств, а в случае более сложных опытов может потребоваться значительный срок для подготовки их, в течение которого постепенно приспособляются для работы инструменты, методы и сами наблюдатели. Когда мы, таким образом, соединили для отдельного опыта все необходимое как со стороны материальной, так и со стороны интеллектуальной, иногда желательно, прежде чем разобрать приборы и распустить наблюдателей, проделать какой-нибудь другой опыт, требующий того же метода, но касающийся, может быть, совершенно другого класса физических явлений.

Однако нашей главной задачей в лаборатории будет ознакомление со всякого рода научными методами, сравнение их и их оценка.

Я думаю, будет достойным нашего университета и как раз будет той работой, которую скорее можно произвести здесь, чем в какой-либо частной лаборатории, если свободным и всесторонним обсуждением значимости различных научных процедур нам удастся образовать школу научной критики и помочь развитию учения о методе.

Однако, признавая, что практическое знакомство с физическими методами является существенной частью математического и естественнонаучного образования, нас могут спросить, не приписываем ли мы вообще слишком много значения точной науке, как части общего образования.

К счастью, здесь не ставится вопрос о том, должен ли университет быть местом получения общего образования или должен посвятить себя подготовке юношей к определенным профессиям. Поэтому, хотя я надеюсь, что некоторые из нас могут иметь основание к тому, чтобы сделать научные исследования главной целью своей жизни, мы должны постоянно стремиться поддерживать живую связь между нашей работой и гуманитарными курсами Кембриджа; литературными, филологическими, историческими или философскими.

Среди ученых появляется иногда узкий профессиональный дух, такой же, какой появляется среди людей, занимающихся какой-либо другой специальностью. Но, конечно, университет как раз является местом, в котором можно преодолеть тенденцию людей разбиваться на замкнутые кружки, в которых, именно благодаря их замкнутости, господствуют мелкие цеховые интересы. Мы теряем преимущество быть объединением различных специальностей, если не пытаемся до некоторой степени впитать дух науки даже со стороны тех, чья специальная отрасль знания отлична от нашей.

Не так давно еще на каждого человека, посвятившего себя геометрии или какой-либо другой науке, требующей постоянной усидчивости, смотрели как на мизантропа, отказавшегося от всяких человеческих интересов и преданного столь оторванной от мира абстракции, что он стал одинаково нечувствителен как к удовольствиям, так и к требованиям долга.

В настоящее время на людей науки не смотрят уже с почтительным страхом или с подозрительностью. Предполагается, что они связаны с практическим духом века и образуют как бы передовой отряд человечества.

Мы находимся здесь не для того, чтобы защищать литературные или исторические исследования. Мы признаем, что истинной темой исследования для человечества есть человек. Но разве человек, занимающийся точными науками, оторгнут от изучения человека или от всякого благородного чувства, поскольку он живет в интеллектуальном общении с людьми, которые посвятили свою жизнь нахождению истины и результаты исследований которых наложили отпечаток на обычную речь и образ мышления людей, никогда не слышавших их имен? Или изучающий историю и человека должен выпустить из своего поля зре-

ния историю происхождения и развития тех идей, которые вызвали различие одного века от другого?

Правда, история науки всегда отлична от науки об истории. Люди, имена которых встречаются в истории науки, не являются просто составными частями массы, о которых надо судить в совокупности со всеми другими.

Но история науки не ограничивается перечислением успешных исследований. Она должна сказать нам о безуспешных исследованиях и объяснить, почему некоторые из самых способных людей не смогли найти ключа знания и как репутация других дала лишь большую опору ошибкам, в которые они впали.

История как нормального, так и ненормального развития людей является из всех предметов исследования тем, который представляет для нас, как мыслящих людей, наибольший интерес. Но когда действие мышления переходит из интеллектуальной стадии, в которой двумя возможностями являются истина и ошибка, в более страстное эмоциональное состояние гнева и страсти, хитрости и зависти, бешенства и безумия, то, хотя изучающий науку человек и должен признать мощное влияние, оказываемое некоторыми из этих диких сил на человечество, он, может быть, до некоторой степени не подходит для изучения этих областей человеческой природы.

Но как мало среди нас способных извлечь пользу из таких исследований! Мы не можем полностью симпатизировать этим низшим фазам нашей природы, не потеряв частично той антипатии к ним, которая является нашей вернейшей охраной против возвращения к более низкому типу, и мы с радостью возвращаемся в общество тех знаменитых людей, которые, стремясь к благородным целям как интеллектуальным, так и практическим, поднялись над областью бурь в более чистую среду, где не существует ни неправильного истолкования мнений, ни двусмысленности выражений, но в которой один ум вступает в теснейший контакт с другим в той точке, где оба они близко подходят к истине.

В течение этого семестра я предполагаю читать о теплоте, и поскольку сейчас еще нет необходимых условий для экспериментальной работы, то вместо обсуждения деталей экспериментальных методов, я постараюсь ознакомить вас с относительным положением и научной связью различных отраслей знания.

Мы начнем с термометрии, или измерения температур, и калориметрии — измерения качеств тепла. Затем мы перейдем к термодинамике, которая исследует связь между тепловыми и остальными динамическими свойствами тел в той мере, в какой эти связи могут быть прослежены без каких-либо особых предположений о строении этих тел.

Принципы термодинамики бросают яркий свет на все явления природы, и, вероятно, многие важные применения этих принципов могут быть получены в будущем. Однако мы должны наметить границы этой науки и показать, что многие явления природы, в частности явления, сопровождаемые рассеянием энергии, не могут быть исследованы при помощи одних только принципов термодинамики, но что для понимания их мы должны исходить из несколько более определенной теории о строении тел.

Две теории строения вещества борются друг с другом с переменным успехом с древнейших времен: теория завершенности Вселенной и теория атомов и пустоты.

Теория завершенности Вселенной связана с учением о математической непрерывности, и ее математические методы суть методы дифференциального исчисления, которые являются адекватным выражением отношений непрерывного количества.

Теория атомов и пустого пространства приводит нас к признанию большой важности учений о целых числах и о конечных отношениях. Однако в применении динамических принципов к движению громадного числа атомов ограниченность наших способностей вынуждает нас отбросить попытку исследовать точную историю каждого атома и удовлетвориться подсчетом среднего положения группы атомов, достаточно большой для того, чтобы быть видимой. Этот метод оперирования группами атомов, который я могу назвать статистическим методом и который при современном состоянии нашего знания является единственно плодотворным методом изучения свойств реальных тел, находящихся в нашем распоряжении, включает отказ от чисто динамических принципов и принятие математических методов, относящихся к теории вероятностей. Возможно, что, благодаря применению этих, пока еще мало известных и непривычных для нашего сознания, методов будут достигнуты значительные результаты. Если бы действительная история науки была иной и если бы научными доктринами, наиболее привычными и знакомыми для нас, были

доктрины, выраженные этими указанными методами, то, вероятно, мы принимали бы существование определенного рода случайности за самоочевидную истину и считали бы философское учение о необходимости чистым софизмом.

Приблизительно в начале этого столетия некоторые знаменитые французские математики исследовали свойства тел как систем молекул в равновесии. Несколько неудовлетворительный характер результатов этих исследований породил, особенно в нашей стране, реакцию в пользу противоположного метода, рассматривающего тела так, как если бы они были — хотя бы в той мере, в какой это относится к нашим опытам, — действительно непрерывными. Этот метод в руках Грива, Стокса и других привел к результатам, вовсе не зависящим от того, какую теорию мы принимаем относительно действительного строения материи.

Одним из важнейших результатов исследования свойств тел на основе гипотезы об их непрерывности является то, что оно дает нам критерий, при помощи которого мы можем установить путем опытов над реальными телами, до какой степени малости они должны быть доведены прежде, чем возникнет уверенность, что их свойства уже не являются свойствами тела в целом. Исследования этого рода, в сочетании с изучением различных явлений диффузии и рассеяния энергии, дали в последнее время много доказательств в пользу гипотезы, рассматривающей тела как системы молекул, находящихся в движении.

В течение этого семестра я собираюсь изложить вам некоторые доказательства существования молекул как отдельных тел, обладающих определенными свойствами. Молекула, как она представляется научному воображению, есть тело, совсем не похожее на тела, известные нам до сих пор из опытов.

Во-первых, ее масса и другие определяющие ее свойства абсолютно неизменны; отдельная молекула не может ни расти, ни уменьшаться, но остается неизменной среди всех изменений тел, составной частью которых она является.

Во-вторых, она не является единственной молекулой с совокупностью свойств, ей присущих, так как существует бесчисленное множество других молекул, постоянные которых не приблизительно совпадают, а абсолютно тождественны постоянным первой молекулы, безотносительно,

находятся ли они на Земле, на Солнце или на неподвижных звездах.

Я не буду строить предположений о том, какими процессами эволюции ученые будущего попытаются объяснить эту тождественность свойств такого множества тел, каждое из которых неизменно по величине, а некоторые отделены от других расстояниями, которые астрономия тщетно пытается измерить. Мой разум ограничен в пределах своих познавательных возможностей, и я вынужден верить, что эти молекулы должны были быть созданными такими, какими они являются с начала своего существования.

Точно так же я прихожу к заключению, что, поскольку ни один из процессов природы в течение разнообразных воздействий на различные отдельные молекулы не вызвал после ряда веков даже ничтожнейших различий между свойствами одной молекулы и свойствами другой, история сочетаний которых была бы различна, мы не можем приписать ни их существование, ни тождество их свойств действию каких-нибудь из тех причин, которые мы называем естественными.

Справедливо ли тогда утверждение, что наша научная мысль действительно проникает сквозь видимую форму вещей, подверженных созиданию и уничтожению, и достигла входа в тот мир порядка и совершенства, который остается неизменным со дня его создания, совершенным в числе, мере и весе.

Может быть, мы ошибаемся. Никто еще не видел отдельной молекулы и не имел с ней дела, и наша молекулярная гипотеза, может быть, в свою очередь уступит место новой теории строения материи; однако идея о существовании бесчисленного множества отдельных частиц, неизменных и подобных друг другу, проникнув в человеческое сознание, не может оставаться бесплодной.

Но что, если эти неразрушимые молекулы окажутся не самостоятельными субстанциями, а лишь проявлениями некоторой иной субстанции?

Согласно теории вихревых атомов В. Томсона, субстанцией, из которой состоят молекулы, является материя одинаковой плотности, равномерно заполняющая все пространство и обладающая свойствами идеальной жидкости; сама же молекула есть не что иное, как некоторое движение, сообщенное части этой жидкости, и это движение, как

показал Гельмгольц, так же неразруσιμο, как и уверенность наша в неразрушимости каждой частицы материи.

Если подобного рода теория верна или даже если она правдоподобна, то наша идея материи может войти в наше сознание через опыты и с такими системами вихрей, которые мы называем телами и которые, однако, являются не субстанциями, а движениями субстанций; более того, полученное таким образом представление о материи как субстанции, обладающей инерцией, в действительности можно применить к этой жидкости, вихри в которой представляют движение, хотя никаких доказательств существования этой жидкости, кроме вихревого движения в некоторых ее частях, наш опыт не дает.

Утверждали, что метафизические спекуляции отопли уже в прошлое и что физическая наука уничтожила их. Однако и в наше время нет оснований опасаться прекращения обсуждения категорий бытия, и спекулятивные упражнения так же продолжают увлекать смелые умы, как увлекали их еще в дни Фалеса.

О математической классификации физических величин

Первый этап развития физической науки состоит в отыскании системы величин, относительно которых можно предположить, что от них зависят явления, рассматриваемые данной наукой. Второй ступенью является отыскание математической формы соотношений между этими величинами. После этого можно рассматривать эту науку как науку математическую. Проверка же ее законов осуществляется путем теоретического исследования условий, при которых могут быть возможно более точно измерены некоторые величины, а также путем последующего экспериментального осуществления этих условий и действительного измерения этих величин.

Лишь благодаря имевшим место за последнее время успехам науки мы познакомились с таким большим количеством физических величин, что стала желательна их классификация.

Одна весьма очевидная классификация величин основана на классификации тех наук, в которых они встречаются. Так, температура, давление, плотность, удельная теплота, скрытая теплота и т. д. суть величины, встречающиеся в теории воздействия теплоты на тела.

Но та классификация, о которой я сейчас говорю, основана на математической или формальной аналогии между различными величинами, а не предмете, к которому они относятся. Так, отрезок прямой линии, сила, скорость вращения и т. д. суть величины, различные по своей физической

ской природе, но сходные по своей математической форме. Мы можем различать эти два способа классификации, называя первую физической, а вторую математической классификацией величин.

Знакомство с математической классификацией величин чрезвычайно полезно как человеку, ведущему оригинальные исследования, так и человеку, просто изучающему науку. Наиболее показателен тот случай, при котором мы узнаем, что величины определенной системы находятся в новой науке в тех же математических соотношениях друг с другом, что и величины некоторой другой системы в старой науке, в которой эта система была уже сведена к математической форме и проблемы которой были уже разрешены математиками.

Так, когда Моссоти заметил, что Фарадей доказал аналогичность некоторых величин, относящихся к электростатической индукции в диэлектриках, и некоторых величин, относящихся к магнитной индукции в железе и других телах, он смог воспользоваться математическими исследованиями Пуассона, относящимися к магнитной индукции, переведя лишь их с магнитного языка на язык электричества и с французского на итальянский.

Другой пример, далеко не столь очевидный, — это пример аналогии, существующей между вопросами притяжения и вопросами установившейся теплопередачи, впервые отмеченный сэром Вильямом Томсоном. Пользуясь ею, мы можем применить многие результаты, полученные Фурье для теплоты, при объяснении электрического распределения и все результаты, полученные Пуассоном для электричества, для объяснения проблем теории теплоты.

Но ясно, что все аналогии такого рода основаны на значительно более глубоких принципах и что если бы мы имели настоящую математическую классификацию величин, то мы могли бы сразу открыть аналогию между любой представленной нам системой и другими системами величин в уже известных нам науках. Таким образом мы не теряли бы времени, так как пользовались бы математическими трудами тех, кто уже в основном разрешил проблемы того же рода.

Все величины могут быть объединены в одном отношении, а именно: в том, что их можно определить при помощи двух факторов. Первый фактор есть числовая величина, а второй — единица того же рода, как и определяемая.

Таким образом, можно сказать, что число управляет всем миром количеств, и четыре действия арифметики можно рассматривать как полное снаряжение математика.

Положение и форму, считавшиеся ранее в исключительном распоряжении геометров, остроумным построением координатных осей, положенных им в основу своих операций, Декарт заставил подчиниться законам арифметики.

Со времени этого большого шага, сделанного математикой, все величины рассматривались одинаковым образом и представлялись при помощи чисел или символов, означающих числа. Таким образом, как только какая-нибудь наука полностью приводилась к математической форме, предполагалось (по крайней мере в мире неспециалистов), что решение проблем в этой науке как умственный процесс производится без помощи каких бы то ни было физических идей этой науки.

Мне не приходится говорить, что это неправильно и что при решении физических проблем математикам оказывает большую помощь знание науки, в которой эта проблема встречается.

В то же время я думаю, что для успеха науки как в области открытий, так и в области распространения ее было бы весьма полезно, если бы обращали больше внимания непосредственно на классификацию величин.

Чрезвычайно важное различие было проведено Гамильтоном, разделившим величины, с которыми он имел дело, на скаляры, полностью изображаемые одной числовой величиной, и векторы, требующие для своего определения трех числовых величин.

Изобретение исчисления кватернионов есть шаг вперед к познанию величин, связанных с пространством, сравнимое по своему значению лишь с изобретенной Декартом системой координат. Идеи этого исчисления, отвлеченные от его действий и символов, могут быть чрезвычайно полезны во всех областях науки.

Можно предположить, что другим важным шагом вперед в развитии науки явилось бы изобретение метода, столь же подходящего для представления динамических величин. Подобно тому как наши представления о физической науке становятся более жизненными при замене чисто числовых идей картезианской математики геометрическими идеями гамильтоновской математики, так в более высоких науках идеи могли бы получить еще более высокое

развитие, если бы их можно было выразить на языке, столь же соответствующем динамике, насколько гамильтоновский соответствует геометрии.

Другим преимуществом этой классификации является то, что она руководит нами в применении четырех правил арифметики. Мы знаем, что можно применять законы сложения и вычитания только в том случае, если мы имеем дело с величинами одного и того же рода. В некоторых случаях мы можем перемножать или делить одну величину на другую, но в других случаях результат этого действия не имеет никакого рационального значения.

Профессор Ранкин указал, что физическая величина, называемая энергией или работой, может быть представлена в виде произведения двух множителей многими различными способами.

Размерность этой величины $\frac{ML^2}{T^2}$, где L , M , и T представляют собой конкретные единицы длины, массы и времени. Если мы разложим энергию на два множителя, из которых один будет заключать L^2 , то оба множителя будут скалярами. С другой стороны, если каждый из них будет заключать L , то они оба будут векторами. Сама энергия всегда скалярная величина.

Так, если мы возьмем в качестве множителей массу и квадрат скорости, как это делается в обычных определениях живой силы или кинетической энергии, то оба множителя — скаляры, хотя один из них, квадрат скорости, не имеет своего определенного физического значения.

Другим разложением на, по-видимому, скалярные множители является разложение на объем и гидростатическое давление, хотя мы должны рассматривать здесь объем не сам по себе, но как величину, подверженную возрастанию и уменьшению. Это изменение объема может происходить лишь на поверхности и вызывается изменениями поверхности в направлении нормали, так что оно есть не скалярная, а векторная величина. Также и давление — хотя в абстрактном представлении гидростатическое давление и скалярно — нужно представить себе приложенным к поверхности. Таким образом оно становится направленной величиной, или вектором.

Разложение энергии на векторные множители дает результаты, всегда допускающие удовлетворительную интерпретацию их. Один из сомножителей представляют себе

как тенденцию к какому-то изменению, а другой как само изменение.

Так, в элементарном определении работы ее рассматривают как произведение силы на путь, по которому движется точка приложения силы, взятый в виде проекции на направление силы. На языке кватернионов она есть скалярная часть произведения силы на перемещение.

Можно рассматривать эти два вектора, силу и перемещение, как типичную пару векторов, произведение которых представляет своей скалярной частью некоторую из форм энергии.

Так, вместо разложения кинетической энергии на множители: «масса» и «квадрат скорости», — из которых последний не имеет смысла, мы можем разложить ее на «момент» и «скорость» — два вектора, которые в динамике материальной частицы имеют одинаковое направление, но в обобщенной динамике могут иметь различные направления, так что, беря их произведение, нужно помнить правило нахождения его скалярной части.

Но общий принцип разложения энергии на два множителя особенно ясно виден, когда мы имеем дело со сплошными телами и величинами, распределенными в пространстве.

Когда мы рассматриваем энергию как нечто существенно присущее телу, мы можем измерять интенсивность количеством, заключенным в единице объема. Это, конечно, — величина скалярная.

Из двух составляющих ее множителей один относится к единице длины, а другой — к единице площади. Это дает, с моей точки зрения, чрезвычайно существенное различие между векторными величинами.

Векторы, относимые к единице длины, я буду называть силами, употребляя, как мы увидим, это выражение в несколько обобщенном смысле. Операция интегрирования составляющей силы в направлении некоторой линии для каждого элемента этой линии всегда имеет физическое значение. В некоторых случаях результат интегрирования независим от пути между ее начальной и конечной точками. Результат называется тогда потенциалом.

Векторы, относимые к единице площади, я буду называть потоками. Операция интегрирования составляющей потока, перпендикулярной к поверхности, для каждого элемента поверхности всегда имеет физический смысл.

В некоторых случаях результат интегрирования по замкнутой поверхности не зависит, с некоторыми ограничениями, от положения поверхности. Результат выражает тогда количество некоторого рода вещества, либо существующего внутри поверхности, либо вытекающего из нее, соответственно физической природе потока.

В физике во многих случаях сила и поток всегда имеют одно и то же направление и пропорциональны друг другу. Поэтому одним часто пользуются для измерения другого; их обозначения часто вырождаются в одно, и оба эти представления смешиваются. Один из самых важных математических результатов открытия веществ, обладающих различными физическими свойствами в различных направлениях, заключался в том, что он позволил провести различие между силой и потоками, показывая нам, что их направления могут быть различны.

Так, в обычной теории жидкостей, в которой рассматривается лишь движение, которое можно непосредственно обнаружить, мы можем с одинаковым успехом определить ее через единицы длины — как число единиц длины, пройденных частицей за единицу времени. Или мы можем определить ее через единицы площади как объем жидкости, проходящей через единицу площади за единицу времени. Определенная первым способом, она принадлежит к категории сил; определенная вторым — к категории потоков.

Но если мы попытаемся развить более полную теорию жидкостей, учитывающую наличие диффузии, при которой в одном и том же месте две жидкости обладают различными скоростями, или если мы примем учение о том, что в силу теплоты молекулы жидкости находятся в состоянии движения, то, хотя мы и можем дать определение скорости отдельной молекулы, выражая ее через единицу длины, мы не можем этого сделать для самой жидкости; и единственный способ определения движения жидкости — это рассмотрение ее как потока и измерение последнего количеством жидкости, протекающей сквозь единицу площади.

Это различие еще более необходимо, когда мы обращаемся к теплоте и электричеству. Тепловой или электрический поток нельзя себе даже представить иначе, как в виде количества, протекающего в заданное время сквозь заданную площадь. Для того чтобы составить представление о скорости, в смысле, соответствующем каждому из этих

агентов, нам нужно было бы представить себе тепло и электричество как непрерывную материю, имеющую известную плотность.

Мы должны поэтому рассматривать эти количества как потоки. Соответствующие им силы: в случае теплоты — степень изменения температуры, в случае электричества — степень изменения потенциала.

Я достаточно сказал для установления различия между силами и потоками. В статическом электричестве результирующая сила в точке есть степень изменения потенциала, а поток — величина, которую до сих пор смешивали с силой и которую я назвал электрическим смещением.

В магнетизме результирующая сила также является степенью изменения потенциала, а поток есть то, что Фарадей называет магнитной индукцией и что измеряется, как это показал Томсон, силой, приходящейся на единичный полюс, помещенный в узкой щели, прорезанной перпендикулярно к направлению намагничивания магнита. Я не буду задерживать Общество разъяснением этих величин, но должен коротко установить природу отношения силы и потока в его самой общей форме.

Когда один вектор является функцией другого вектора, отношение первого ко второму является вообще кватернионом, представляющим собой функцию второго вектора.

Когда второй вектор изменяется лишь по величине, а первый все время ему пропорционален и остается постоянным по направлению, мы имеем важный случай *линейной* функции. Первый вектор тогда называется линейной векторной функцией второго.

Если α , β , γ — декартовы компоненты первого вектора, а a , b , c , — компоненты второго, то

$$\alpha = r_1 a + q_1 b + p_1 c,$$

$$\beta = p_2 a + r_2 b + q_2 c,$$

$$\gamma = q_3 a + p_3 b + r_3 c,$$

где коэффициенты p , q , r , постоянны. Когда все p равны соответствующим q , функция называется самосопряженной. Она может быть тогда представлена геометрически как соотношение между радиусом-вектором из центра эллипсоида и перпендикуляром на касательную плоскость.

Можно заметить, что даже здесь, где мы, казалось бы, достигли чистых сфер науки, не запятнанных физическими приложениями, один из векторов необходимо есть

линия, тогда как другой определяется как нормаль к плоскости, как и во всех других, уже упомянутых парах векторов*.

Другое различие между физическими векторами основано на ином принципе и разделяет их на векторы, определяемые по отношению к вращению. На замечательные аналогии между этими двумя классами векторов указал Пуансо в своем труде о движении твердого тела. Но наиболее замечательная иллюстрация этих аналогий основана на двух различных точках зрения, с которых можно рассматривать связь между электричеством и магнетизмом.

Гельмгольц показал нам в своей знаменитой работе о вихревом движении, как провести аналогию между электромагнитными и гидро-кинетическими явлениями, в которых магнитная сила представлена скоростью жидкости, родом поступательного движения, а электрический ток представлен вращением элементов жидкости. Он не предлагает этого в качестве объяснения электромагнетизма, так как хотя эта аналогия и совершенна по форме, но динамика обеих систем чрезвычайно различна.

Согласно Амперу и его исследованиям, электрические токи рассматриваются, однако, как род поступательного движения, а магнитная сила — как сила, зависящая от вращения. Я вынужден согласиться с этой точкой зрения, так как электрический ток связывается с электролизом и другими явлениями, в которых, несомненно, мы имеем поступательное движение, тогда как магнетизм связан с вращением плоскости поляризации света, которое, как показал Томсон, включает в себе действительное вращательное движение.

Гамильтоновский оператор ∇ , примененный к любой векторной функции, превращает ее из поступательного движения во вращение или из вращения в поступательное движение, в зависимости от рода вектора, к которому он применяется.

В заключение я предложу на рассмотрение некоторые математические термины, служащие для обозначения результатов гамильтоновского оператора ∇ . Я буду очень признателен тому, кто даст мне какой-нибудь совет по этому вопросу, так как я чувствую, что моя способность

* Вопрос о линейных уравнениях в кватернионах был развит проф. Тэтом в нескольких сообщениях Эдинбургскому Королевскому обществу.

к установлению наименований очень слаба и что она может с успехом осуществляться лишь в сотрудничестве с другими.

$$\nabla \text{ есть операция } i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z},$$

где i, j, k — единичные векторы, параллельные соответственно x, y, z . Результатом двукратного повторения на любом объекте этой операции является хорошо известный оператор (Лапласа):

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Нахождением квадратного корня этой операции мы обязаны Гамильтону; но большинство данных здесь приложений и развитие теории этого оператора дано профессором Тэтом и напечатано в ряде статей, из которых первая помещена в «Proceedings of the Royal Society of Edinburgh» от 28 апреля 1862 г., а наиболее полная «О теоремах Грина и других, связанных с ними» — в «Transactions of the Royal Society of Edinburgh», 1869—1870 г.

Прежде всего я предлагаю назвать результат ∇^2 (оператор Лапласа) с обратным знаком *концентрацией* величины, к которой она применена.

Действительно, если Q есть скалярная либо векторная величина, являющаяся функцией положения точки, и если мы возьмем интеграл Q по объему шара радиуса r , то, разделив его на объем шара, мы получим Q , *среднее значение* Q внутри шара. Если Q_0 есть значение Q в центре шара, то при малом r

$$Q_0 - \bar{Q} = Cr^2 \nabla^2 Q,$$

т. е. значение Q в центре шара превышает среднее значение Q внутри шара на величину, зависящую от радиуса и от $\nabla^2 Q$. Поэтому раз $\nabla^2 Q$ означает избыток значения Q в центре над его средней величиной внутри шара, то я назову его *концентрацией* Q .

Если Q — величина скалярная, то и концентрация ее — скаляр. Так, если Q — электрический потенциал, то $\nabla^2 Q$ есть плотность вещества, создающего потенциал.

Если Q — векторная величина, то Q_0 и \bar{Q} — векторы и $\nabla^2 Q$ — также вектор, выражающий собой избыток равномерно распределенной силы Q_0 , приложенной ко всему

веществу шара, над результирующей действительной силы Q , действующей на все части шара.

Рассмотрим затем гамильтоновский оператор ∇ . Применим его сначала к скалярной функции P . Величина ∇P есть вектор, указывающий направление, в котором P наиболее быстро уменьшается, и измеряющий степень этого уменьшения. Я решаюсь, с большой осторожностью, называть это падением (*slope*) P . Ламе называет величину выражения ΔP «первым дифференциальным параметром» P , но направлением вектора ΔP он не интересуется. Нам пужен термин, имеющий векторный характер и который, одновременно указывая направление и величину, в то же время не употреблялся бы еще в другом математическом смысле. Я взял на себя смелость, распространить обычный смысл слова падение (*slope*), взятого из топографии, где по отношению к трехмерному пространству употребляются лишь две независимые переменные.

Если σ изображает векторную функцию, то $\Delta \sigma$ может одновременно заключать скалярную и векторную части, которые могут быть написаны как $S \nabla \sigma$ и $V \nabla \sigma$.

Я предлагаю назвать скалярную часть *конвергенцией*¹ σ потому, что если описать вокруг любой точки замкнутую поверхность, то поверхностный интеграл σ , выражающий действие вектора σ , рассматриваемого как втекание потока через поверхность, равен объемному интегралу $S \nabla \sigma$ по заключенному в этой замкнутой поверхности пространству. Поэтому я считаю, что конвергенция векторной функции является очень подходящим названием для действия этой векторной функции, заключающегося в продвижении представляемого им объекта внутрь, к одной точке.

Но $\nabla \sigma$ имеет обычно еще и векторную часть, и я, с величайшей осторожностью, предлагаю назвать этот вектор *кэрлом* (*curl*) или *версией* (*version*) первоначальной векторной функции¹.

Он изображает направление и величину вращения вещества, представляемого вектором σ . Я искал термин, который не подразумевал бы движения, как слова «вращение», «вихрь», «кружение», или же указывал бы, как слово «скручивание», на спиральное или винтообразное строение, которое совершенно несвойственно природе вектора.

¹ Теперь употребляют термины «дивергенция», «вихрь» (или «ротор»).— *Прим. ред.*

Если мы вычтем из общей величины векторной функции σ ее значение σ_0 в точке P , то оставшийся вектор $\sigma - \sigma_0$ будет направлен, в случае чистой конвергенции, к P ; в случае чистого кэрла — по касательной вокруг P , а в том случае, когда имеется и конвергенция и кэрл, он будет направлен по спирали.

Справедливы следующие утверждения:

Падение скалярной функции не имеет кэрла.

Кэрл векторной функции не имеет конвергенции.

Конвергенция падения скалярной функции есть ее концентрация.

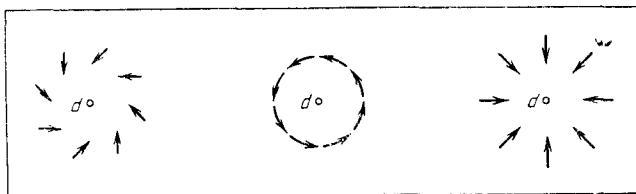


Рис. 1

Концентрация векторной функции есть падение ее конвергенции и кэрл ее кэрла.

Выражения в кватернионах, переводом которых являются все приведенные выше утверждения, были даны проф. Тэтом в его статье в «Proceedings of the Royal Society of Edinburgh» от 28 апреля 1862 г. Наиболее же полный математический разбор оператора ∇ можно найти в весьма содержательной статье проф. Тэта «О теории Грина и других, связанных с нею теоремах» («Transactions of the Royal Society of Edinburgh», 1870) и в другой статье в «Proceedings of the Royal Society of Edinburgh» за 1870—1871 гг., стр. 318.

О действиях на расстоянии

Сегодня я намерен беседовать с вами не о каком-либо новом открытии. Я желаю говорить о предмете, давно известном, и обратить ваше внимание на вопрос, который неоднократно возникал с тех пор, как человек начал мыслить.

Это — вопрос о передаче силы. Мы видим, что два тела, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, оказывают взаимное влияние одно на движение другого. Зависит ли это взаимодействие от существования некоторой третьей вещи, некоторой среды, приводящей одно тело в сообщение с другим и занимающей пространство между обоими телами, или же тела действуют друг на друга непосредственно, без участия чего-либо иного?

Фарадей смотрел на явления этого рода иначе, нежели некоторые из современных исследователей, и моей целью является — дать вам возможность стать самим на точку зрения Фарадея и выяснить научное значение концепции силовых линий, которая в его руках сделалась ключом к науке об электричестве.

Когда мы наблюдаем, что одно тело действует на другое на расстоянии, то прежде чем принять, что это действие прямое и непосредственное, мы обыкновенно исследуем, нет ли между телами какой-либо материальной связи; и если находим, что тела соединены нитями, стержнями или каким-либо механизмом, способным дать нам

отчет в наблюдаемых действиях одного тела на другое, мы предпочитаем скорее объяснить действия при помощи этих промежуточных звеньев, нежели допустить понятие о прямом действии на расстоянии.

Так, когда мы, дергая за проволоку, заставляем звонить колокольчик, то последовательные части проволоки сначала натягиваются, а затем приходят в движение, пока наконец звонок не зазвонит на расстоянии посредством процесса, в котором принимали участие все промежуточные частицы проволоки одна за другой. Мы можем заставить колокольчик звонить на расстоянии и иначе; например, нагнетая воздух в длинную трубку, на другом конце которой находится цилиндр с поршнем, движение которого передается звонку. Мы можем также пользоваться проволокой, но вместо того чтобы дергать ее, можем соединить ее на одном конце с электрической батареей, а на другом — с электромагнитом, и таким образом заставим колокольчик звонить посредством электричества.

Здесь мы указали три различных способа приводить звонок в движение. Но во всех этих способах есть то общее, что между звонящим лицом и звонком находится непрерывная соединительная линия и что в каждой точке этой линии совершается некоторый физический процесс, посредством которого действие передается с одного конца линии на другой. Процесс передачи — не мгновенный, а постепенный; так что, после того как на одном конце соединительной линии дан импульс, проходит некоторый промежуток времени, в течение которого этот импульс совершает свой путь, пока не достигнет другого конца.

Ясно, следовательно, что в некоторых случаях действие между телами на расстоянии можно объяснить себе тем, что в ряду тел, занимающих промежуточное пространство, совершается ряд действий между каждыми двумя смежными телами ряда; и сторонники действия посредствующей среды спрашивают: не разумнее ли в тех случаях, когда никаких посредствующих агентов мы не замечаем, — не разумнее ли будет, говорят они, допустить в этих случаях существование среды, которую указать пока мы не можем, нежели утверждать, что тело может действовать там, где его нет.

Кому свойства воздуха незнакомы, тому передача силы посредством этой невидимой среды будет казаться столь же непонятной, как и всякий другой пример дейст-

вия на расстоянии, и однако в этом случае мы можем объяснить весь процесс и определить скорость, с которой действие передается от одного участка среды до другого.

Почему же не можем мы допустить, что знакомый нам способ сообщения движения посредством толчка и тяги нашими руками является видом и наглядным примером всякого действия между телами, даже в тех случаях, когда мы не можем заметить между телами ничего такого, что видимо принимало бы участие в этом действии.

Вот, например, своего рода притяжение, с которым познакомил нас профессор Гютри. Приводят в колебательное движение диск, а затем подносят его к свободно подвешенному телу, и оно тотчас начинает приближаться к диску — как будто бы его тянули к нему невидимой нитью. Что же такое эта нить? Сэр В. Томсон показал, что в движущейся жидкости давление всего меньше там, где скорость всего больше. Скорость колебательного движения воздуха больше возле самого диска. Следовательно, давление воздуха на подвешенное тело меньше на стороне, ближайшей к диску, нежели на противоположной стороне; тело уступает большему давлению и движется к диску.

Следовательно, диск не действует там, где его нет. Он приводит в движение прилегающий к нему воздух, толкая его: это движение постепенно сообщается более и более удаленным частям воздуха, и таким образом давления на противоположные стороны подвешенного тела делаются неравными, и, повинувшись избытку давления, оно движется к диску. Сила здесь, следовательно, есть сила в смысле старой школы — случай *vis a tergo* — толчка сзади.

Однако сторонники учения о действии на расстоянии такими аргументами не удовлетворяются. Какое право, говорят они, имеем мы утверждать, что тело не может действовать там, где его нет? Разве не видим мы, например, действие на расстоянии в случае магнита, который на другой магнит не только действует на расстоянии, но и совершенно безразлично относится к природе вещества, наполняющего промежуточное пространство? Если бы действие зависело от чего-либо, наполняющего пространство между магнитами, то, наверное, было бы не все равно, находится ли в этом пространстве воздух или нет, находится ли между магнитами дерево или между ними помещено стекло или медь.

Кроме того, Ньютонов закон тяготения, который в каждом астрономическом наблюдении находит для себя все более и более твердую почву, не только утверждает, что небесные тела действуют друг на друга через неизмеримые пространства, но что две части вещества, одна, лежащая на тысячу миль под землей, другая, погребенная на сотни тысяч миль в недрах Солнца, действуют друг на друга в точности с такой же силой, как будто бы этих слоев, под которыми каждая из них скрыта, вовсе не существовало. Если бы какая-либо среда принимала участие в передаче этого действия, то во всяком случае должна была бы быть некоторая разница в зависимости от того, находится ли в пространстве между телами только эта среда и ничего более или в нем содержится более плотное вещество Земли или Солнца.

Но сторонники прямого действия на расстоянии не довольствуются этого рода примерами, где явления даже на первый взгляд, по-видимому, благоприятствуют их учению. Свои нападки на лагерь противника они ведут далее и утверждают, что даже когда действие и представляется давлением непрерывных частей вещества, то это — непрерывность только кажущаяся, что между телами, действующими друг на друга, *всегда* находится промежуточное пространство. Короче: они утверждают, что действие на расстоянии не только не невозможно, но что это — единственный способ действия, всюду встречающийся, и что излюбленная старыми учениями *vis a tergo* в природе не существует и существует только в воображении своих сторонников.

Чтобы доказать, что, когда тело толкает другое, оно не прикасается к нему, всего лучше измерить расстояние между ними. Вот две стеклянные линзы, из которых одна производит давление на другую при помощи некоторого груза. Посредством электрического источника света мы можем получить на экране изображение того места, где одна линза давит на другую. На экране образуется ряд цветных колец. Эти кольца впервые наблюдал и впервые изучал Ньютон. Особый цвет каждого кольца зависит от расстояния между поверхностями обоих стекол. Ньютон составил таблицу цветов, соответствующих расстояниям, так что, сравнивая цвет какого-либо кольца с Ньютоновой таблицей, мы можем определить расстояние между поверхностями в том месте, где находится это кольцо. Цве-

та располагаются кольцами вследствие того, что поверхности сферичны и, следовательно, удаление частей поверхностей линз друг от друга зависит от их расстояния от линии, соединяющей центры сфер. Центральное пятно системы колец указывает на место, где линзы всего ближе одна от другой, а каждое из последовательных колец соответствует увеличению расстояния между поверхностями на $\frac{1}{4000}$ миллиметра.

Сожмем теперь линзы силой, равной весу одной унции; между ними будет все еще измеримый промежуток, даже в том месте, где они всего ближе друг к другу. Оптического контакта между ними еще нет. Чтобы доказать это, приложим большой груз. Центральное пятно окрашивается новым цветом, а диаметры всех колец увеличиваются. Это показывает, что теперь поверхности ближе, чем они были прежде, но все-таки оптического контакта между ними нет, ибо если бы такой контакт был, то центральное пятно было бы черное. Поэтому я увеличиваю грузы, чтобы сблизить линзы до оптического соприкосновения.

Но то, что мы называем оптическим контактом, не есть действительное соприкосновение. Оптический контакт показывает только, что расстояние между поверхностями гораздо меньше длины световой волны. Чтобы показать, что действительного соприкосновения между поверхностями нет, я удаляю грузы. Кольца суживаются, и многие из них исчезают в центре. Теперь можно одно стекло так прижать к другому, что они вовсе не будут стремиться отделиться друг от друга, но так крепко пристанут одно к другому, что при разнятии стекло лопнет не в точке соприкосновения, а в некотором другом месте. Это показывает, что стекла соприкасаются друг с другом гораздо ближе, нежели при настоящем оптическом контакте.

Таким образом мы показали, что тела начинают давить одно на другое уже в то время, когда расстояние между ними еще измеримо, и что при надавливании одного на другое с большей силой, абсолютного контакта между ними нет, но что их можно сблизать все теснее и теснее.

Как же вы можете, скажут сторонники прямого действия на расстоянии, все же поддерживать учение, основанное лишь на грубом опыте донаучных времен, что материя не может действовать там, где ее нет, вместо того чтобы согласиться, что все факты, из которых наши предшественники заключали, что контакт существенно необходим

для действия, на самом деле были случаями действия на расстоянии, только расстояния были слишком малы, чтобы их можно было измерить несовершенными средствами наблюдения?

Если мы хотим открывать законы природы, мы можем достичь этого лишь путем возможно более точного ознакомления с явлениями природы, а никак не путем выражения философским языком неопределенных мнений человека, который вовсе не обладает знанием тех фактов, которые всего больше проливают света на эти законы. Что же касается тех, которые для объяснения этих действий вводят эфирные и иные среды, не имея никаких прямых доказательств существования таких сред или без ясного понимания того, каким образом действуют эти среды, и которые заполняют все пространство тремя или четырьмя эфирами различных сортов, то чем меньше эти люди будут толковать о своих философских сомнениях в существовании действия на расстоянии, тем будет лучше.

Если бы прогресс науки управлялся Ньютоновым первым законом движения, то легко было бы вырабатывать воззрения, опережающие век. Мы должны были бы только сравнивать современную науку с тем, чем она была пятьдесят лет тому назад, и, проведя, в геометрическом смысле, линию прогресса, мы должны были бы получить науку, какой она будет пятьдесят лет спустя.

Научный прогресс в эпоху Ньютона состоял в устранении того небесного механизма, которым загорожено было небо целыми поколениями астрономов; нужно было «смести с неба эту паутину».

Хотя хрустальные сферы, к которым прикреплены были планеты, и были уже удалены, но планеты еще плавали в вихрях Декарта. Магниты были окружены истечениями, а наэлектризованные тела — атмосферами, но свойства этих истечений и атмосфер ничуть не были похожи на свойства обыкновенных истечений и атмосфер.

Когда Ньютон доказал, что сила, действующая на каждое небесное тело, зависит от его положения по отношению к другим телам, то новая теория встретила суровый отпор со стороны передовых философов века, которые отзывались о доктрине тяготения как о возврате к уже отвергнутому способу объяснять все что угодно скрытыми причинами, притягательными силами и тому подобным. Сам Ньютон, с мудрой осторожностью, какой отлича-

лись все его умозрения, отвечал, что он ничуть не претендует на объяснение механизма, посредством которого небесные тела действуют друг на друга. Определение того, каким образом их взаимодействие зависит от их относительных положений, было в науке большим шагом вперед, и Ньютон удостоверял, что этот шаг им сделан. Но объяснить процесс, посредством которого это действие совершается, было совсем иное дело, и в своих «Principia» Ньютон и не пытался этого делать.

Насколько Ньютон был далек от утверждения, будто тела в самом деле действуют друг на друга на расстоянии, независимо от чего-либо, находящегося между ними, видно из письма к Бентли, цитированного Фарадеем. Здесь Ньютон говорит:

«Непонятно, каким образом неодушевленная косная материя, без посредства чего-либо иного, что нематериально, могла бы действовать на другое тело без взаимного прикосновения, как это должно было бы иметь место, если бы тяготение, в смысле Эпикура, было присуще материи и с нею нераздельно... Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии, через пустоту, без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могли бы передаваться от одного к другому,— это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому прийти».

Так, в «Вопросах», приложенных к его «Оптике», и в письмах его к Бойлю, мы находим, что Ньютон в самом начале сделал попытку объяснить тяготение при помощи давления некоторой среды и что он не обнаружил своего объяснения «только потому, что ему не удалось из опыта и наблюдений дать удовлетворительного доказательства существования такой среды и способа, каким она действует, производя явления природы» *.

Доктрина прямого действия на расстоянии не может считать своим автором открывшего всемирное тяготение Ньютона. Впервые провозгласил ее Роджер Котс в своем предисловии к «Principia», которое он издавал при жизни Ньютона. Согласно Котсу, только опыт научает нас, что

* М а к л о р е н. Сообщения об открытиях Ньютона.

все тела тяготеют друг к другу. Никаким иным путем мы не узнали бы, что они протяженны, подвижны или тверды. Следовательно, мы имеем полное право рассматривать и тяготение столько же существенным свойством материи, как и протяженность, подвижность или непроницаемость.

И когда ньютоновская философия завоевала себе твердую почву в Европе, то господствующим сделалось скорее мнение Котса, нежели самого Ньютона, пока наконец не появилась теория Бошковича, согласно которой материя есть собрание математических точек, одаренных каждая способностью притягивать или отталкивать другие по определенным неизменным законам. В его мире материя непротяженна, и соприкосновение невозможно. Однако он не забыл наделить свои математические точки инерцией. В этом некоторые из новейших представителей его школы усматривали, что он «еще не заходил так далеко, как зашли совсем новые воззрения на «материю» как просто на выражение модусов или проявлений «силы»*.

Но если оставить на время в стороне вопрос о развитии научных идей и сосредоточить все свое внимание на расширении границ науки, то мы увидим, что было в высшей степени важно, чтобы Ньютонов метод был распространен на все отрасли науки, к которым он приложим, что нужно было еще исследовать силы, с какими тела действуют одно на другое, прежде чем пытаться объяснить, *как* сила передается. Всего более было бы подходящим исключительно заняться первой частью задачи тем, которые вторую часть считали совершенно ненужной.

И вот Кавендиш, Кулон и Пуассон, основатели точной науки об электричестве и магнетизме, откинув в сторону старые представления о «магнитных истечениях» и об «электрических атмосферах», выдвинутые в минувшем столетии, обратили все свое внимание на определение закона силы, согласно которому наэлектризованные и намагниченные тела взаимно притягивались или отталкивались. Таким путем были открыты истинные законы этих действий, и это было сделано исследователями, которые никогда не сомневались, что действие происходит на расстоянии, без посредства какой-либо среды, и которые посмотрели бы на открытие подобной среды скорее как на осложнение, чем как на уяснение несомненных явлений притяжений.

* М-с Соммервилль. «Saturday Review», Febr. 13, 1869.

Теперь мы подошли к великому открытию Эрстедом связи между электричеством и магнетизмом. Эрстед нашел, что электрический ток действует на магнитный полюс, но что он не притягивает и не отталкивает его, а заставляет его двигаться вокруг тока. Он выразил это, говоря, что «столкновение электричеств действует вращающим образом».

Самым очевидным выводом из этого нового факта было то, что действие тока на магнит не есть сила тяги или толчка, но вращающая сила, и, сообразно этому, многие умы погрузились в размышления об эфирных вихрях и потоках, кружащихся вокруг тока.

Но Ампер, благодаря сочетанию в его лице виртуозного математика с гениальным экспериментатором, впервые доказал, что два электрических тока действуют друг на друга, и затем анализировал это действие и нашел равнодействующую системы толкающих и тянущих сил между элементами этих токов.

Однако Амперова формула, в сравнении с Ньютоновым законом тяготения, крайне сложна, и было немало попыток сделать ее более простой.

Я не хочу обременять вас разбором попыток к улучшению этой математической формулы. Обратимся лучше к самостоятельному методу изысканий, которым пользовался Фарадей в своих исследованиях по электричеству и магнетизму,— исследованиях, которые Фарадей производил в Королевском институте и которые сделали этот институт одной из самых почтенных обителей науки.

Едва ли кто работал более сознательно и систематично, напрягая все свои умственные силы, нежели это делал Фарадей с самого начала своей ученой карьеры. Но в то время как общее направление научного метода состояло в приложении идей математики и астрономии к каждому новому исследованию поочередно, обстоятельства, как известно, сложились для Фарадея так, что он не мог приобрести познаний в математике, а его сведения в астрономии были почерпнуты главным образом из книг.

Поэтому-то хотя он и питал глубокое уважение к великому открытию Ньютона, но смотрел на тяготение как на своего рода священную тайну, которую он, не будучи астрономом, не имел права ни отрицать, ни подвергать сомнению, и его долгом было веровать в нее в той форме, в какой она была вручена ему. Но такая слепая вера не-

способна была побудить его объяснять новые явления путем непосредственного притяжения.

Сверх того, трактаты Пуассона и Ампера были облечены в такую математическую форму, что извлечь из них какую-либо пользу мог только тот, кто тщательно изучал математику; но весьма сомнительно, чтобы таким занятиям мог предаваться человек в зрелые годы.

Итак, Фарадей при всей своей проницательности, при всей своей преданности науке, при всем своем искусстве в экспериментировании лишен был средств следовать направлению мыслей, приведенному французских ученых к блестящим результатам, и был вынужден уяснять себе явления посредством системы символов, более понятных ему, вместо того чтобы усвоить язык, который один господствовал до тех пор среди ученых.

Этими новыми понятиями были те силовые линии, расходящиеся во все стороны от наэлектризованных и намагниченных тел, которые Фарадей видел своим умственным оком так же ясно, как и те материальные тела, из которых они исходят.

Идея о силовых линиях и о методе их представления посредством железных опилок не была новостью. Их многократно наблюдали и математически изучали, как интересное и любопытное явление в науке. Но послушаем лучше самого Фарадея, как он знакомит своего читателя с методом, который в его руках превратился в такое могучее орудие исследования*.

«Экспериментатор, желающий изучать магнитную силу посредством проявления ее магнитными силовыми линиями, поступил бы произвольно и опрометчиво, отказавшись от самого ценного средства, от употребления железных опилок. Пользуясь ими, он может многие свойства этой силы, даже в сложных случаях, тотчас показать наглядно, может проследить глазом различные направления силовых линий и определить относительную полярность, может наблюдать, в каком направлении сила эта возрастает, в каком убывает, а в сложных системах может определить нейтральные точки, или места, где нет ни полярности, ни силы, даже если они встретятся внутри сильных магнитов. При их употреблении вероятные результаты видны сразу и могут быть получены ценные указания для будущих ведущих опытов».

* «Exp. Res.», 3284.

В этом опыте каждый кусочек опилок представляет собой небольшой магнит. Разноименные полюсы, принадлежащие различным зернышкам, притягивают друг друга и сцепляются один с другим, и множество опилок прилипает к полюсам магнита, т. е. к концам ряда опилок. Этим путем опилки, вместо того чтобы образовать на бумаге спутанную систему точек, располагаются рядами — зернышко к зернышку, пока не составятся из них длинные волокна, показывающие своим направлением расположение силовых линий в каждой части поля.

Математики не видят в этом опыте ничего, кроме способа обнять одним взглядом направления в различных местах равнодействующей двух сил, направленных к каждому полюсу магнита; несколько сложный результат простого закона силы.

Но Фарадей, идя целым рядом ступеней, замечательных как своей геометрической определенностью, так и своим умозрительным остроумием, сообщил этой концепции силовых линий ясность и точность, далеко оставляющие за собой ясность и точность, каковые математикам удалось сообщить своим формулам.

Во-первых, силовые линии Фарадея не должно рассматривать в отдельности, они образуют у него систему, расположенную в пространстве определенным образом — так, что число линий, проходящих сквозь площадь, например, в один квадратный дюйм, дает напряжение силы, действующей сквозь эту площадь. Таким образом становится возможным численное определение силовых линий. Сила магнитного полюса измеряется числом линий, из него выходящих; *электротоническое* состояние цепи измеряется числом линий, сквозь нее проходящих.

Во-вторых, каждая индивидуальная линия имеет непрерывное существование в пространстве и во времени. Когда кусок стали делается магнитом или когда электрический ток начинает течь, то возникающие силовые линии не остаются каждая на своем собственном месте, но по мере возрастания силы внутри магнита или тока появляются новые линии и постепенно распространяются вовне, так что вся система разворачивается изнутри, подобно Ньютоновым кольцам в нашем первом опыте. Таким образом каждая силовая линия сохраняет свое тождество в

течение всего своего существования, хотя и ее вид и размеры могут до некоторой степени изменяться.

У меня нет времени описывать методы, посредством которых каждый вопрос, относящийся к силам, действующим на магниты, или на токи, или к индукции токов в проводящих цепях, может быть решен рассмотрением силовых линий Фарадея. В этих случаях они никогда не могут быть забыты. Руководясь этим новым символизмом, Фарадей с математической точностью развил целую теорию электромагнетизма языком, свободным от математических вычислений, которая приложима как к самым сложным, так и к простейшим случаям. Но Фарадей не остановился на этом. От концепции геометрических силовых линий он перешел к концепции физических силовых линий. Он заметил, что движение, которое стремится произвести магнитная или электрическая сила, несомненно таково, что стремится укоротить силовые линии и побуждает их раздвигаться в стороны. Таким образом, он открыл, что в среде имеет место некоторое состояние напряжений, проявляющееся в натяжении, подобном натяжению веревки, в направлении силовых линий, соединенном с давлением во всех направлениях, к ним перпендикулярных.

Такова эта новая концепция действия на расстоянии, сводящая его к явлению такого же рода, как и действие на расстоянии, вызываемое натяжением веревки и давлением стержня. Когда мускулы нашего тела приводятся в возбуждение стимулом, который мы способны прилагать к ним некоторым, неизвестным нам путем, то волокна стремятся укорачиваться и в то же время раздвигаться в стороны. В мускуле появляется состояние напряжения, и орган приходит в движение. Но такое объяснение мускульного действия далеко не полно. В нем ничего не говорится о причине возбуждения состояния напряжения, в нем не исследуются и силы сцепления, позволяющие мускулам выдерживать это напряжение. Тем не менее тот простой факт, что вместо одного действия, относительно которого нам известны только причина и эффект на расстоянии, подставляется другого рода действие, непрерывно распространяющееся вдоль некоторой материальной субстанции, — уже один этот факт побуждает нас принять его как действительный вклад в наши познания о механике живых организмов.

По той же причине и фарадеевскую концепцию состояния напряжения в электромагнитном поле мы можем рассматривать как метод объяснения действия на расстоянии посредством непрерывной передачи сил, хотя мы и не знаем, как это состояние напряжения возбуждается.

Но одно из самых плодотворных открытий Фарадея, открытие магнитного вращения поляризованного света, позволяет нам сделать еще один шаг вперед. Это явление, если разложить его на простейшие элементы, можно описать так: из двух световых лучей с круговой поляризацией, совершенно сходных по конфигурации, но вращающихся в противоположные стороны, тот распространяется с большей скоростью, который вращается в одном направлении с электричеством намагничивающего тока.

Отсюда следует, как это показал сэр В. Томсон посредством строго динамических суждений, что среда, находящаяся под действием магнитной силы, должна находиться в состоянии вращения, т. е. что малые участки среды, которые можно назвать молекулярными вихрями, вращаются каждый вокруг своей оси, причем направление этой оси совпадает с направлением магнитной силы.

Здесь, следовательно, мы находим объяснение стремлению магнитных силовых линий раздвигаться в стороны и укорачиваться. Это есть следствие центробежной силы молекулярных вихрей.

Способ, которым действует электродвижущая сила, возбуждая и прекращая вихри, более неясен, хотя вообще и согласен с принципами динамики.

Итак, мы нашли, что электромагнитная среда, если она существует, совершает разного рода работу. Мы видели также, что магнетизм имеет тесную связь со светом, и мы знаем, что существует теория света, предполагающая, что он состоит в колебаниях среды. В каком же отношении находится эта светоносная среда к нашей электромагнитной среде?

К счастью, имеются электромагнитные измерения, на основании которых, при посредстве принципов динамики, можно вычислить скорость распространения малых магнитных возмущений в предполагаемой электромагнитной среде.

Эта скорость, согласно различным опытам, весьма велика, от 288 до 314 миллионов метров в секунду. Скорость же света, согласно опытам Фуко, равна 298 миллионам

метров в секунду. В действительности различные определения той и другой скорости отличаются друг от друга больше, нежели вычисленная скорость света разнится от вычисленной скорости распространения малого электромагнитного возмущения. Но если светоносная и электромагнитная среды занимают одно и то же место и передают возмущение с одной и той же скоростью, то какое основание имеем мы считать их различными? Принимая их за одну и ту же среду, мы хотя бы избегаем упрека в наполнении пространства разного рода эфирами.

Кроме того, единственное электромагнитное возмущение, которое только и может распространяться в непроводящей среде, есть возмущение, поперечное к направлению распространения, совершенно сходное с тем, что мы знаем о возмущении, известном под именем света. Следовательно, можно сказать, что и свет есть электромагнитное возмущение в непроводящей среде. Если мы допустим это, то электромагнитная теория света будет во всех отношениях согласна с волновой теорией и труды Томаса Юнга и Френеля будут утверждены на более прочном основании, чем когда-либо, если мы объединим их с трудами Кавендиша и Кулона при помощи связующего звена слитых воедино учений о свете и электричестве — великого Фарадея открытия электромагнитного вращения света.

Обширные межпланетные и межзвездные пространства уже нельзя рассматривать как пустые места Вселенной. Мы находим их уже наполненными этой средой — наполненными так, что ничто не может удалить ее из самого маленького участка пространства или произвести легчайший разрыв в ее бесконечной непрерывности. Она простирается сплошь от звезды до звезды; и когда молекула водорода колеблется в созвездии Пса, среда воспринимает импульсы этих колебаний и, неся их по своему беспредельному лону в течение трех лет, прямым путем, в правильной последовательности и полным счетом передает их в спекроскоп м-ра Гютгинса, в Tulse-Hill'e.

Но среда имеет и другие функции, и в ней имеют место и другие процессы, кроме переноса света от человека к человеку и от одного мира к другому и кроме доказательства в пользу очевидности абсолютного единства в отношении меры и числа во Вселенной. Мельчайшие части этой среды могут иметь, кроме колебательных движений, еще и вращательные, причем оси вращения и представ-

ляют собой те силовые магнитные линии, которые без разрыва непрерывности простираются в области, недоступные ни одному глазу, и которые, действуя на наши магниты, повествуют нам на языке, еще неразгаданном, о том, что происходит в таинственном мире элементарных явлений от минуты до минуты и от века до века.

И не следует смотреть на эти линии как на чисто математические абстракции. Это — направления, в которых среда испытывает натяжение, подобное натяжению веревки, или, лучше сказать, подобное натяжению собственных наших мускулов. Натяжение среды в направлении силы земного магнетизма составляет у нас один гран веса на 8 кв. футов. В некоторых опытах Джоуля среда испытывала натяжение в 200 фунтов на кв. дюйм.

Но, в силу той же самой упругости, которая делает эту среду способной передавать световые колебания, она способна также действовать наподобие пружины. Надлежащим образом вращающаяся, она испытывает натяжение, отличное от магнитного, — натяжение, благодаря которому она толкает противоположно наэлектризованные тела навстречу одно другому, производит действия на другом конце телеграфных проволок и, если напряжение ее достаточно велико, ведет к разрыву и к взрыву, называемому молнией.

Таковы некоторые из уже открытых свойств того, что часто называли пустотой, или ничем. Они вынуждают нас смотреть на разного рода действия на расстоянии как на действия между смежными частями непрерывного вещества. Будет ли эта новая точка зрения по своему существу объяснением или же она будет усложнением, — решение этого вопроса я оставляю на усмотрение философов.

Фарадей

(Майкл Фарадей родился 22 сентября 1791 г., умер 25 августа 1867 г.)

В этом номере «Nature» мы предлагаем подписчикам первую статью из задуманной нами серии «Портретов выдающихся ученых».

Первым портретом является портрет Фарадея, гравированный на стали Джинсом по фотографии Воткинса. Имевшие счастье знать Фарадея лучше всего оценят искусство художника — он поистине превзошел самого себя, так как гравюра более жизненна, чем фотография. Мы не могли не поместить здесь портрета, в котором так ярко выражена прекрасная простота, свойственная Фарадею. Здесь нет никакого позирования!

Нет необходимости сопровождать этот портрет воспоминаниями о Фарадее. Бенс Джонс, Тиндаль и Гладстон любовно рассказывали уже историю его полной величия и простоты жизни, которая озаряла и еще долго будет озарять своим блеском английскую науку. Их книги донесли историю его жизни до миллионов людей. Нет также никакой необходимости в объяснении причин того, что мы начали нашу серию с портрета Фарадея. Всякий признает справедливость нашего выбора.

Но в высшей степени необходимо, как раз в настоящее время, обратить особое внимание на те уроки, которые можно извлечь из жизни Фарадея. И мы счастливы, что можем это сделать в то время, как заседает наш научный конгресс и еще не умолкли отклики на вступительную речь председателя Британской ассоциации содействия прогрессу науки.

Мы прежде всего рассматриваем Фарадея как наиболее полезный и одновременно наиболее благородный тип ученого. Тот факт, что Фарадей существовал, делает более великой и сильной всю нацию, и нация была бы еще более великой и сильной, если бы среди нас было бы больше Фарадеев. Профессор Вильямсон в своей замечательной речи называет наше время «многозначительным».

И действительно, вопрос о современном состоянии науки и о путях ее усовершенствования больше чем когда бы то ни было занимает сейчас умы людей; в настоящее время все соглашается с тем, что это — дело всей нации, и более того, дело, имеющее фундаментальное значение. Каково же современное состояние английской науки? Состояние это таково, что в то время как растет число профессоров, растет число студентов, вводится практическое обучение и увеличивается количество учебников, растет количество и повышается квалификация лекторов-популяризаторов и авторов популярных научных книг, — творческая исследовательская работа, источник благосостояния нации, падает.

Польза, которую ученый как таковой приносит нации, измеряется количеством новых знаний, которыми он ее обогащает. С этой точки зрения вся нация как целое и оценивает достижения науки, и на этом покоится национальная репутация Фарадея. Пусть нация знает, в чем мы сейчас действительно нуждаемся: нам нужны еще Фарадеи, другими словами, нужны люди, работающие над созданием новых знаний.

Приятно слышать это пожелание выраженным столь ясно в президентской речи:

«Для дела продвижения науки, во-первых, необходимо достаточное число высококвалифицированных работников. Во-вторых, нужно поместить их в условия, наиболее благоприятные для их плодотворной деятельности. Необходимо отыскать наиболее подходящих для этого молодых людей и подготовить их к этой работе. Я знаю один действительно эффективный путь для отыскания наиболее одаренных природой юношей. Этот способ заключается в систематизации и развитии врожденных данных, случайно одновременно встречающихся у отдельных людей, и в предоставлении этим юношам возможности выдвинуться из массы.



Майкл Фарадей

«Когда исследователи найдены, необходимо поместить их в наиболее благоприятные для их успешной деятельности условия.

«Первым и основным условием для этого является поддержание и поощрение их жажды к приобретению знаний. Они не должны ограничиваться общими познаниями, приобретенными в своей науке, а должны углублять и расширять их, получая более полные и точные знания ее учений и методов. Одним словом, они должны теперь учиться больше, чем во время своего первоначального обучения.

«Они должны жить своей работой и не отвлекать своей энергии для других целей; они должны чувствовать себя обеспеченными от нужды на случай болезни или в старости. Им нужно дать способных и хорошо обученных ассистентов для помощи при исследовательских работах и предоставить им здания, аппаратуру и материалы, которые могут им понадобиться для успешного ведения этих исследований.

«Поэтому в той системе, которую мы бы считали желательной, должна быть создана обстановка, благоприятствующая поддержанию и развитию в исследователях истинной жажды знания; им следует предоставить постоянные средства к существованию, достаточные для того, чтобы чувствовать себя обеспеченными и заниматься только научной работой, но недостаточные для нейтрализации стимула к дальнейшим усилиям. В то же время эти средства должны позволить им воспользоваться всем необходимым содействием соответственно их потребностям и соответственно уметь использовать это содействие».

Будет ли предложенный доктором Вильямсоном план иметь тот успех, на который он надеется,— является вопросом второстепенным; важно то, что сейчас полностью признается необходимость такого плана.

Все сделанные нами до сих пор замечания были подсказаны той пользой, которую принес Фарадей. Нужно надеяться, что его благородная, простая и лишенная драматизма жизнь будет так же долго жить в памяти людей, как и обессмертившие его имя открытия. В нем не было жажды одобрения толпы, не было зависти к работе других ученых, не было отклонений от любимой, поставленной перед собой цели — «работать, заканчивать, опубликовывать».

«Его сердечная простота, его искренность, его горячая любовь к истине, его товарищеский интерес ко всем успехам и его искреннее восхищение всеми открытиями других ученых, его природная скромность в отношении собственных открытий, благородство его души, независимой и смелой,— все это вместе придавало образу знаменитого физика несравненное очарование».

Таков его портрет, набросанный Дюма, который является сам человеком такого же рода. Все признают справедливость этого портрета. Могут ли ученые найти более благородный образец, чтобы строить по нему свою собственную жизнь! Более того, если бы его примеру следовало больше людей, то разве мы не слышали бы реже о людях, не оправдавших «блестящих обещаний» своей юности, успокоившихся благодаря «жалованью», или благодаря «приложениям науки», или благодаря преимуществам, связанным с популяризацией чужих работ? Разве мы не слышали бы реже, что исследовательская работа — это

один обман и что все попытки помочь ей приводят к использованию общественных средств в личных целях?

В заключение мы должны определить место, которое Фарадей занимает в общей истории науки; это совсем не легко. Еще слишком жива в памяти внешняя форма, в которую выливалась его научная деятельность, чтобы можно было правильно сравнивать Фарадея с другими великими людьми, к которым мы должны его причислить.

Всякий великий человек является единственным в своем роде. В историческом шествии ученых у каждого из них своя определенная задача и свое определенное место. Некоторые могут выдвинуться, приспособляя изложение науки к изменяющемуся восприятию каждого поколения ученых, но прямая их задача не столько дидактика или педагогика (т. е. не обучение фразам, с помощью которых мы убеждаем сами себя, что понимаем ту или иную науку), сколько задача, сводящаяся к созданию живого контакта с двумя главными источниками умственного роста: с творцами науки, личное влияние которых на расширение умственного горизонта ничем не заменимо, и с теми материальными предметами, которые впервые были осмыслены благодаря их трудам.

Фарадей является и навсегда останется творцом того общего учения об электромагнетизме, которое рассматривает с единой точки зрения все явления, изучавшиеся прежде в отдельности, не говоря уже о тех явлениях, которые открыл сам Фарадей, следуя своему убеждению о единстве всей науки.

Основные явления, т. е. электрические и магнитные притяжения и отталкивания, электрический ток и его действие, были открыты до Фарадея. Затем пришли Кавендиш, Кулон и Пуассон; они следовали по пути, намеченному Ньютоном, и, сосредоточив свои исследования главным образом на силах, действующих между телами, обосновали математические теории электрических и магнитных сил. Затем Эрстед открыл основной факт существования электромагнитной силы, а Ампер исследовал математические законы механического взаимодействия между электрическими токами.

Таким образом, область науки об электромагнетизме была уже очень велика, когда Фарадей начал свою научную деятельность. Эта область была настолько обширна, что охватить одним взглядом все ее отдельные части мож-

но было только при таком размахе мысли, для которого требовалась специальная подготовка. И вот мы видим Фарадея, стремящегося в первую очередь извлечь из каждого из известных источников электрического действия все те явления, которые этот источник может дать. Установив таким образом единство природы всех электрических явлений, он поставил себе вторую задачу — создать такую концепцию процесса электризации, электрического действия, которая охватывала бы все эти явления. Для этой цели необходимо было прежде всего отделаться от всех тех паразитарных представлений, которые так легко связываются с каждым научным термином и придают ему ряд самых разнообразных толкований за счет того прямого содержания, которое данным словом обозначается. Поэтому Фарадей постарался отнять у таких терминов, как «электрический флюид», «ток» и «притяжение», всякое другое значение, кроме того, которое подтверждается самим явлением; вместе с тем он изобрел новые термины, как, например, «электролиз», «электрод», «диэлектрический» и т. д., которые не вызывают у нас никаких понятий, кроме тех, которые вытекают из самого определения.

Он поставил себе задачей исследовать факты, идеи и научную терминологию электромагнетизма и в результате перестроил эту отрасль науки по совершенно новому методу.

Старый и популярный термин «электрический флюид», который, как мы надеемся, навсегда изгнан в область газетных фельетонов, в свое время фиксировал внимание людей на тех специальных частях тел, в которых предполагалось наличие этого флюида.

Фарадей же, создав термин «диэлектрический», заставил нас обратить внимание на процессы, совершающиеся в воздухе или в другой среде между наэлектризованными телами.

Нет надобности умножать число примеров этого рода. Термины «силовое поле», «силовые линии», «индукция» и т. д. — достаточно характерные примеры. Все они иллюстрируют общие принципы роста науки в той ее особой форме, представителем которой является Фарадей. Мы находим у него сначала тщательное наблюдение избранных явлений, затем исследование получившихся в результате его представлений и образование, в случае необходимости, новых понятий и затем, наконец, изобретение науч-

ных терминов, приспособленных для обсуждения явлений в свете новых идей.

То высокое место, которое мы отводим Фарадею в истории развития науки об электромагнетизме, может быть сочтут неоправданным ввиду того, что электромагнетизм есть точная наука, во многих своих отраслях вылившаяся в математическую форму еще до Фарадея, тогда, когда Фарадей по профессии не был математиком. В его описаниях мы не находим тех дифференциальных и интегральных уравнений, которые многим кажутся подлинной сущностью точной науки. Откройте труды Пуассона или Ампера, вышедшие до Фарадея, или Вебера и Неймана, которые работали после него, и вы увидите, что каждая страница пестрит формулами, ни одну из которых Фарадей не понял бы. Все допускают, что Фарадей сделал несколько крупных открытий, но если оставить в стороне эти открытия, то можно ли ставить его научный метод на такую высоту, не роняя математического авторитета вышеназванных выдающихся ученых?

Верно, конечно, что нельзя углубленно заниматься какой-либо точной наукой, не зная ее математики. Однако мы не думаем, что выкладки и формулы, которые математики считают столь полезными, представляют собой всю математику в целом; дифференциальное и интегральное исчисления — точно часть математики.

Геометрия положения представляет собой пример математической науки, созданной без помощи дифференциального и интегрального исчислений. Фарадеевы линии сил занимают в науке об электромагнетизме такое же положение, как пучки линий в геометрии положения. Они позволяют нам воспроизвести точный образ предмета, о котором мы рассуждаем. Способ, которым Фарадей использовал свою идею силовых линий, чтобы координировать явления электромагнитной индукции*, доказывает,

* Для того чтобы оценить интенсивность умственной мощи Фарадея, самое лучшее ознакомиться с первой и второй сериями его «Исследований» и сопоставить их с тем, что говорится в «Жизни Фарадея» Бенса Джонса. Этот автор излагает историю первого открытия Фарадея и окончательного опубликования результатов исследований. Затем можно проследить за ходом науки об электромагнетизме после Фарадея. Никаких новых идей не добавилось, но зато была установлена правильность и научная ценность каждой из идей Фарадея.

что он был математиком высокого порядка — одним из тех, у кого математики будущего могут черпать ценные и благотворные методы.

Прогресс точных наук зависит от открытия и развития соответствующих точных идей, с помощью которых мы можем мысленно воспроизводить факты, с одной стороны, достаточно общие, чтобы охватывать все частные случаи, а с другой стороны, достаточно точные, чтобы гарантировать правильность тех дедукций, которые можно вывести из этих идей математическим путем.

Начиная от прямой линии Эвклида и кончая силовыми линиями Фарадея — таков был всегда характер идей, которые двигали науку, а свободно оперируя идеями динамики и геометрии, мы сможем продвинуть науку еще дальше. Математические расчеты нужны нам для сличения результатов применения идей с измерениями тех величин, с которыми мы оперируем в наших опытах. Наука об электричестве в настоящее время находится в той стадии, в которой такие измерения и расчеты имеют наиважнейшее значение. Вероятно, мы не знаем даже названия той науки, которая вырастет из ныне собираемых нами материалов к тому времени, когда появится следующий за Фарадеем великий ум.

Молекулы

(Речь, произнесенная на съезде
Британской ассоциации в Бредфорде)

Атом есть тело, которое нельзя расщепить пополам. Молекула есть мельчайшая возможная часть какого-либо определенного вещества. Никто никогда не видал и не держал в руках отдельной молекулы. Следовательно, наука о молекулах есть одна из тех областей знания, которые имеют дело с вещами, невидимыми и невоспринимаемыми нашими чувствами, и которые недоступны прямому опыту.

Человеческий ум в недоумении останавливался перед многими трудными вопросами. Бесконечно ли пространство, и если да, то в каком смысле? Бесконечен ли по своему протяжению материальный мир и все ли места внутри того, что протяженно, также наполнены материей? Существуют ли атомы или материя делима до бесконечности?

Исследование этого рода вопросов продолжается с тех пор, как человек начал мыслить, и пред каждым из нас, как только мы вступаем в обладание нашими способностями, те же самые старые вопросы встают во всей своей свежести и новизне. Они являются существенной частью науки XIX столетия нашей эры, как были существенной частью науки за пять столетий до нее.

Мы мало знаем о том, какова была организация науки во Фракии двадцать два столетия тому назад, а также мало знаем и о способах, какие были тогда в ходу для под-

держания интереса к исследованиям в области физики. Однако в те дни был человек, посвятивший свою жизнь научным исследованиям с жаром, достойным самых знаменитейших членов Британской ассоциации; а уроки, в которых Демокрит развивает атомистическую теорию своим соотечественникам из Абдеры, реализовали не только в форме золотых мыслей, но и в форме золотых талантов сумму, едва ли возможную даже в Америке.

Другому выдающемуся философу, Анаксагору, который более известен миру как учитель Сократа, мы обязаны самыми важными услугами, какие только были оказаны атомистической теории,— услугами, которые, после создания ее Демокритом, оставалось еще сделать. В самом деле, Анаксагор предложил теорию, в такой мере противоречащую атомистической теории Демокрита, что истинность или ложность одной теории вела за собой ложность или истинность другой. Вопрос о существовании или несуществовании атомов нельзя представить вам сегодня с большей ясностью, чем он дан в теориях этих двух философов.

Возьмем некоторую часть вещества, каплю воды например, и будем наблюдать ее свойства. Подобно всякой другой части вещества, когда-либо нами виденной, она делима. Разделим ее пополам, и каждая часть удержит все свойства первоначальной капли, между прочим и свойство делиться на части. Части будут подобны целому во всех отношениях, кроме абсолютных размеров.

Будем повторять процесс деления до тех пор, пока отдельные части воды не сделаются настолько малы, что мы уже не в состоянии будем различать их или оперировать с ними. Пока мы не сомневаемся в том, что этот процесс деления можно было бы вести и дальше, если бы наши чувства были острее и наши инструменты тоньше. До сих пор все было определено, но теперь возникает вопрос: можно ли продолжать процесс деления как угодно далеко?

Согласно Демокриту и атомистической школе, мы должны ответить отрицательно. После некоторого числа делений капля разделится на части, из которых каждая уже неспособна к дальнейшему делению. Следовательно, мы должны, в воображении, дойти до атома, который, как буквально значит это слово, не может быть разделен пополам. Такова атомистическая доктрина Демокрита, Эпикура, Лукреция и, я могу прибавить,— вашего лектора.

Согласно Анаксагору, с другой стороны, части, на которые мы делим каплю, во всех отношениях подобны целой капле, так как природа вещества остается та же, каковы бы ни были размеры тела. Следовательно, если делима целая капля, то и ее части делимы, как бы малы они ни были, и так без конца.

Сущность учения Анаксагора — в том, что части тела во всех отношениях подобны целому. Поэтому его называли учением о гомеомерии. Анаксагор, без сомнения, не утверждает этого о частях органических тел, каковы человек и животные, но он утверждает, что неорганические вещества, которые кажутся нам однородными, действительно таковы и что универсальный опыт человечества свидетельствует, что всякое материальное тело, без исключения, делимо.

Таким образом, учение об атомах и учение об однородности противоречат одно другому.

Перейдем теперь к молекулам. Молекула — слово новое. Мы не встречаем его в «Словаре» Джонсона. Идеи, им воплощаемые, принадлежат современной химии.

Водяная капля — возвращаемся к нашему первому примеру — может быть разделена на определенное число и не более, частей, подобных друг другу. Каждую из них современный химик называет молекулой воды. Это — никоим образом не атом, ибо она содержит два различных вещества, кислород и водород, и известным процессом молекулу можно действительно разделить на две части — одну, состоящую из кислорода, другую — из водорода. Согласно принятому учению, в каждой молекуле воды находятся две молекулы водорода и одна молекула кислорода. Будут ли это последние атомы или нет, решить я не берусь.

Теперь мы видим, что такое молекула, в отличие от атома.

Молекула вещества есть небольшое тело, такое, что если, с одной стороны, несколько подобных молекул соединить вместе, то они образуют некоторую массу этого самого вещества, а, с другой стороны, если некоторую часть этой молекулы удалить, то она уже неспособна будет вместе с другими молекулами, с которыми сделано то же самое, составить массу первоначального вещества.

Всякое вещество, простое или сложное, имеет свою молекулу. Если ее разделить, то ее части будут молекулами

вещества или веществ, отличных от того вещества, частью которого была целая молекула. Атом, если такая вещь существует, должен быть молекулой элементарного вещества. Так как, следовательно, не всякая молекула есть атом, но всякий атом есть молекула, я буду пользоваться словом «молекула» как более общим термином.

Я не имею намерения утомлять вас изложением учений современной химии относительно молекул различных веществ. Меня заставляет обращаться к вам не специальный, а общий интерес молекулярной науки.

Мы находим, что теперь, как и в дни самых ранних умозрений о природе, все физические исследования сходятся к одному и тому же пункту и каждый исследователь, когда взор его направляется в туманную область, куда влечет его путь открытий, сообразно остроте своего зрения, видит перед собой призрак того же самого вопроса.

Для одного атом есть материальная точка, одаренная и окруженная потенциальными силами. Другой этого одеяния сил не усматривает, а видит только крепчайшую брону простой непроницаемости.

Но хотя иные мыслители, видя, что призрак уходит от них в сокровеннейшее святилище непостижимо малого, признавались, что вопрос им не по силам, и хотя философы всегда увещевали друг друга направлять свой ум к более полезной и достижимой цели, но каждое поколение, от самого раннего рассвета науки до наших дней, всегда посвящало должную долю своих интеллектуальных сил на разрешение вопроса о последнем атоме.

Сегодня мы задались целью описать некоторые исследования по молекулярной физике и, в частности, сообщить вам кое-какие определенные сведения о самих молекулах. Старая атомистическая теория как в изложении Лукреция, так и в форме, приданной ей в новое время, утверждает, что молекулы всех тел находятся в движении, даже тогда, когда само тело, по-видимому, находится в покое. Эти движения молекул в случае твердых тел заключены в столь тесные пределы, что даже нашими лучшими микроскопами мы не можем открыть, что они изменяют свое положение. В жидкостях же и газах молекулы не заключены ни в капле определенные пределы и могут совершать свои движения по всей массе, даже когда эта масса и не возмущена никаким видимым движением.

Этот процесс так называемой диффузии, происходящий в газах и в жидкостях и даже в некоторых твердых телах, может быть подвергнут опытному исследованию и дает одно из самых убедительных доказательств движения молекул.

Новые успехи молекулярной физики начались с изучения механического эффекта столкновений этих движущихся молекул, когда они ударяются о твердое тело. Само собой разумеется, эти летящие молекулы должны ударяться о всякое тело, находящееся среди них, и эти постоянно повторяющиеся удары составляют, согласно нашей теории, единственную причину того, что называется давлением воздуха и других газов.

По-видимому, впервые начал догадываться об этом Даниил Бернулли, но для проверки теории у него не было тех средств, какие имеем теперь мы. Ту же теорию позднее и независимо выставил Лесаж из Женевы; однако он занялся главным образом объяснением тяготения посредством ударов атомов. Затем Герапат в своей «Математической физике», появившейся в 1847 г., сделал уже более обширное приложение теории к газам, а д-р Джоуль, об отсутствии которого на нашем собрании все мы сожалеем, вычислил действительную скорость молекул водорода.

Дальнейшее развитие теории, как вообще полагают, началось с мемуара Кренига, в котором, насколько я могу судить, нет никаких улучшений того, что было сделано раньше. Однако, как кажется, он обратил на этот предмет внимание профессора Клаузиуса, и вот ему-то мы и обязаны большей частью того, что с тех пор было сделано.

Все мы знаем, что воздух или какой-нибудь другой газ, заключенный в сосуде, давит на стенки сосуда и на поверхность всякого тела, находящегося внутри сосуда. По кинетической теории, это давление своим происхождением всецело обязано молекулам, ударяющимся о поверхность и таким путем сообщаящим ей ряд импульсов, которые следуют один за другим с такой быстротой, что производимый ими эффект нельзя отличить от эффекта непрерывного давления.

Если дана скорость молекул и число их изменяется, то, так как каждая молекула в среднем ударяет в стенки сосуда одинаковое число раз, сообщая импульсы одинаковой величины, каждая будет вносить одинаковую долю общего давления. Следовательно, давление в сосуде дан-

ных размеров пропорционально числу молекул в нем, т. е. количеству содержащегося в нем газа.

Это — полное динамическое объяснение того факта, открытого Робертом Бойлем, что давление воздуха пропорционально его плотности. Оно показывает также, что из различных частей газа, нагнетаемого в сосуд, каждая производит свою долю давления независимо от остальных, причем все равно, будут ли это части одного и того же газа или нет.

Допустим теперь, что скорость молекул увеличивается. Каждая молекула будет теперь ударять в стенки сосуда большее число раз в секунду, и, кроме того, импульс каждого удара будет также возрастать в той же самой пропорции, так что доля давления, вносимая каждой молекулой, будет изменяться как квадрат скорости. Но увеличение скорости соответствует, по нашей теории, возрастанию температуры, и таким путем мы можем объяснить действие нагревания газа, а также закон, открытый Шарлем, что пропорциональное расширение всех газов для данных пределов изменения температуры одинаково.

Динамическая теория говорит нам также и о том, что происходит, когда молекулы различных масс сталкиваются друг с другом. Большие массы будут двигаться медленнее меньших, так что, в среднем, каждая молекула, большая или малая, будет иметь ту же энергию движения.

Доказательство этой динамической теоремы — и в этом я заявляю свои права на приоритет — в последнее время получило широкое развитие и усовершенствование благодаря трудам д-ра Людвига Больцмана. Самое важное следствие, из нее вытекающее, состоит в том, что кубический сантиметр любого газа при постоянных температуре и давлении содержит одинаковое число молекул. Таково динамическое истолкование закона Гей-Люссака об эквивалентных объемах газа. Но теперь мы должны обратиться к частностям и вычислить действительную скорость молекулы водорода.

Кубический сантиметр водорода, при температуре таяния льда и под давлением одной атмосферы, весит 0,00008954 грамма. Мы должны найти, с какой скоростью эта малая масса должна двигаться (вся ли вместе или ее отдельные молекулы — все равно) так, чтобы произвести

наблюдаемое давление на стенки кубического сантиметра. Это вычисление в первый раз сделано было д-ром Джоулем и дало 1859 метров в секунду. Такое значение мы привыкли считать большой скоростью. Оно больше любой скорости, получаемой в артиллерийской практике. Скорость других газов меньше, как видно из табл. на стр. 84, но во всех случаях она очень велика по сравнению со скоростью пули.

Обратимся теперь к молекулам воздуха, которые летают в этом зале по всем направлениям со скоростью почти семнадцати миль в минуту.

Если бы все эти молекулы летели в одном и том же направлении, они образовали бы ветер, дующий со скоростью семнадцати миль в минуту; приблизительно с такой скоростью дует ветер, вылетающий из жерла пушки. Как же, следовательно, вы и я можем стоять здесь? Единственно потому, что молекулы летят по различным направлениям, так что те, которые ударяют нас сзади, позволяют нам выдерживать бурю, которая бьет в нас спереди. В самом деле, если бы эта молекулярная бомбардировка приостановилась хотя бы на мгновение, наши бы вены вздулись, дыхание прекратилось и мы буквально погибли бы. Но молекулы ударяют не только о нас или о стены комнаты. Воспомним, что число их громадно и что они летят по всевозможным направлениям, и мы поймем, что они не могут избежать соударений. Как только две молекулы столкнулись, их пути изменяются и обе они летят в новых направлениях. Таким образом каждая молекула постоянно изменяет свой путь, так что, несмотря на большую скорость, пройдет еще много времени, пока они очутятся далеко от той точки, из которой начали двигаться.

У меня здесь сосуд, содержащий аммиак. Аммиак — это газ, который легко узнается по своему запаху. Его молекулы движутся со скоростью 600 метров в секунду, так что если бы их полет не прерывался столкновениями с молекулами воздуха этого зала, всякий, даже в самой дальней галерее, почувствовал бы запах аммиака прежде, чем я успел бы произнести название этого газа. Но вместо этого каждая молекула аммиака, сталкиваясь то и дело с молекулами воздуха, идет то одним, то другим путем, и, подобно зайцу, который всегда делает петли, хотя и проходит большой путь, но мало подвигается вперед. Как бы

то ни было, но запах аммиака уже начинает чувствоваться в некотором отдалении от склянки. Газ будет распространяться в воздухе, хотя и медленно, и если бы могли закупорить все отверстия этого зала, чтобы сделать его непроницаемым для воздуха, и оставить так на несколько недель, то аммиак равномерно смешался бы с воздухом во всех частях зала.

Это свойство газов, в силу которого один газ может диффундировать в другой, было впервые замечено Пристли. Дальтон показал, что оно совершенно независимо от какого-либо химического действия диффундирующих газов. Грэхем, специально занимавшийся исследованиями этих явлений, которые, по-видимому, проливают свет на молекулярные движения, тщательно изучил диффузию и впервые получил результаты, на основании которых может быть вычислена скорость диффузии.

Позднее скорость диффузии одного газа в другой была в высшей степени тщательно измерена профессором Лошмидтом в Вене.

Он помещал оба газа в две одинаковые вертикальные трубки так, чтобы более легкий газ находился выше тяжелого, чтобы избежать и образования потоков. Затем он открывал выдвижной клапан, чтобы сделать из двух трубок одну; приблизительно через час он закрывал клапан и определял, сколько одного газа перешло в другой.

Так как большинство газов невидимы, то, чтобы показать вам диффузию газов, я должен взять для этого два газа, аммиак и хлористоводородную кислоту, которые при смешивании дают твердый продукт. Аммиак, как более легкий, помещен над хлористоводородной кислотой, с слоем воздуха между ними; вы скоро увидите, что газы диффундируют один в другой сквозь этот воздушный слой и при смешивании образуют облачко белого дыма. Но во все время, пока длится процесс, нельзя открыть ни потоков, ни какого-либо видимого движения. Каждая часть сосуда кажется такой же спокойной, как банка с неподвижным в ней воздухом.

Согласно нашей теории, и в спокойном воздухе совершается такого же рода движение, как и в диффундирующих газах; разница только в том, что мы легче можем обнаружить движение молекул с места на место в том случае, когда они по природе отличны от тех, между которыми диффундируют.

Чтобы составить себе представление о том, что происходит с молекулами в спокойном воздухе, лучше всего наблюдать рой пчел, где каждая отдельная пчела бешено летает то туда, то сюда, между тем как целый рой либо остается на месте, либо медленно плывет в воздухе.

Иногда пчелиные рои бывают способны пролетать большие расстояния, и их хозяева, чтобы доказать свои права собственности, когда найдут их на чужой земле, посыпают рой пригоршней муки. Положим теперь, что мука, выпанная в летающий рой, окрасила только тех пчел, которые находились в это время в нижней половине роя, а на тех, которые оказались в верхней половине, мука не пала.

Если пчелы беспорядочно летают туда и сюда, то в верхнюю часть роя будет попадать посыпанных пчел все больше и больше, пока они не распределятся равномерно во всех частях роя. Причина этой «диффузии» не в том, что пчелы были отмечены мукой, но в том, что они перелетали с одного места на другое. Отметка мукой только позволяет нам узнавать известных пчел.

У нас нет никаких средств для отметки некоторого числа молекул воздуха, для того чтобы мы могли узнать их, когда они рассеются между другими молекулами, но мы можем сообщить им некоторые свойства, которые свидетельствовали бы нам об их диффузии.

Например, если горизонтальный слой воздуха движется горизонтально, то молекулы, распространяясь из этого слоя между молекулами, находящимися выше и ниже его, несут с собой свое горизонтальное движение и стремятся сообщить движение соседним слоям, между тем как молекулы, диффундирующие из соседних слоев в движущийся слой, стремятся остановить его движение. Это действие между слоями несколько похоже на действие двух шероховатых поверхностей, из которых одна скользит по другой и трется о нее. Это действие называется трением, когда оно имеет место между твердыми телами; в случае жидкостей оно называется внутренним трением, или вязкостью.

На деле это — также диффузия, только иного рода — боковая диффузия количества движения; величина ее может быть вычислена на основании данных, выведенных из наблюдений диффузии первого рода, диффузии вещества. Сравнительные значения вязкости различных газов были

определены Грэхемом в его исследованиях о распространении газов в длинных узких трубках, а их абсолютные значения были получены из опытов над колебаниями дисков Оскаром Мейером и мною.

Другой путь, которым мы можем проследить диффузию молекул в спокойном воздухе, состоит в нагревании верхнего слоя воздуха в сосуде и в наблюдении скорости, с какой эта теплота сообщается нижним слоям. На деле это — третий род диффузии — диффузия энергии; скорость, с какой она происходит, была вычислена на основании данных, выведенных из опытов над вязкостью, прежде чем были сделаны какие-нибудь прямые опыты над теплопроводностью. Профессору Стефану в Вене удалось недавно, при помощи весьма тонкого метода, определить теплопроводность воздуха и найти, как он нам сообщил, полное согласие с значением, предсказанным теорией.

Все эти три рода диффузии — диффузия материи, количества движения и энергии — производятся движением молекул. Чем больше скорость молекул и чем дальше они уходят, прежде чем пути их будут изменены соударением с другими молекулами, тем быстрее будет совершаться диффузия. Но скорость молекул нам уже известна, а следовательно, опытами над диффузией мы можем определить, как далеко в среднем молекула пролетает, не наталкиваясь на другую. Профессор Клаузиус в Бонне, впервые давший нам точные понятия об этих движениях молекул, называет это расстояние средним свободным путем молекулы. Пользуясь опытами над диффузией профессора Лопшмидта, я вычислил средний свободный путь молекул четырех хорошо известных газов. Среднее расстояние, пробегаемое молекулой от одного столкновения до другого, дано в приведенной таблице. Это — очень маленькое расстояние, совершенно неуловимое для нас даже в лучшие микроскопы. Грубо говоря, оно составляет около $\frac{1}{10}$ доли длины световой волны, величины, как вам известно, чрезвычайно малой. Само собой разумеется, время, употребляемое на такой малый путь столь быстролетными молекулами, весьма незначительно. Я вычислил, сколько соударений может совершиться в секунду. Числа даны в таблице (на стр. 83) и выражаются тысячами миллионов. Нет ничего удивительного, что быстрейшая молекула так медленно подвигается вперед, если ее ход совершенно изменяется тысячи миллионов раз в секунду.

Все три рода диффузии имеют место и в жидкостях, но соотношение между скоростями, с которыми они совершаются, не так просто, как в случае газов. Динамическая теория жидкостей не так хорошо изучена, как динамическая теория газов, но главное различие между газом и жидкостью состоит, по-видимому, в том, что в газе каждая молекула большую часть времени употребляет на прохождение свободного пути и только весьма малую долю времени тратит на встречи с другими молекулами, между тем как в жидкостях для молекулы свободный путь едва ли возможен и она всегда находится в состоянии тесной встречи с другими молекулами.

Таблица диффузии

Единица измерения: $\frac{(\text{сантиметр})^2}{\text{секунда}}$

(Знаки: Н — водород; О — кислород; СО — окись углерода; СО₂ — углекислота)

	Вычисленное	Наблюденное	
Н и О	0,7086	0,7214	Диффузия материи по наблюдениям Лашмидта
Н и СО	0,6519	0,6422	
Н и СО ₂	0,5575	0,5558	
О и СО	0,1807	0,1802	
О и СО ₂	0,1427	0,1409	
СО и СО ₂	0,1386	0,1405	
Н	1,2990	1,49	Диффузия количества движения (Грэхем и Мейер)
О	0,1884	0,213	
СО	0,1748	0,212	
СО ₂	0,1087	0,117	
Воздух	—	0,256	Диффузия температуры по наблюдениям Стефана
Медь	—	1,077	
Железо	—	0,183	
Тростниковый сахар в воде	0,0000035	}	(Фойт)
Диффузия за день	0,3144		
Соль в воде	0,00000116		

Следовательно, в жидкости диффузия движения от одной молекулы к другой совершается гораздо быстрее, нежели диффузия самих молекул; по той же самой причине в тесной толпе гораздо легче переслать письмо, передавая

его из рук в руки, нежели поручить передачу особому посылному, которому пришлось бы прокладывать себе путь в толпе. У меня здесь банка, нижняя часть которой содержит раствор медного купороса, в верхней же находится чистая вода. Она стояла здесь с пятницы, и вы видите, как мало синей жидкости перешло путем диффузии вверх. Скорость диффузии раствора сахара тщательно наблюдал Фойт. Сравнивая результаты его наблюдений с результатами, полученными Лошмидтом в его опытах над газами, мы находим, что столько же диффундирует газа в течение секунды, сколько диффундирует жидкости в день.

Таким образом, скорость диффузии количества движения в жидкостях меньше, чем в газах, но никоим образом не в том же отношении. Для того чтобы то же самое количество движения прекратилось в воде, нужно почти вдесятеро больше времени, чем для прекращения его в воздухе, как вы увидите это из того, что произойдет, когда я встряхну эти банки, из которых одна содержит воду, а другая воздух. Но разница между скоростями, с какими распространяется возрастание температуры в жидкостях и в газах, еще меньше.

В твердых телах молекулы все еще находятся в движении, но их движения ограничены весьма тесными пределами. Вследствие этого диффузия материи в твердых телах не имеет места, хотя диффузия движения и теплоты совершается в них весьма свободно. Тем не менее некоторые жидкости диффундируют в твердых коллоидах, каковы студень и камедь, а водород может распространяться в железе и в палладии.

За неимением времени мы можем только упомянуть об удивительнейшем молекулярном движении, называемом электролизом. Здесь имеется электрический ток, проходящий в подкисленной воде и выделяющий кислород на одном электроде, а водород на другом. В пространстве между ними вода совершенно спокойна; и, однако, в ней идут два противоположных течения кислорода и водорода. Физической теорией этого процесса занимался Клаузиус и дал основания к воззрению, что в обыкновенной воде молекулы не только движутся, но иногда и ударяются друг о друга с такой силой, что кислород и водород этих молекул отделяются друг от друга и толкуются в этой сумятице, отыскивая себе товарищей, которые диссоциированы подобным же путем. В обыкновенной воде этот

обмен в целом не производит никакого заметного эффекта; но, как только начнет действовать электродвижущая сила, она оказывает направляющее влияние на несвязанные молекулы и заставляет каждую двигаться к ее электроду, до того момента, когда, столкнувшись со свободной молекулой противоположного рода, она опять вступает в более или менее прочное соединение с нею, пока не наступит новая диссоциация вследствие другого соударения. Следовательно, электролиз есть своего рода диффузия, которой помогает электродвижущая сила.

Другая ветвь молекулярной науки относится к обмену молекулами между жидкостью и газом. Сюда принадлежит теория испарения и конденсации, в которой рассматриваемый газ есть пар некоторой жидкости, а также теория поглощения газа различными жидкостями. Исследования д-ра Эндрюса о связи между жидким и газообразным состояниями показали нам, что хотя положения, изложенные в наших элементарных учебниках, и выражены так гладко, что они кажутся почти самоочевидными, но их истинная интерпретация может заключать в себе начало настолько глубокое, что, пока оно не выяснено, никто даже и не подозревает, чтобы здесь оставалось еще что-либо неоткрытым.

Затем есть еще кое-какие поля, с которых собраны данные молекулярной науки. Последние результаты мы можем разделить на три разряда, соответственно полноте наших познаний в этом направлении (см. табл. на стр. 84),

К первому разряду принадлежат относительные массы молекул различных газов и их скорости в метрах в секунду. Эти данные получены из опытов над давлением и плотностью газов и известны с высокой степенью точности.

Во втором разряде мы должны поместить относительные размеры молекул различных газов, длину их средних свободных путей и число соударений в секунду. Эти количества выведены из опытов над тремя родами диффузии. Полученные значения нужно рассматривать как грубые приближения, до тех пор, пока методы экспериментирования не будут значительно усовершенствованы.

Есть еще ряд величин, которые мы должны отнести к третьему разряду, так как наше знание их не отличается ни такой точностью, как количественные результаты первого разряда, ни такой степенью приближения, как вели-

Таблица молекулярных данных

		Водо- род	Кис- лород	Окись угле- рода	Угле- кисло- та
I разряд	Масса молекулы (водо- род-1)	1	16	14	22
	Средняя скорость в мет- рах в секунду при 0° С	1859	465	497	396
II разряд	Средний свободный путь в десятиллионных до- лях миллиметра	965	560	482	379
	Число соударений в се- кунду в миллионах	17750	7646	9489	9720
III разряд	Диаметры в десятимил- лионных долях милли- метра	5,8	7,6	8,3	9,3
	Массы (единица-10 ⁻²² мил- лиграмма)	46	736	644	1012

чины второго разряда, а представляет собой просто вероятные догадки. Таковы абсолютные массы молекул, их абсолютные диаметры и число молекул в кубическом сантиметре. Относительные массы различных молекул известны нам с большой точностью, а их относительные диаметры известны нам приблизительно. Отсюда мы можем вывести относительные плотности самих молекул. Здесь мы на твердой почве.

Большое сопротивление, оказываемое жидкостями сжатию, делает вероятным, что их молекулы должны находиться почти на таком расстоянии друг от друга, на каком две молекулы того же самого вещества в газообразной форме действуют одна на другую во время их встречи. Это предположение было подвергнуто проверке Лоренцом Мейером, который сравнивал плотности различных жидкостей с вычисленными относительными плотностями молекул их паров и нашел замечательное соответствие между ними.

Недавно Лопшидт вывел из динамической теории следующее замечательное соотношение: объем газа относится к совокупному объему всех содержащихся в нем молекул, как средний свободный путь молекулы относится к одной восьмой ее диаметра.

Допуская, что объем вещества, приведенного в жидкое состояние, не слишком превышает совокупный объем мо-

лекул, мы получим из этой пропорции диаметр молекулы. Этим путем Лошмидт в 1865 г. впервые вычислил диаметр молекулы. Независимо от него и от других Стони в 1868 г. и сэр В. Томсон в 1870 г. обнародовали результаты подобного же рода, причем Томсон пришел к своим результатам не только этим путем, но и из соображений, основанных на рассмотрении толщины мыльных пузырей и электрических свойств металлов.

Согласно таблице, вычисленной мной на основании данных Лошмидта, размеры молекул водорода таковы, что два миллиона их, положенные рядом, заняли бы всего миллиметр, а миллион миллионов миллионов их весили бы больше четырех, но меньше пяти граммов.

В кубическом сантиметре газа при постоянных давлениях и температуре содержится около 19 миллионов миллионов миллионов молекул. Все эти числа, относящиеся к третьему разряду, как это само собой понятно, в настоящее время нужно рассматривать просто как основанные на догадках. Чтобы обеспечить себе некоторое доверие к числам, таким путем полученным, нужно было бы сравнить между собой большее число независимых данных, нежели до сего времени получено, и показать, что они ведут к согласным друг с другом результатам.

До сих пор мы рассматривали науку о молекулах как исследование естественных явлений. Но если прямая цель всякого научного труда — раскрывать тайны природы, то он имеет и иное действие, не менее ценное, на ум исследователя. Научная работа делает его обладателем методов, и к изобретению их ничто, кроме научной работы, не могло бы его привести; это ставит его в положение, с которого многие области природы, помимо тех, которые он изучал, являются перед ним в новом свете.

Изучение молекул привело к развитию особого метода, и этот метод также раскрыл новые аспекты природы.

Лукреций, желая дать нам картину движения атомов, советует нам взглянуть на солнечный луч, прорезывающий темную комнату (то же орудие исследования, посредством которого д-р Тиндаль делает для нас видимой пыль, которую мы вдыхаем), и наблюдать, как пылинки пляшут в луче друг вокруг друга во всех направлениях. Это движение видимых пылинок, рассказывает он нам, есть результат гораздо более сложного движения невидимых атомов, толкающих эти пылинки. В своих мечтах о приро-

де, рассказывал нам Теннисон, «я видел сверкающие потоки атомов, видел, как они все разрушали в беспредельной пустыне, летая и сталкиваясь друг с другом, и вновь и вновь изменяя навеки порядок вещей во Вселенной». И нет ничего удивительного, что он пытался разорвать оковы рока, заставляя свои атомы отклоняться от их путей, в произвольные моменты и в произвольных местах, надевая их таким образом чем-то вроде иррациональной свободной воли, которая, по его материалистической теории, только и может объяснить ту силу произвольного действия, которую мы сознаем в себе.

Пока мы имеем дело с двумя молекулами и имеем в своем распоряжении все данные, мы можем вычислить результаты их встречи, но когда приходится иметь дело с миллионами молекул, из которых каждая испытывает миллионы соударений в секунду, то сложность задачи, по-видимому, исключает всякую надежду на точное решение ее.

Потому-то современные атомисты приняли метод, который, как я думаю, является совершенной новостью в математической физике, хотя им давно уже пользуются в статистике. Когда членам секции приходится работать над отчетами о переписи или над какими-нибудь другими документами, содержащими числовые данные экономической или социальной науки, то они начинают с того, что распределяют все население на группы по возрастам, по доходам, по воспитанию, по вероисповеданию либо по уголовным преступлениям. Число индивидуумов настолько велико, что изображать историю каждого в отдельности было бы невозможно, и потому, чтобы привести труд в границы человеческой возможности, сосредоточивают внимание на малом числе искусственных групп. Изменяющееся число индивидуумов в каждой группе, а не изменяющееся состояние каждого индивидуума — таковы начальные данные, исходя из которых они ведут свою работу.

Но, конечно, это не единственный метод изучения природы человека. Мы можем наблюдать поведение отдельного человека и сравнивать его с тем поведением, которого мы могли бы ожидать от него, согласно наилучшей из существующих теорий, принимая во внимание его прежний характер и настоящие обстоятельства. Те, кто пользуется этим методом, стараются усовершенствовать свое знание элементов человеческой природы совершенно та-

ким же путем, каким астроном исправляет элементы планеты, сравнивая ее настоящее положение с выведенным из полученных элементов. Изучение человеческой природы родителями и воспитателями, историками и государственными деятелями нужно, следовательно, отличать от изучения ее статистиками и составителями таблиц и теми из государственных деятелей, которые верят в цифры, Один метод можно назвать историческим, другой — статистическим.

Уравнения динамики вполне выражают законы исторического метода в приложении к материи, но приложение этих уравнений требует совершенного знания всех данных. Самая малая часть материи, которую мы можем подвергнуть опыту, состоит из миллионов молекул, из которых ни одна, взятая отдельно, никогда не может стать для нас ощутимой. Следовательно, мы никогда не будем в состоянии узнать действительного движения какой-либо из этих молекул; поэтому мы вынуждены отказаться от строго исторического метода и обратиться к статистическому методу изучения обширных групп молекул.

Данные статистического метода в приложении к молекулярной физике суть суммы большого числа молекулярных количеств. Изучая соотношения между количествами этого рода, мы встречаемся с закономерностью нового рода, с закономерностью средних значений, и мы можем надеяться, что ее совершенно достаточно для всяких практических целей; однако она не может иметь никаких притязаний на абсолютную точность, свойственную законам абстрактной динамики.

Таким образом, молекулярная физика учит нас, что наши опыты никогда не могут нам дать чего-либо, что было бы больше статистического знания, и что ни один закон, выведенный этим путем, не может претендовать на абсолютную точность. Но когда от рассмотрения наших опытов мы переходим к созерцанию самих молекул, мы оставляем мир случайностей и перемен и вступаем в область, где все достоверно и неизменно.

Молекулы образованы по одному и тому же типу с точностью, какой мы не находим в ощущаемых нами свойствах тел, ими образуемых. Во-первых, масса каждой отдельной молекулы и все другие ее свойства абсолютно неизменны. Во-вторых, свойства всех молекул одного рода абсолютно тождественны.

Рассмотрим свойства двоякого рода молекул — молекул кислорода и молекул водорода.

Мы можем достать образчики кислорода из весьма различных источников — из воздуха, из воды, из скал, какой угодно геологической эпохи. История этих образчиков была весьма различна, и, если бы в продолжение тысячелетий разница условий могла бы произвести различие в свойствах, эти образчики кислорода обнаружили бы это.

Подобным же образом мы можем добыть водород из воды, из каменного угля или, как сделал Грэхем, из метеоритного железа. Возьмем два литра какого угодно образчика водорода, соединим их в точности с одним литром какого-либо образчика кислорода, и мы получим в точности два литра водяного пара.

Если бы в продолжение всей предшествовавшей истории каждого из этих образчиков — все равно был ли он заключен в скале, или плавал в океане, или носился в неизвестных пространствах вместе с метеоритами, — если бы изменения в молекулах случились бы, то эти соотношения не могли бы сохраниться.

Но у нас есть другой и совершенно отличный способ сравнения свойств молекул. Молекула, хотя и неразрушимая, не есть твердое тело, но способна к внутренним движениям, и, когда эти движения возбуждены в ней, она испускает лучи, и длина волны этих лучей служит мерой времени колебания молекулы.

При помощи спектроскопа длины световых волн разного рода можно сравнивать между собой до одной десятичной доли. Таким путем убедились, что не только молекулы каких угодно образчиков водорода в наших лабораториях имеют один и тот же ряд периодов колебаний, но что свет с тем же самым рядом периодов колебаний испускается Солнцем и неподвижными звездами.

Таким образом мы убеждаемся, что молекулы такой же точно природы, как у нашего водорода, существуют и в отдаленных пространствах или по крайней мере существовали, когда посылался свет, посредством которого мы их видим.

Из сравнения размеров зданий египтян с сооружениями греков оказывается, что они имеют общую меру. Следовательно, если бы даже ни один из писателей древнего мира не отметил бы того факта, что оба народа употребляли мерой длины один и тот же локоть, мы могли бы доказать это самими постройками. Таким образом, мы вправе утверж-

дать, что некогда материальная мера длины была перенесена из одной страны в другую либо что обе страны получили свои меры из одного и того же источника.

Но на небе посредством света, и только посредством одного света, мы открываем звезды, столь отдаленные от других, что никогда никакая материальная вещь не могла перейти от одной к другой. И, однако, этот свет, который служит для нас единственным свидетельством существования этих отдаленных миров, учит нас, что каждый из них создан из молекул того же самого рода, как и те, которые мы встречаем на Земле. Молекула водорода, например, находится ли она на Сириусе или на Арктуре, совершает свои колебания в точности в то же самое время.

Следовательно, каждая молекула во Вселенной носит на себе печать меры и числа, настолько же ясную, как и метр парижских архивов или как и двойной царский локоть карнакского храма.

Никакая теория эволюции не может объяснить однообразности молекул, ибо эволюция означает непрерывные изменения, а молекула не может ни расти, ни уменьшаться, ни возникать, ни разрушаться.

Ни один из естественных процессов, с тех пор, как существует природа, не привел ни к малейшему различию в свойствах какой-либо молекулы. Следовательно, мы не можем приписать существование молекул и тождество их свойств какой-либо «естественной» причине.

С другой стороны, полное тождество каждой молекулы с любой молекулой того же рода придает им, как метко выразился сэр Джон Гершель, характерные признаки фабричных изделий и исключает мысль о возможности их вечного существования и самопроизвольного происхождения.

Итак, мы подошли, строго научным путем, весьма близко к той точке, дальше которой наука идти не может, не потому, что ей запрещено исследовать внутренний механизм молекулы, которую она не в состоянии разложить, или исследовать организм, который она не может сложить, а потому, что история вопроса убеждает нас в том, что, с одной стороны, молекулы должны создаваться, а с другой, что они не могут создаваться ни одним из тех процессов, которые мы считаем естественными. Наука не может рассуждать о сотворении материи из ничего. Допустив, что материя должна создаваться, так как она не может быть вечной, мы достигли предела наших мыслительных способностей.

Лишь рассматривая ту форму, в которой фактически существует материя, а не материю саму по себе, наш разум может за что-то ухватиться.

То, что материя как таковая непременно должна иметь определенные свойства — существовать в пространстве, двигаться и сохранять движение и т. п., — истины того порядка, которые метафизики считают неизбежными. Мы можем использовать эти истины для целей дедукции, но они ничего не дают для спекуляции об их происхождении.

Однако то, что в каждой молекуле водорода имеется точное количество материи и не больше, это факт совсем иного свойства. Мы имеем здесь определенное распределение материи — расстановку вещества — по выражению д-ра Чальмерса, и мы легко можем себе представить иную расстановку.

Например, форма и размеры планетных орбит — не следствие каких-либо законов природы, а следствие определенной расстановки вещества. То же относится и к размерам Земли, определившим эталон так называемой метрической системы. Но научное значение этих астрономических и земных величин много ниже фундаментальных величин, образующих молекулярную систему. Как мы знаем, естественные процессы изменяют и, в конце концов, разрушают вес, порядок и размеры как Земли, так и всей солнечной системы. Но если случались и вновь могут случиться катастрофы, если старые системы могут разрушаться и на их развалинах могут возникать новые системы, то молекулы, из которых эти системы построены, неразрушимы и неизменны — это краеугольные камни материальной Вселенной.

Сейчас молекулы также неизменны по своему числу, по своим размерам и по весу, как и в то время, когда они были сотворены. Из этой неизменяемости их свойств мы можем заключить, что стремление к точности измерений, к правдивости в суждениях и к справедливости в поступках, почитаемых нами, как благороднейшие черты человека, присущи нам потому, что они представляют сущность образа того, кто сотворил не только небо и Землю, но и материю, из которой они составлены.

О «Соотношении физических сил» Грова

Очень редки те случаи, когда человек, не посвятивший себя исключительно научному труду, вносит в науку такой ценный вклад, как это сделал сэр В. Р. Гров. Его азотнокислый элемент, изобретенный им не случайно, но на основании хода мышления, который в 1839 г. был столь же нов, сколько и оригинален, является серьезным вкладом в науку. Ценность этого вклада доказывается тем, что батарея Грова дожила до наших дней и что ею ежедневно пользуются в любой лаборатории, как наиболее мощным генератором электрических токов. Между тем сотни других элементов, изобретенных после Грова, давно вышли из употребления и оказались побежденными в борьбе за научное существование.

Газовый элемент, хотя и не имеет такого же практического значения, очень интересен в научном отношении, а собрание научных статей, которое лежит перед нами, невольно заставляет задуматься о тех важных результатах, которые получились бы для науки, если бы такой мощный ум был неизменно направлен с нераздельной энергией на какой-нибудь крупный вопрос физики.

Кардинальное место в опубликованном томе принадлежит той статье, по которой назван весь том; это — статья о соотношении физических сил. Взгляды, изложенные здесь, были впервые оглашены в докладе, сделанном в Лондонском институте в январе 1842 г.; затем этот доклад был отпечатан Институтом, более пространно развит в ряде

лекций в 1843 г. и опубликован в извлечениях в «Litterary Gazette». Эта статья имеет особую ценность; свою основную задачу в качестве послания научному миру она выполнила уже давно, но в памяти лиц, изучающих ход человеческой мысли, она сохранится навсегда, как один из документов, на которых строится история науки.

Не одни только открытия и регистрация их учеными обществами движут науку. Действительный очаг науки — не томы научных трудов, но живой ум человека, и для того чтобы продвигать науку, нужно направить человеческую мысль в научное русло. Это можно сделать различными способами: огласив какое-либо открытие, отстаивая парадоксальную идею, или изобретая научную фразу, или изложив систему доктрины. Дело историка науки — определить силу и направление импульса, приданного человеческому мышлению одним из перечисленных средств. Однако для развития науки требуется в каждую данную эпоху не только, чтобы люди мыслили вообще, но чтобы они концентрировали свои мысли на той части обширного поля науки, которая в данное время требует разработки. В истории науки мы часто видим, что такое действие производят книги, наводящие на размышление; они в точной, удобопонятной и ясной форме излагают те ведущие идеи, которые уже зародились в умах деятелей науки и привели их к тем или иным открытиям, но еще не получили определенной формулировки.

В первой половине настоящего столетия то, что мы называем «началом сохранения энергии», было неизвестно даже по имени, но оно «уже отбрасывало свою тень на настоящее из глубин будущего». И те, которые в большей или меньшей степени понимали дух времени, более или менее отчетливо высказывали свой взгляд на ту форму, которую готовит себе наука. Некоторые из них обращались к передовым деятелям науки и пользовались ученой фразеологией, другие же искали более широкой аудитории и выражались языком, который был ей понятен. Книга г-жи Соммервилль «Connection of the Physical Sciences» вышла в 1834 г. и к 1849 г. выдержала восемь изданий. Этот факт ярко говорит о том, что уже тогда существовало широко распространенное стремление к охвату науки о физике в ее целом. Если мы будем изучать эту книгу, чтобы установить характер взаимной связи между отдельными физическими дисциплинами, то мы прежде всего придем к заключению,

что эта связь создана искусством переплетчика, который сброшюровал в один том массу информации о каждой из них. Мы видим только ряд изложений различных дисциплин, но о взаимной их связи не говорится почти ничего. То немногое, что говорится, имеет отношение к взаимной зависимости различных научных дисциплин друг от друга, поскольку знакомство с элементами одной необходимо для успешной работы с другой. Так, например, физическая астрономия требует знакомства с динамикой, а практик-астроном должен иметь известное понятие об оптике, чтобы понимать законы атмосферного преломления и уметь устанавливать телескопы. Затем мы видим, что науки пользуются одним общим методом, а именно: математическим анализом, так что аналитические методы, разработанные для одной науки, часто бывают полезны для другой. Таким образом, единство, которое оттеняет книга г-жи Соммервилль, есть единство научного метода, а не единство процессов природы.

Труд сэра В. Грова можно смело назвать популярной книгой, так как он выдержал уже шесть изданий. Он свидетельствует, таким образом, не только о ходе мышления автора, но и является показателем состояния научной мысли обширного круга читателей; он не обладает той общепонятностью и легкостью изложения, которыми отличается сочинение г-жи Соммервилль; пользоваться им как научным руководством нельзя, не годится он и как пособие для подготовки к дискуссиям на научные темы. Назначение книги — доказать, что различные формы энергии, существующие в природе, могут преобразовываться одна в другую, причем одна исчезает при появлении другой. Говоря о соотношении физических сил, автор подразумевает именно это явление, и весь труд посвящен изложению данного факта, причем каждая из физических сил по очереди рассматривается как исходный пункт, служащий источником для всех остальных сил.

Мы очень сожалеем, что не располагаем первыми отзывами об этой книге, по которым можно было бы судить о приеме, оказанном доктрине автора литературными и научными кругами того времени. Нет никакого сомнения, что этот труд сыграл большую роль в смысле оформления того, что называется «научным мнением», т. е. того, чем люди науки руководствуются, когда им приходится высказать какое-либо суждение о науке, с которой они незнакомы.

Многие вены в труде автора, которые шли вразрез с научным мнением того времени и поэтому вызвали возражения, с тех пор сами стали частью научного мнения, и новому поколению людей науки старые возражения уже кажутся непонятными.

Труд Гельмгольца «О сохранении силы», опубликованный в 1847 г., несомненно означает большой шаг вперед на пути науки, но непосредственное влияние этого труда сказалось на узком круге ученых специалистов и на общественном мнении отразилось слабо.

Многочисленные труды Майера богаты материалом, который может возбудить интерес к вопросу о преобразовании энергии даже среди людей, не посвящавших себя исключительно науке, но в Англии эти труды были долго неизвестны, и непосредственное их влияние в период их выхода в свет было незначительно даже в Германии.

Быстрое развитие термодинамики и других областей применения принципа сохранения энергии в начале второй половины текущего столетия принадлежит уже более поздней эпохе истории науки, чем та, о которой мы говорим.

Для правильной оценки труда сэра В. Грова мы должны смотреть на него как на орудие, с помощью которого некоторые научные идеи получили широкое распространение, так как они были изложены языком, не допускавшим неправильного понимания и вместе с тем достаточно привычным широким кругам читателей, чтобы не отпугнуть тех, кто приходит в ужас, когда литературные условности приносятся в жертву точности формулировки.

Интересно проследить за той эволюцией, благодаря которой слова обычного обихода постоянно дифференцируются и приобретают научную точность. Творцы науки о динамике выбрали из обычного лексикона несколько слов, обозначающих действие и результаты действия, как, например, сила, мощность, действие, импульс, удар, напряжение, деформация, работа, энергия и т. д. В их умах накопился ряд идей, требовавших терминов для их обозначения, и они воспользовались вышеуказанными словами, как выражающими их идеи наилучшим образом. Однако эквивалентные термины Force, Vis, Kraft оказались наиболее удобными, и мы видим, что ими начали пользоваться для выражения почти всех идей, перечисленных выше; остальные же термины, которые могли бы оказать свою долю пользы, выпали из научного лексикона и сохранили

только свое более или менее неопределенное значение в качестве слов обычного обихода.

Мы знаем термины *Vis acceleratrix*, *Vis motrix*, *Vis viva*, *Vis mortua* и даже *Vis inertiae*, и в каждом из них, кроме второго и четвертого, слово *Vis* имеет значение, радикально отличное от того значения, которое придают ему в других выражениях¹.

Если научный труд читается научно подготовленным читателем, то точное усвоение эпитетов, придающих слову *Vis* различные значения, не вызовет путаницы понятий, но когда науку хотят популяризировать, то без реформы и перестройки научной номенклатуры по лучшим, более совершенным принципам идеи науки в популярном изложении окажутся гораздо более смутными, чем идеи так называемого «популярного невежества».

Те физические силы, о соотношении которых говорится в рассматриваемом нами труде, суть: движение, тепло, электричество, свет, магнетизм, химическое сродство и «другие виды сил». Согласно определению силы, как оно дано в трактатах о динамике за последние два века, ни один из перечисленных видов, кроме, может быть, химического сродства, не может быть признан за силу. Установившееся определение гласит: «Сила есть то, что вызывает изменение движения, и мерилом ее служит вызванное изменение движения».

Сам Ньютон напоминает нам, что сила существует только до тех пор, пока она действует; ее действие может сохраниться, но сама сила как таковая по существу явление преходящее. Поэтому если мы встречаем такие термины, как «сохранение силы», «постоянство силы» и т. п., то нужно полагать, что слово «сила» применяется здесь в смысле, радикально отличающемся от того, который придают ему люди науки, начиная от Ньютона. Во всех этих случаях, так же как и в термине «физические силы» в при-

¹ *Vis acceleratrix* — ускорительная сила, термин введенный Ньютоном в 1 кн. «Начал», определение VII. Согласно определению Ньютона, величина ускорительной силы измеряется скоростью, производимой силой в течение заданного времени. По современной терминологии *vis acceleratrix* соответствует напряжению поля в данной точке. *Vis motrix* — движущая сила, есть то, что мы теперь называем механической силой, — также введена Ньютоном (кн. 1, определение VIII). *Vis viva* — живая сила, кинетическая энергия — термин Лейбница. *Vis mortua* — мертвая сила, сила давления — термин Лейбница. — *Прим. ред.*

менении к теплу, мы можем теперь, благодаря д-ру Томасу Юнгу, пользоваться словом «энергия» вместо слова «сила», так как ввиду научного определения этого слова как «способности производить работу» оно применимо во всех указанных случаях. Путаница распространилась даже на метафорическое применение слова «сила». Так, например, можно вполне правильно говорить метафорически о силе общественного мнения, оказывающей свое действие на государственного человека в виде известного давления, потому что здесь мы имеем дело с действием, стремящимся вызвать движение в известном направлении. Но когда мы говорим о «вооруженных силах королевы», то это так же ненаучно, как говорить о «физических силах». В своих заключительных заметках автор говорит о той путанице терминов, которая мешала ему излагать научные положения вследствие несовершенства научного лексикона. Он говорит, что «избежать этого затруднения невозможно без введения неологизмов; я недостаточно самонадеян, чтобы вводить их, и не имею достаточного авторитета, чтобы заставить их признать».

Такое признание, исходящее от большого мастера «изложения предмета», является весьма важным свидетельством необходимости изучения и специальной культуры научной терминологии. Сравнение многих отрывков разбираемого нами труда с соответствующим изложением в более новых книгах, хотя и гораздо менее значительных, доказывает, как много мы выиграли благодаря введению удачных неологизмов. То, что казалось таинственным и даже парадоксальным гиганту, работавшему с самым примитивным лексиконом, является трюизмом в глазах молодого поколения, законного наследника того дворца истины, для которого гигант доставил материалы.

Так, например, применение слова «масса» для обозначения количества вещества, определяемого количеством силы, необходимой для создания данного ускорения, поставило современных учащихся на совершенно другой уровень по сравнению с теми, кому приходилось расшифровывать термин *Vis inertiae*, комбинируя толкование *Vis* как силы и *inertiae* как бездеятельности. Равным образом слово «напряжение» является эквивалентом слов «действие» и «противодействие» и служит общим обозначением для давления, растяжения и т. д.; это слово избавит будущие поколения от множества затруднений. Различие меж-

ду обладанием энергией и фактом совершения работы, с которым мы теперь так освоились, вероятно избавило бы доктрину, изложенную в рассматриваемом нами труде, от многих возражений. Возражения эти касались утверждений, в которых создание одного вида энергии и сохранение другого вида трактовались так, как будто они являются операциями одного и того же рода. Мы читаем на стр. 163: «вольтова батарея, разлагая воду в вольтаметре, между тем как тот же самый ток одновременно применяется для образования (сохранения) электромагнита, тем не менее создает в вольтаметре эквивалент газа или разлагает эквивалент электролита соответственно каждому эквиваленту разложения в элементах батареи и дает те же отношения, если мы удалим электромагнит».

Здесь сохранение магнита есть нечто совершенно отличное от разложения электролита; первое является сохранением энергии, второе — выполнением работы. Это хорошо разъяснено в труде автора, но если бы он располагал соответствующей терминологией, то никогда не встретил бы возражений.

О динамическом доказательстве молекулярного строения тел

Когда какое-нибудь явление можно описать как частный случай какого-нибудь общего, приложимого к другим явлениям принципа, то говорят, что это явление получило объяснение. Однако объяснения бывают весьма различны в зависимости от степени общности примененного принципа. Так, человек, впервые заметивший действие выплеснутой на огонь воды, почувствовал некоторое умственное удовлетворение, обнаружив, что результаты всегда одинаковы и что они не зависят от какой-то временной и непостоянной антипатии между водой и огнем. Это — объяснение низшего порядка, в котором класс, к которому мы относим данное явление, состоит из других явлений, отличающихся от первого только местом и временем, но заключенный в нем принцип есть самый общий принцип, в котором место и время не входят в число условий, определяющих процесс природы. С другой стороны, когда физическое явление может быть полностью описано как изменение конфигурации и движения материальной системы, говорят, что мы имеем полное динамическое объяснение явления. Мы не можем представить себе ни необходимости, ни желательности, ни возможности дальнейшего объяснения, так как если мы знаем значение слов «конфигурация», «движение», «масса» и «сила», мы видим, что представляемые ими идеи настолько элементарны, что их нельзя объяснить ничем другим.

Явления, изучаемые химиками, — это в большинстве своем те явления, которые не получили полного динамического объяснения.

Было построено много диаграмм и моделей сложных молекул. Они являются свидетельством попыток химиков представить себе конфигурацию материальных систем при помощи геометрических соотношений, которыми можно иллюстрировать или объяснять химические явления. Ни один химик, однако, не видит в этих диаграммах ничего большего, чем символические изображения различных степеней связи между различными компонентами молекул.

С другой стороны, в астрономии масштабы конфигурации и движения небесных тел таковы, что мы можем обнаружить их непосредственным наблюдением. Ньютон доказал, что наблюдаемые движения указывают на постоянное стремление всех тел приближаться друг к другу, а установленное им учение о всемирном тяготении не только объясняет наблюдаемые движения нашей системы, но и позволяет вычислить движение системы, в которой астрономические элементы имели бы любую величину.

Переходя от астрономии к науке об электричестве, мы все еще можем наблюдать взаимное расположение и движение наэлектризованных тел и, строго следуя указанному Ньютоном пути, вывести отсюда величину сил взаимодействия этих тел.

Однако оказывается, что эти силы зависят от распределения того, что мы называем электричеством. То, что Гаусс называет *construirbar Vorstellung* (наглядное представление) о невидимом действии электричества, составляет предмет великих исканий в этой области.

Пытаясь распространить динамический метод на объяснение химических явлений, мы должны составить себе представление о расположении и движении некоторого числа материальных систем, из которых каждая настолько мала, что ее нельзя наблюдать непосредственно. Фактически, наблюдая внешние действия некоторого невидимого механизма, мы должны сделать заключение об его внутреннем действии.

Применявшийся обычно при таких исследованиях метод заключался в принятии некоторой гипотезы и в последующем расчете того, что должно произойти, если гипотеза справедлива. Если результаты расчетов совпадали с явлениями, то говорили, что гипотеза подтвердилась, во всяком

случае до тех пор, пока кто-нибудь не высказывал другой гипотезы, еще лучше согласующейся с явлениями.

Причиной того, что столь большое число наших физических теорий было построено с помощью метода гипотез, является отсутствие у ученых достаточно общей терминологии для выражения результатов своих выводов в их более ранней стадии.

Они были вынуждены, таким образом, оставить свои идеи в неопределенном и потому бесполезном для науки состоянии или представить их в такой форме, подробности которой можно получить лишь при неопозволительном применении фантазии.

Тем временем математики, руководимые инстинктом, заставляющим их накапливать для других продукты деятельности своего мышления, разработали, в наиболее общей форме, динамическую теорию материальной системы.

Из всех теорий строения тела, безусловно, наиболее вероятна та, которая утверждает лишь, что тела являются материальными системами, и предлагает выводить из наблюдаемых явлений лишь те заключения о состояниях и связях материальной системы, которые действительно вытекают из этих явлений.

Когда эти методы физических рассуждений будут соответствующим образом представлены и объяснены несколькими примерами, реже станут жалобы на слабость аргументации ученых, а индуктивный метод не будет больше высмеиваться как чисто гадательный.

Лишь небольшая часть теории строения тел сведена в настоящее время к точной дедукции из известных нам фактов. Чтобы вполне правильно вести научную работу посредством систематических опытов и точных демонстраций, требуется стратегическое искусство, на которое нельзя рассчитывать даже у людей, давших науке ряд оригинальных наблюдений и плодотворных предложений. Заслуга этих пионеров науки ничуть не умаляется тем, что, работая в неизвестной еще области, они в своем продвижении вперед зачастую отрывались от системы связей с уже установленной научной базой, являющейся единственной гарантией для непрерывного развития науки.

Изучая строение тел, мы с самого начала вынуждены иметь дело с частицами, которые мы не в состоянии наблюдать. Действительно, каковы бы ни были наши конечные заключения о молекулах и атомах, существуют экспе-

риментальные доказательства того, что тела могут быть разделены на столь малые частицы, что они не поддаются нашему восприятию.

Поэтому если мы будем помнить, что слово «частица» означает небольшую часть тела и не подразумевает гипотезы о конечной делимости тел, мы можем считать, что тело состоит из частиц и можем также утверждать, что в телах или частях тел измеримых размеров количество этих частиц чрезвычайно велико.

Ближайшей задачей является введение динамического метода в изучение материальной системы, состоящей из огромного количества частиц, для чего необходимо составить себе представление об их конфигурации и движении, а также о действующих на эти частицы силах. После этого на основании динамической теории можно сделать заключения о явлениях, доступных нашему наблюдению в видимых частях системы, хотя они и зависят от расположения и движения их невидимых частиц.

Необходимые в настоящем исследовании динамические принципы были развиты рядом основоположников динамики от Галилея и Ньютона до Лагранжа и Лапласа. Однако специальное приспособление этих принципов к молекулярным исследованиям является в значительной мере делом профессора Боннского университета Клаузиуса, новые работы которого, в дополнение к результатам его сложных вычислений, содержат новые динамические идеи; руководствуясь этим, я надеюсь без больших вычислений вывести ряд чрезвычайно важных заключений.

Уравнение Клаузиуса, на которое я хочу обратить сейчас ваше внимание, имеет следующую форму:

$$pV = \frac{2}{3} T - \frac{2}{3} \sum \sum \left(\frac{1}{2} Rr \right).$$

Здесь p означает давление газа, а V — объем заключающего его сосуда. Для случая газа при постоянной температуре произведение pV остается, согласно закону Бойля, почти постоянным для различных объемов и давлений. Этот член уравнения является произведением двух величин, из которых каждая может быть непосредственно измерена.

Вторая часть уравнения состоит из двух членов. Первый зависит от движения частиц, второй от сил, с которыми они друг на друга действуют,

Величина T есть кинетическая энергия системы, или, другими словами, та часть энергии, которая обусловлена движением частей системы.

Кинетическая энергия частицы равна половине произведения ее массы на квадрат ее скорости, а кинетическая энергия системы — сумме кинетических энергий ее частей.

Во втором члене r есть расстояние между каждыми двумя частицами, а R — их взаимное притяжение (если эта сила есть отталкивание или давление, то R нужно считать отрицательным).

Величина $\frac{1}{2}Rr$, или половина произведения притяжения на расстояние, на котором оно действует, названо Клаузиусом вириалом притяжения (в случаях давления или отталкивания вириал отрицателен).

Клаузиус первый указал на существенное значение этой величины и, дав ей особое название, значительно облегчил применение своего метода к изложению физики.

Вириал системы есть сумма вириалов каждой пары частиц этой системы. Это выражено двойной суммой $\Sigma\Sigma(\frac{1}{2}Rr)$, указывающей на то, что величина $\frac{1}{2}Rr$ должна быть найдена для каждой пары частиц, а затем результаты должны быть сложены.

Клаузиус вывел это уравнение чрезвычайно простым математическим способом, объяснением которого, однако, я не стану вас утруждать, так как мы сегодня не занимаемся математикой. Мы видим, впрочем, что он указывает на две причины, оказывающие влияние на давление газа на заключающий его сосуд: движение частиц, стремящееся повысить давление, и их взаимное притяжение, которое стремится понизить давление.

Поэтому мы можем приписать давление газа либо движению частиц, либо их взаимному отталкиванию.

Проверим с помощью этих результатов Клаузиуса теорию зависимости давления газа лишь от взаимного отталкивания частиц в предположении, что, когда газ помещен в покоящемся сосуде, частицы эти действительно находятся в покое.

В этом случае вириал должен быть отрицателен, и, так как, согласно закону Бойля, произведение давления на объем постоянно, вириал тоже должен быть постоянен, каков бы ни был объем одного и того же количества газа при постоянной температуре. Отсюда следует, что Rr — произ-

Ведение силы взаимного отталкивания двух частиц на расстояние между ними — должно быть постоянной величиной, или, другими словами, сила отталкивания должна быть обратно пропорциональна расстоянию. Но Ньютон показал невозможность такого закона для молекулярных сил, так как из него следовало бы, что действие отдаленных частей тела превышает действие соседних частей. Действительно, достаточно отметить, что при постоянном Rr каждая пара частиц должна обладать одинаковым вириалом, так что вириал системы должен быть пропорционален числу пар частиц ее, т. е. квадрату числа частиц, или, другими словами, квадрату количества находящегося в сосуде газа. Согласно этому закону, давление газа при одной и той же плотности не будет одинаково в различных сосудах, но в большом сосуде будет значительно больше, чем в маленьком, а на открытом воздухе будет больше, чем в любом сосуде.

Поэтому давление газа нельзя объяснить предположением наличия между частицами сил отталкивания.

Следовательно, оно должно целиком или частично зависеть от движения частиц.

Если предположить, что частицы совершенно не действуют друг на друга, то вириала не будет вовсе и уравнение сведется к виду

$$Vp = \frac{2}{3} T.$$

Если M — масса всего количества газа, а c — средняя квадратичная скорость частицы, мы можем написать уравнение

$$Vp = \frac{1}{3} Mc^2,$$

или — словами: произведение объема на давление равно одной трети массы, помноженной на средний квадрат скорости. Если мы теперь примем — позже мы это докажем независимым рассуждением, — что средний квадрат скорости зависит лишь от температуры, то это уравнение в точности представит закон Бойля.

Но обычно, как мы знаем, а особенно при низких температурах и больших плотностях, поведение газов отклоняется от закона Бойля. Посмотрим, не совместима ли с опытом отвергнутая нами в качестве действительного объяснения давления газа гипотеза о действующих между мо-

лекулами силах, если рассматривать ее как причину этого отклонения от закона Бойля.

Когда газ чрезвычайно разрежен, число частиц, находящихся на данном расстоянии от какой-нибудь из них, будет пропорционально плотности газа. Следовательно, вириал, обусловленный действием одной из частиц на остальные, будет изменяться пропорционально плотности, а общий вириал единицы объема будет изменяться пропорционально квадрату плотности.

Обозначив плотность через ρ и разделив обе части уравнения на V , получаем

$$p = \frac{1}{3} \rho c^2 - \frac{2}{3} A \rho^2,$$

где A — почти постоянно для малых плотностей.

Опыты Реньо показывают, что для большинства газов давление при увеличении плотности становится меньше вычисленной на основании закона Бойля величины. Следовательно, вириал должен быть положительным; другими словами, взаимодействие частиц является в основном притяжением, а уменьшение под его воздействием давления должно вначале почти точно соответствовать квадрату плотности.

С другой стороны, если давление все увеличивается, вещество приходит, наконец, в такое состояние, при котором огромное увеличение давления дает лишь очень незначительное увеличение плотности. Это указывает на то, что вириал стал отрицательным, или, другими словами, взаимодействие между частицами является в основном отталкиванием. Мы можем отсюда заключить, что взаимодействие между двумя частицами, находящимися на заметном расстоянии, совершенно неощутимо: по мере сближения частиц взаимодействие сперва проявляется как притяжение, достигающее некоторого максимума, затем уменьшающееся и превращающееся наконец в столь большое отталкивание, что никакая возможная сила не может свести к нулю расстояние между частицами.

Соотношение между давлением и плотностью, возникающее в результате такого взаимодействия частиц, принадлежит к этому типу.

При возрастании плотности от нуля давление почти целиком зависит вначале от движения частиц и поэтому изменяется почти в точности соответственно тому, как это

следует из закона Бойля. Но при дальнейшем возрастании плотности влияние взаимного притяжения частиц становится заметным, вследствие чего давление увеличивается медленнее, чем это следует по закону Бойля. При низкой температуре влияние притяжения может стать так велико, по сравнению с действием, вызванным движением, что давление, вместо того чтобы продолжать увеличиваться с повышением плотности, может достигнуть максимума и затем начать уменьшаться.

В конце концов, однако, поскольку среднее расстояние между частицами продолжает уменьшаться, действие отталкивания превысит действие притяжения и давление настолько увеличится, что не только превысит величину, соответствующую закону Бойля, но возрастет настолько, что ничтожное увеличение плотности будет требовать огромного увеличения давления.

Отсюда следует, что соотношение между давлением и объемом может быть представлено кривой *ABCDEFGG*, где горизонтальные ординаты означают объем, а вертикальные — давление.

При уменьшении объема давление растет до точки *C*, затем падает до точки *E* и наконец беспредельно растет при дальнейшем уменьшении объема.

Мы до сих пор предполагали, что опыты производятся таким образом, что плотность одинакова во всех частях среды. Однако практически это невозможно, так как единственным условием, налагаемым извне на среду, может явиться лишь заключение ее целиком в некоторый сосуд. Следовательно, если среда может распределиться таким образом, что часть ее будет иметь одну плотность, а часть — другую, то мы не можем этому воспрепятствовать.

Точки *B* и *F* изображают два состояния среды при одинаковом давлении, но весьма различных плотностях. Вся среда целиком может перейти из состояния *B* в состоя-

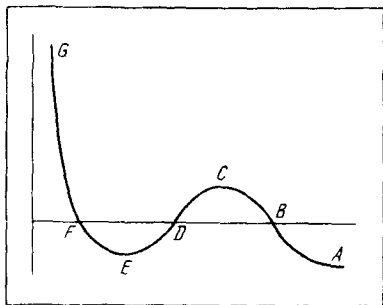


Рис. 1.

ние F не через промежуточные состояния CDE , а последовательно переходя небольшими порциями непосредственно из состояния B в состояние F . Таким образом, последовательные состояния всей среды в целом будут изображены точками на прямой BF , причем точка B изображает среду в состоянии полного разрежения, а точка F — в состоянии полного сгущения. Это имеет место при сжижении газа или пара.

Поэтому в обычных условиях соотношение между давлением и объемом при постоянной температуре изображается ломаной линией $ABFG$. Однако если в процессе сжижения тщательно предохранять среду от соприкосновения с паром, то она может остаться жидкостью и достигнуть состояний, представленных отрезком кривой между F и E . Быть может, будут найдены методы предотвращения конденсации пара, посредством которых можно будет привести его в состояние, изображаемое точками на BC .

Участок гипотетической кривой от C до E изображает существенно неустойчивые состояния, которые поэтому не могут быть осуществлены.

Предположим теперь, что среда, оставаясь однородной, переходит из состояния B в состояние F по гипотетической кривой $BCDEF$, а затем возвращается по прямой FB в виде смеси жидкости и пара. Поскольку температура была все время постоянной, теплота не могла превратиться в работу. Однако превращенное в работу тепло представлено избытком площади FDE над площадью BCD . Следовательно, условие, определяющее максимальное давление пара при заданной температуре, заключается в том, что линия BF отсекает вверх и вниз равные площади.

Чем выше температура, тем больше часть давления, зависящая от движения, сравнительно с частью его, зависящей от сил взаимодействия частиц. Следовательно, по мере повышения температуры падение кривой становится менее заметным, а при некоторой температуре кривая вместо того, чтобы прогибаться, становится в некоторой точке горизонтальной, а затем снова поднимается кверху. Эта точка называется критической точкой. Она была определена для углекислоты в великолепных исследованиях Эндрюса. Эта точка соответствует определенным температуре, давлению и плотности.

При более высоких температурах кривая непрерывно поднимается кверху и при переходе от наиболее разре-

жения к наиболее плотному состоянию нет ничего, соответствующего сжижению.

Молекулярная теория непрерывности жидкого и газообразного состояний составляет предмет весьма остроумной диссертации Иоганна Дидерика ван-дер-Ваальса * (Лейденский университет). Мне кажется, что в некоторых пунктах он впал в математические ошибки и, разумеется, что конечный результат не является исчерпывающим выражением взаимодействия между реальными молекулами; но он так талантливо и смело взялся за этот трудный вопрос, что его исследование даст, вероятно, заметный толчок развитию учения о молекулярном строении тел. Несомненно, эта диссертация заставила многих исследователей изучить голландский язык, на котором она написана.

Чисто термодинамические соотношения между различными состояниями вещества не входят в наш предмет, так как не зависят от специальных молекулярных теорий. Однако я упомяну о чрезвычайно ценном вкладе в эту область термодинамики, сделанном профессором Йельского колледжа в Америке Виллардом Гиббсом **, давшим нам замечательно простой и вполне удовлетворительный метод изображения соотношения между различными состояниями вещества при помощи модели. При помощи этой модели можно свободно решить вопросы, в течение долгого времени не поддававшиеся ни моим усилиям, ни усилиям других исследователей.

Возвратимся теперь к случаю весьма разреженного газа, в котором давление зависит исключительно от движения его частиц. Поскольку объем, давление и масса — измеримые величины, легко вычислить, на основании уравнения Клаузиуса, средний квадрат скорости частицы.

Если предположить, что скорость всех частиц одинакова, то окажется, что скорость молекулы кислорода при 0° С равна 461, молекулы азота 492, а водорода 1844 метрам в секунду.

В различные эпохи различные авторы пытались объяснить давление газа на заключающий его сосуд ударами частиц о стенки сосуда. Однако тот факт, что газы не

* «Over de continuïtet van den gas en vloeïstof — toestand» (Leiden, A. W. Sijthoff, 1873).

** «A method of Geometrical representation of the thermodynamic properties of substances by means of surfaces». — «Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences», v. II, part 2.

рассеиваются в атмосфере со скоростями, близкими к приведенным выше, не был объяснен до тех пор, пока Клаузиус на основании подробного изучения движения огромного числа частиц не развил методов и идей современного учения о молекулярном строении вещества.

Ему мы обязаны представлением о средней длине пробега молекулы газа в промежутке между двумя последовательными столкновениями. Как только мы узнали, что каждая молекула, пройдя чрезвычайно короткий путь, сталкивается с другой и затем движется по новому пути в совершенно ином направлении, стало очевидным, что скорость распространения газов зависит не только от скорости молекул, но и от расстояний, проходимых ими между двумя последовательными столкновениями.

Еще больше я должен сказать о вкладе, сделанном Клаузиусом в молекулярную теорию. Однако его главная заслуга заключается в том, что он открыл новую область математической физики, показав, каким образом можно математически трактовать движущиеся системы бесчисленного количества молекул.

Клаузиус, во всяком случае в своих ранних исследованиях, не пытался определить, равны ли скорости всех молекул одного и того же газа или, если они не равны, то имеется ли какой-нибудь закон их распределения.

Поэтому он, очевидно, принял в качестве первоначальной гипотезы, что скорости равны. Но легко увидеть, что если столкновения имеют место для очень большого числа молекул, то их скорости станут различны, даже если они были первоначально равны, так как при всех, кроме некоторых весьма редко встречающихся условий, скорости двух молекул, хотя бы и равные перед столкновением, после него становятся неравными. Распределяя молекулы по группам, согласно их скоростям, мы можем заменить невыполнимую задачу наблюдения всех столкновений отдельной молекулы регистрацией увеличения или уменьшения числа молекул в различных группах.

Следуя этому методу — единственно возможному как с точки зрения экспериментальной, так и математической, — мы переходим от строго динамических методов к методам статистики и теории вероятностей.

При столкновении двух молекул они переходят из одной группы в другую, но за время большого числа столкновений число молекул, вступающих в каждую группу,

в среднем не больше и не меньше, чем число покинувших ее за тот же промежуток времени. Когда система достигла этого состояния, число молекул в каждой группе должно быть распределено согласно некоторому определенному закону.

Познакомившись с исследованиями Клаузиуса, я попытался установить этот закон.

Опубликованные мной в 1860 г. результаты подверглись затем более строгому исследованию д-ра Людвига Больцмана, применившего также свой метод к изучению движения сложных молекул. Хотя, подобно всем отраслям науки о вероятностях и о статистике, математическое исследование несколько затруднено, однако оно не является ошибочным. С физической стороны оно приводит, однако, к последствиям, из которых некоторые, будучи явно справедливыми, указывают на правильность выбранной гипотезы, тогда как другие настолько несовместимы с известными нам экспериментальными данными, что мы вынуждены признать, что при формулировке физической теории столкновения молекул от нас ускользнуло нечто существенное.

Я попытаюсь сейчас изложить вам современное состояние этих исследований, не входя, однако, в их математические доказательства.

Я начну с формулирования общего закона распределения скоростей между молекулами одного рода.

Если мы возьмем на диаграмме определенную точку и проведем из этой точки линию, изображающую своим направлением и величиной скорость молекулы, и поставим на конце этой линии точку, то положение точки укажет на состояние движения молекулы.

Если мы сделаем то же самое для всех остальных молекул, то вся диаграмма будет покрыта точками, причем в некоторых местах этих точек будет больше, чем в других.

Можно показать, что закон распределения точек есть тот же закон, который является преобладающим при распределении ошибок наблюдения или установки.

Можно принять, что точки на диаграмме, находящейся перед вами, изображают скорости молекул, или различные наблюдения положений одной и той же звезды, или следы ружейных пуль вокруг центральной точки мишени, которые все располагаются именно таким образом (рис. 2).

Скорости молекул колеблются от нуля до бесконечности, поэтому, говоря о средней скорости молекул, мы должны определить, что мы под этим подразумеваем.

Наиболее полезная при сравнениях и вычислениях величина называется «средней квадратичной скоростью». Это — та скорость, квадрат которой есть средняя квадратов скоростей всех молекул.

Это и есть приведенная выше скорость, вычисленная на основании свойств различных газов. Молекула, движущаяся со средней квадратичной скоростью, обладает кинетической энергией, равной средней кинетической энергии всех молекул среды.

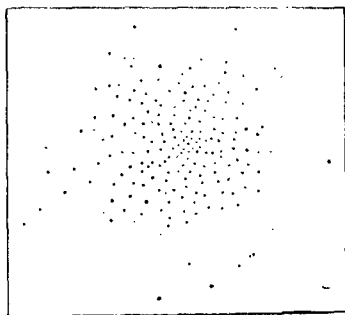


Рис. 2

Если бы масса, равная массе всего количества газов, двигалась с этой скоростью, она обладала бы той же кинетической энергией, которой действительно обладает газ, но эта энергия обладала бы видимой формой и могла бы непосредственно производить работу.

Если в сосуде имеются различного рода молекулы, причем некоторые обладают большей массой, чем другие, то, исследуя их, мы обнаруживаем, что их скорости распределяются так, что средняя кинетическая энергия молекулы одинакова, независимо от того, мала ли или велика ее масса.

Пожалуй, здесь мы имеем важнейшее из всех сделанных до сих пор приложений динамических методов в химии.

Действительно, предположим что мы имеем в сосуде два различных газа. Конечное распределение движения молекул таково, что средняя кинетическая энергия отдельной молекулы одинакова для обоих газов. Конечное состояние является, как мы знаем, состоянием равных температур. Следовательно, условие равенства температур двух газов заключается в равенстве средних кинетических энергий единичной молекулы обоих газов.

Мы уже показали, что давление газа составляет две трети кинетической энергии в единице объема. Следовательно, если давление и температура двух газов одинаковы, то кинетические энергии в единице объема и кинетические энергии, приходящиеся на каждую молекулу, так-

же одинаковы. Поэтому в единице объема обоих газов должно заключаться равное число молекул.

Этот результат совпадает с законом эквивалентных объемов, установленных Гей-Люссаком. Однако этот закон опирался до сих пор на чисто химические доказательства — относительные массы молекул различных веществ выводились из пропорций, в которых эти вещества входили в химические соединения. Теперь это доказано на основании динамических принципов. Молекула определяется как та маленькая частица вещества, которая движется как целое. Это — чисто динамическое определение, не зависящее ни от каких опытов над соединением веществ.

Плотность газообразной среды при нормальных температуре и давлении пропорциональна определенной таким путем массе одной из своих молекул.

Мы обладаем, следовательно, верным способом определения относительных масс молекул различных веществ в их газообразном состоянии. Этому методу можно поверить больше, чем методу, основанному на электролизе или на удельной теплоте, потому что наши сведения об условиях движения более полны, чем наши сведения об электролизе или о внутреннем движении образующих молекулы составных частей.

Я должен сказать теперь несколько слов об этих внутренних движениях, потому что наибольшие затруднения, возникающие до сих пор в кинетической теории газов, лежат как раз в этой области.

До сих пор мы рассматривали только движение центра массы молекулы. Теперь мы должны рассматривать движение составляющих молекулу частей относительно центра массы.

Если предположить, что составляющие молекулу части суть атомы и что каждый атом есть так называемая материальная точка, то каждый атом может двигаться в трех различных и независимых друг от друга направлениях, соответствующих трем измерениям пространства, так что число переменных, необходимых для определения положения и конфигурации всех атомов молекулы, в три раза больше числа ее атомов.

Однако для математического исследования нет необходимости предполагать, что молекулы состоят из атомов. Предполагается только то, что положение и конфигурация молекул могут быть полностью выражены при помощи не-

которого числа переменных. Обозначим это число через n .

Три из этих переменных необходимы для определения положения центра массы молекулы, а остальные $n - 3$ необходимы для определения ее конфигурации относительно центра массы.

Каждой из этих n переменных соответствует разного рода движение.

Поступательное движение центра массы имеет три компоненты.

Движение частей молекулы относительно центра массы имеет $n - 3$ компоненты.

Можно рассматривать кинетическую энергию молекулы как состоящую из двух частей — энергии массы молекулы, представляемой сосредоточенной в ее центре массой, и энергии движения частей молекулы относительно ее центра массы. Первая называется энергией поступательного движения, вторая — энергией вращения и колебания. Сумма их и есть общая энергия движения молекулы.

Давление газа зависит, как мы видим, только от энергии поступательного движения. Удельная теплота зависит от пропорции, в которой растет при повышении температуры общая энергия, кинетическая и потенциальная.

Клаузиус давно уже указал, что, зная из опыта отношение удельной теплоты при постоянном объеме к удельной теплоте при постоянном давлении, можно определить отношение прироста общей энергии к приросту энергии поступательного движения.

Он не пытался, однако, определить а priori отношение между двумя составляющими частями энергии, хотя и предполагал в качестве чрезвычайно вероятной гипотезы, что в данном веществе средние величины обеих частей энергии всегда находятся в одинаковом отношении. Определение численной величины этого отношения он представил опыту.

В 1860 г. я исследовал отношение между обеими частями энергии, исходя из гипотезы о том, что молекулы являются упругими телами неизменной формы. К моему величайшему изумлению, я нашел, что, какова бы ни была форма молекул, — если только они не идеально гладки и не шарообразны, — отношение обеих частей энергии должно быть всегда одинаково, поскольку обе эти части фактически равны.

Этот результат подтвержден исследованиями Больцмана, разработавшего общий случай молекулы, имеющей n переменных.

Он нашел, что в то время как при одинаковой температуре средняя энергия поступательного движения одинакова для любых молекул, общая энергия движения относится к энергии поступательного движения как $n : 3$.

Для твердого тела $n = 6$, вследствие чего общая энергия движения вдвое больше энергии поступательного движения.

Но если молекула способна изменять свою форму под действием приложенных к ней сил, она должна также быть способной к накоплению потенциальной энергии. И если силы таковы, что обеспечивают равновесие молекулы, то средняя потенциальная энергия будет увеличиваться с увеличением средней энергии внутреннего движения.

Следовательно, при повышении температуры приращения энергии поступательного движения, энергии внутреннего движения и потенциальной энергии относятся, соответственно, как 3 ($n - 3$) и e , где e — положительная величина, значение которой неизвестно и которая зависит от закона, управляющего силами, связывающими составные части молекулы.

Если объем вещества сохраняется постоянным, то сообщение теплоты вызовет увеличение общей энергии. Таким образом, мы для удельной теплоты газа при постоянном объеме получим

$$\frac{1}{2J} \frac{p_0 V_0}{273^\circ} (n + e),$$

где p_0 и V_0 — давление и объем единицы массы при 0°C , или 273° абсолютной температуры, а J — динамический эквивалент тепла. Удельная теплота при постоянном давлении равна

$$\frac{1}{2J} \frac{p_0 V_0}{273^\circ} (n + 2 + e).$$

В газах с молекулами одинаковой сложности величина n одинакова, а величина e может быть одинакова.

В этом случае удельная теплота обратно пропорциональна удельному весу, как это следует из закона Дюлонга и Пти, с определенной долей приближения, проверенного на опыте.

Но если мы возьмем истинные значения удельной теплоты, определенные Реньо, и сравним их с данными этой формулы, то получим, что для воздуха и ряда других газов $n + e$ не может быть больше 4,9. Для углекислоты и водяного пара эта величина больше. Мы получаем те же результаты, сравнивая отношение вычисленных удельных теплот

$$\frac{2 + n + e}{n + e}$$

с отношением, полученным для различных газов из опыта, а именно: с величиной 1,408.

И здесь мы сталкиваемся с самым большим затруднением, которое до сих пор встречалось в молекулярной теории, а именно: с истолкованием уравнения

$$n + e = 4,9.$$

Если мы предположим, что молекулы -- это атомы, т. е. просто материальные точки, которые не могут обладать энергией вращения или энергией внутреннего движения, то n будет равно 3, а e нулю, и отношение величин удельных теплот будет равно 1,66, что представляет собой слишком большую величину для всякого реального газа.

Однако при помощи спектроскопа мы узнаем, что в молекулах могут совершаться колебания с постоянным периодом. Поэтому молекулы не могут быть просто материальными точками, а должны быть системами, способными изменять свою форму. Такая система должна зависеть не менее чем от шести переменных. Это даст для отношения величин удельной теплоты максимальную величину в 1,33, что слишком мало для воздуха, кислорода, азота, окиси углерода, закиси азота и хлористо-водородной кислоты.

Но спектроскоп говорит нам, что некоторые молекулы способны колебаться многими различными способами. Очевидно, эти молекулы должны быть системами чрезвычайно большой сложности, зависящими значительно более, чем от шести переменных. Каждая дополнительная переменная вводит дополнительную способность к внутреннему движению, не влияя на внешнее давление. Поэтому каждая дополнительная переменная увеличивает удель-

ную теплоту, безразлично будет ли она вычислена при постоянном давлении или при постоянном объеме.

Тот же результат дает любая способность молекулы к накоплению потенциальной энергии. Но вычисленная нами удельная теплота уже слишком велика, если мы предположим, что молекула состоит только из двух атомов. Следовательно, каждая дополнительная степень сложности, которую мы приписываем молекуле, может лишь увеличить трудность согласования выведенной из наблюдения и вычисленной величин удельной теплоты.

Я изложил вам сейчас то, что считаю самым большим из встречающихся в молекулярной теории затруднений. Больцман предложил искать объяснения этому во взаимодействии между молекулами и окружающей их эфирной средой. Однако я боюсь, что если мы привлечем на помощь эту среду, мы только увеличим и так уже слишком большое значение, вычисленное для удельной теплоты.

Теорема Больцмана применима не только для определения распределения скоростей молекул, но и для определения распределения самих молекул в той области пространства, где на них действуют внешние силы. Она говорит нам, что плотность распределения молекул в точке, где потенциальная энергия молекулы есть Ψ , пропорциональна $e^{-\frac{\Psi}{k\theta}}$, где θ — абсолютная температура, а k — постоянная величина для всех газов.

Из этого следует, что если на несколько газов, находящихся в одном сосуде, действует внешняя сила, подобная силе тяготения, то распределение каждого газа такое же, как если бы в сосуде не было никакого другого газа. Этот результат согласуется с законом, принятым Дальтоном, согласно которому атмосферу можно рассматривать как бы состоящей из двух независимых атмосфер — атмосферы кислородной и атмосферы азотной; при подъеме плотность кислорода уменьшается быстрее, чем плотность азота. Так было бы, если бы атмосфера не испытывала никаких возмущений, но ветры перемешивают атмосферу и делают ее более однородной, чем в том случае, когда она остается в покое.

Другим следствием теории Больцмана является стремление к уравниванию температуры в вертикальном столбе находящегося в покое газа.

В случае атмосферы действие ветра заставляет температуру изменяться так, как изменялась бы температура массы воздуха, если бы она вертикально поднималась кверху, расширяясь и охлаждаясь по мере подъема.

Но помимо этих выводов, которые были мною получены при помощи менее элегантного метода и опубликованы в 1866 г., теорема Больцмана открывает, по-видимому, путь и в чисто химическую область исследований. Действительно, если газ состоит из некоторого числа подобных систем, каждая из которых может принимать различные состояния, обладая различными количествами энергии, то теорема Больцмана говорит нам, что число систем, находящихся в каждом из этих состояний, пропорционально $e^{-\frac{\psi}{k\theta}}$, где ψ — энергия, θ — абсолютная температура, а k — постоянная.

Легко увидеть, что этот результат следовало бы применить к теории о состояниях соединения, встречающихся в смеси различных веществ. Но так как я лишь на этой неделе попытался это сделать, то не стану задерживать ваше внимание моими грубыми вычислениями.

Я ограничился в своих замечаниях узкой областью молекулярного исследования. Я ничего не сказал о молекулярной теории диффузии вещества, движения, энергии, так как, хотя результаты этой теории, особенно в области диффузии вещества и взаимного проникновения жидкостей и газов, представляют большой интерес для многих химиков и хотя мы выводим из этих явлений чрезвычайно важные данные о молекулах, они принадлежат к той области нашего исследования, данные которой зависят от условий столкновения двух молекул и поэтому по необходимости весьма гипотетичны. Я предпочел наглядно показать, что части жидкости и газов движутся, и описать, каким образом распространяется это движение между молекулами различных масс.

Для того чтобы показать, что все молекулы одного и того же вещества обладают одинаковой массой, мы можем обратиться к введенному Грэхемом методу диализа, в котором два газа различной плотности разделяют, заставляя их просачиваться сквозь пористую перегородку.

Если бы в одном и том же газе были молекулы различных масс, то, повторив достаточное число раз процесс диализа, мы разделили бы газ на две части, причем в одной из них средняя масса молекулы была бы больше, чем в

другой. Плотность и молекулярный вес этих двух частей газа были бы различны. Нужно заметить, что никто с достаточной тщательностью не производил этого опыта для всех химических веществ. Но происходящие в природе процессы постоянно осуществляют такого рода опыты, и если бы существовали почти одинаковые молекулы одного и того же вещества, незначительно отличающиеся по своей массе, то большие молекулы собрались бы вместе и образовали одно соединение, а меньшие образовали бы второе. Водород всегда обладает одинаковой плотностью, извлечем ли мы его из воды или из углеводорода, так что ни кислород, ни углерод не могут найти в водороде молекул больших или меньших средней величины.

Предположительная величина молекул была вычислена на основании сравнения объемов тел в жидком и твердом состояниях с их объемом в газообразном состоянии. Изучая молекулярные объемы, мы встречаемся с многими трудностями, но одновременно имеется достаточное число согласованных результатов для того, чтобы надеяться на успех исследования.

Теория о возможных колебаниях молекул не была еще как следует изучена при помощи метода постоянного сравнения данных динамической теории с наглядными данными спектроскопа.

Вооруженный расчетами и спектроскопом, разумный исследователь, несомненно, обнаружит существенные факты о внутреннем строении молекулы.

Наблюдаемая нами прозрачность газов может показаться не согласной с результатами молекулярного исследования.

Слой газа в сто футов, модель молекулы которого состояла бы из шариков, разбросанных на расстояния, пропорциональные их диаметрам, пропускал бы очень незначительное количество света. Но, вспоминая о малой величине молекулы сравнительно с длиной световой волны, мы можем применить некоторые теоретические исследования лорда Рэля о взаимодействии между волнами и малыми шарами, показывающие, что если бы на прозрачность атмосферы влияло только присутствие молекул, то атмосфера была бы значительно прозрачнее, чем мы могли это предположить.

В значительно более трудной области, относящейся к электрическим свойствам газов, имеются пока лишь по-

пытки исследований. Никто еще не объяснил, почему плотные газы столь хорошие изоляторы и почему при разрежении или нагревании они допускают электрический разряд, в то время как абсолютный вакуум является наилучшим из всех изоляторов.

Правда, диффузия молекул происходит значительно быстрее в разреженных газах, потому что средняя длина свободного пробега молекулы обратно пропорциональна плотности. Но различие электрических свойств плотных и редких газов оказывается слишком значительным для объяснения его таким образом.

Находя нужным отметить непреодоление до сих пор трудности этой молекулярной теории, я должен напомнить вам, однако, о тех многочисленных фактах, которые она удовлетворительно объясняет. Мы уже упоминали о так называемых газовых законах, выражающих соотношение между объемом, давлением и температурой, и о чрезвычайно важном законе Гей-Люссака об эквивалентных объемах. Объяснение их можно считать исчерпывающим.

Закон о молекулярной удельной теплоте менее точно проверен экспериментально, и его полное объяснение должно основываться на более глубоком знании внутренней структуры молекулы, чем то, которое мы пока имеем.

Но самым существенным результатом этих исследований является более ясное представление о термических явлениях. Во-первых, температура среды измеряется средней кинетической энергией поступательного движения отдельной молекулы. В двух термически сообщающихся средах измеренная таким образом температура стремится уравниваться. Во-вторых, мы научаемся отличать тот род движения, который мы называем теплотой, от других родов движения. Особенность движения, носящего название теплоты, заключается в том, что оно совершенно беспорядочно, т. е. что направление и величина скорости молекулы в данный момент не могут быть выражены в зависимости от начального положения молекулы и от времени.

С другой стороны, при видимом движении тела движение центра массы всех молекул в любой видимой части тела есть наблюдаемое движение этой части, хотя молекулы могут также находиться в беспорядочном движении, обусловленном тем, что тело нагрето.

При передаче звука различные части тела также обладают движением, которое, однако, обычно слишком незна-

чительно и слишком быстро меняется для того, чтобы его можно было непосредственно наблюдать. Но при движении, составляющем физическое явление звука, скорость каждой части среды в любой момент может быть выражена в зависимости от положения и истекшего времени. Таким образом, движение среды при прохождении звуковой волны закономерно, и его нужно отличать от того движения, которое мы называем теплотой.

Однако если звуковая волна, вместо того чтобы продвигаться закономерным образом и оставлять за собой среду неподвижной, встречает на пути сопротивление, распыляющее ее движение на беспорядочные колебания, это беспорядочное молекулярное движение не может болесуж распространяться с такой быстротой и в одном направлении, как звук, а остается в среде в форме теплоты до тех пор, пока эта теплота медленно не перейдет посредством теплопроводности к более холодным частям среды.

Хотя движение, которое мы называем светом, еще более незначительно и еще быстрее меняется, чем движение, которое мы называем звуком, оно, подобно звуку, совершенно правильно и потому не есть теплота. То, что называлось раньше лучистой теплотой, есть явление, физически тождественное свету.

Когда излучение доходит до определенной части среды, оно входит в нее, проходит ее насквозь и выходит с другой стороны. Пока среда передает излучение, она находится в некотором движении, но как только излучение прошло через нее, среда возвращается к своему прежнему состоянию, а движение полностью переходит в другую часть среды.

Движение, которое мы называем теплотой, не может само по себе переходить из одного тела в другое, если только первое тело не будет во время этого процесса теплее второго. Поэтому движение излучения, которое полностью выходит из одной части среды и входит в другую, не может собственно быть названо теплотой.

Мы можем применить молекулярную теорию газов для проверки той гипотезы о светоносном эфире, которая считает, что он состоит из атомов или молекул. Те, кто пытался описать строение светоносного эфира, предполагали иногда, что он состоит из атомов или молекул.

Применение к таким гипотезам молекулярной теории приводит к поразительным результатам.

Прежде всего молекулярный эфир был бы не чем иным, как газом. Мы можем, если хотим, предположить, что каждая из его молекул равна одной тысячной, одной миллионной части молекулы водорода и что они могут свободно проходить в промежутке между обычными молекулами. Но, как мы видим, само собою установилось бы равновесие между движением обычных молекул и движением молекул эфира. Другими словами, эфир и находящиеся в нем тела стремились бы к уравниванию температуры, и эфир подчинялся бы в отношении давления и температуры обычным газовым законам.

Среди других свойств газов он обладал бы и свойством, установленным Дюлонгом и Пти и заключающимся в том, что теплоемкость единицы объема эфира должна была бы быть равна теплоемкости единицы объема любого обычного газа при том же давлении. Поэтому мы обязательно обнаружили бы его присутствие при наших опытах с удельной теплотой, так что мы можем утверждать, что эфир не обладает молекулярным строением.

Атом

Атом ($\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$) есть тело, которое нельзя рассечь пополам. Атомистическая теория есть теория строения тел, утверждающая, что они составлены из атомов. Противоположная теория есть теория однородности и непрерывности тел. Она утверждает, по крайней мере для случая тел, не имеющих видимой структуры, таких, например, как вода, что как мы можем разделить каплю воды на две части, из которых каждая будет каплей воды, так мы имеем основание думать, что эти меньшие капли можно разделить опять. Далее, эта теория утверждает, что в природе вещей нет ничего такого, что могло бы помещать повторять этот процесс снова и снова сколько угодно раз, до бесконечности. Это — учение о безграничной делимости тел, и оно стоит в прямом противоречии с теорией атомов.

Атомисты утверждают, что после определенного числа таких делений части становятся уже невидимыми, так как каждая из них будет атомом. Сторонники непрерывности материи утверждают, что самое малое тело, какое только можно себе представить, имеет части и что все то, что имеет части, может быть разделено.

В древности Демокрит был основателем атомистической теории, между тем как Анаксагор излагал теорию непрерывности под именем учения о гомеомериях (Ομοιομερία) или о подобии частей тела целому. Доводы атомистов и их ответы на возражения Анаксагора мы находим у Лукреция.

В новое время изучение природы пролило свет на некоторые свойства тел, зависящие, по-видимому, от величины и движения их последних составных частей, и вопрос о существовании атомов снова сделался одним из важнейших среди других научных изысканий.

Мы должны начать с изложения противоположных учений об атомах и о непрерывности и только после этого можем дать очерк состояния молекулярной физики в том виде, в каком она существует в настоящее время. В самые отдаленные времена древние философы, умозрения которых дошли до нас, занимались рассмотрением идей числа и непрерывной величины, пространства и времени, материи и движения с самобытной силой мысли, которую, кажется, никогда не удалось превзойти. Однако их действительные познания и их научный опыт по необходимости были ограничены, потому что в те времена накопление человеческих знаний только что началось. Вероятно, первые точные представления о количестве были основаны на рассмотрении чисел. На практике конкретные количества измеряют и вычисляют при помощи чисел. Но число не непрерывно. Мы переходим от одного числа к следующему скачком. С другой стороны, величины, с которыми мы встречаемся в геометрии, по существу своему непрерывны. Попытка приложения численных методов к сравнению геометрических количеств повела к учению о несоизмеримых и к учению о бесконечной делимости пространства. Между тем те же самые соображения ко времени не прилагались, так что в эпоху Зенона Элейского время все еще рассматривали как состоящее из конечного числа «моментов», и вместе с тем признавалось, что пространство делимо беспрельдно. В таком положении было дело, когда Зенон выставил знаменитые аргументы в опровержение возможности движения, образчиком которого может служить софизм об Ахиллесе и черепахе, и, по-видимому, дело оставалось в таком положении, до той поры, когда Аристотель показал, что и время делимо беспрельдно, совершенно в том же смысле, как и пространство. О медленности, с какой развиваются научные идеи, можно судить по тому факту, что Бэйль в этом положении Аристотеля не признавал никакой силы, и продолжал изумляться парадоксу Зенона (Словарь Бэйля, ст. «Зенон»). Таким образом, истинный научный прогресс веками шел к признанию бесконечной делимости пространства и времени.

Легко было попытаться приложить подобные аргументы и к материи. Если материя протяженна и наполняет пространство, то та же самая умственная операция, посредством которой мы познаем делимость пространства, может быть приложена, по крайней мере в воображении, и к материи, занимающей пространство. С этой точки зрения атомистическое учение можно рассматривать как наследие старого способа пути представления величины посредством чисел и противоположное учение о бесконечной делимости материи может показаться на время более научным. С другой стороны, атомисты придерживаются строгого различия между материей и пространством. Атомы, говорят они, не заполняют Вселенной; между ними находятся пустые пространства. Если бы было не так, повествует Лукреций, то не могло бы быть и движения, ибо атом, который уступает дорогу, должен же иметь какое-либо свободное место, где бы он мог двигаться.

Не существуй пустота — невозможно бы было движение
Всяких вещей, потому что телам постоянно присуще
Возле себя все теснить и оказывать сопротивление;
Не в состоянии были б тела и вперед подвигаться,
Так как тела, к ним ближайшие, не уступали бы места.

«О природе вещей» (I, 335—339)

Противоположная школа, как это всегда бывает в истории, придерживается мнения, что пустоты нет, что всякая часть пространства наполнена материей, что вся Вселенная заполнена и что всякое движение подобно движению рыбы в воде, которая расступается впереди рыбы, потому что рыба оставляет для нее место за собой.

Так говорят, что лоснящимся рыбам вода поддается
И уступает дорогу, которую вновь наполняет
Влагой после того, как те рыбы оставили место.

(I, 373—375)

В новое время Декарт утверждает, что как сущность материи состоит в том, что она протяженна в длину, ширину и глубину, так сущность протяжения состоит в том, что оно заполняется материей, ибо протяжение не может быть протяжением ничего.

«Поэтому, если спросят, что случится, когда бог устранил тело, содержащееся в данном сосуде, и не допустит

никакое другое тело проникнуть на покинутое место, то на такой вопрос должно ответить: в таком случае стороны сосуда сомкнутся. Ведь когда между двумя телами ничего не пролегает, то они необходимо касаются друг друга, и явно нелепо, чтобы тела были отделены друг от друга, т. е. между ними как бы имелось расстояние и в то же время это расстояние было бы «ничто»; поэтому всякое расстояние есть модус протяжения и не может существовать без протяженной субстанции» («Начала», II, 18).

Отождествление протяжения и субстанции проходит через все творения Декарта и составляет одну из основ системы Спинозы. Сообразно этому учению, Декарт отрицал существование атомов как частей материи, которая по природе своей неделима. Однако, по-видимому, он допускал, что божество могло сделать некоторые частицы материи неделимыми в том смысле, что никакое существо не могло бы их разделить. Но эти частицы все-таки делимы по своей природе, ибо божество не может умалить своего собственного могущества и, следовательно, должно обладать в себе силой к разделению их. С другой стороны, Лейбниц смотрел на свои монады как на последние элементы всего существующего.

Итак, есть два способа представлять себе строение тел, и у обоих были сторонники и в древнее и в новое время. Они соответствуют двум способам рассмотрения количества — арифметическому и геометрическому. Для атомиста верно оценить количество материи в теле — это сосчитать, сколько в нем атомов. Пустые промежутки между атомами считаются за ничто. Для тех, кто отождествляет материю с пространством, объем пространства, занимаемого телом, только и может служить мерой количества материи в нем.

Из различных форм атомистической теории теория Бошковича может быть приведена как пример чистейшей монадологии. Согласно Бошковичу, материя составлена из атомов. Каждый атом есть неделимая точка, имеющая положение в пространстве, способная к движению по непрерывному пути и обладающая известной массой, вследствие чего потребно известное количество силы, чтобы произвести данное изменение движения. Сверх того атом наделен потенциальной силой, т. е. всякие два атома притягивают или отталкивают друг друга с силой, зависящей от их взаимного расстояния. Закон этой силы для всякого расстояния, большего, скажем, тысячной доли дюйма, есть притяжение,

изменяющееся обратно пропорционально квадрату расстояния. Для меньших расстояний сила эта есть притяжение на одном расстоянии и отталкивание на другом, сообразно некоторым еще не открытым законам. Сам Бошкович, во избежание возможности, чтобы когда-либо два атома могли очутиться в одной и той же точке, утверждает, что последняя сила есть отталкивание, беспредельно возрастающее по мере того, как расстояние беспредельно уменьшается, так что два атома никогда не могут совпасть. Однако это кажется ничем не оправдываемой уступкой обычному мнению, что два тела не могут одновременно занимать одного и того же места. Это мнение выведено из нашего опыта о поведении тел заметных размеров, но у нас нет опытных доказательств совершенной невозможности совпадения двух атомов. Когда, например, кислород и водород, соединяясь, образуют воду, у нас нет экспериментального доказательства того, что молекула кислорода не находится в одном и том же месте с двумя молекулами водорода. Есть люди, которые не могут освободиться от мнения, что всякая материя протяженна в длину, ширину и глубину. Это — предрассудок одного и того же рода с предыдущим, вытекающий из нашего опыта над телами, состоящими из безмерного множества атомов. Система атомов, согласно Бошковичу, занимает определенное место в пространстве благодаря силам, действующим между атомами, из которых слагается система, и некоторыми другими атомами, находящимися возле нее. Никакая другая система атомов не может занимать той же самой области в пространстве в то же самое время, потому что, прежде чем это могло бы случиться, взаимодействие атомов произвело бы между обеими системами отталкивание, которого никакая сила, находящаяся в нашем распоряжении, не могла бы преодолеть. Так, толпа солдат, снабженных огнестрельным оружием, может занимать большое пространство, не допуская неприятельской армии, хотя бы пространство, занимаемое их телами, и было очень невелико. Так объяснял Бошкович видимое протяжение тел, состоящих из атомов, из которых каждый лишен протяжения. Согласно теории Бошковича, всякое действие между телами есть действие на расстоянии. Такой вещи, как действительное соприкосновение двух тел, в природе не существует. Когда на обыденном языке говорят, что два тела соприкасаются, то нужно разуметь, что они так

близки, что отталкивание между ближайшими парами атомов, принадлежащих обоим телам, весьма велико.

Следовательно, по теории Бошковича, атом имеет непрерывное существование во времени и в пространстве. В каждое мгновение он находится в некоторой точке пространства, и не более как в одном месте в одно и то же время. Он переходит из одного места в другое по непрерывному пути. Он имеет определенную массу, которая неспособна ни к увеличению, ни к уменьшению. Атомы одарены способностью действовать друг на друга притягательно либо отталкивательно, причем величина силы зависит от расстояния между ними. С другой стороны, сам атом не имеет частей или размеров. По геометрической своей форме — это просто геометрическая точка. Протяженности в пространстве он не имеет. Он не имеет так называемого свойства непроницаемости, ибо два атома могут существовать в одном и том же месте. Это учение мы можем рассматривать как одно из крайних мнений в ряду всех разнообразных взглядов на строение тел.

Противоположная крайность — мнение Анаксагора: теория, согласно которой тела, кажущиеся однородными и непрерывными, таковы и в действительности, — теория, в своей крайней форме неспособная к развитию. Объяснить свойства какого-либо вещества на основании этой теории невозможно. Мы можем только принять наблюдаемые свойства такого вещества как конечный факт. Однако в научном прогрессе есть известный этап, где соответствующий этой теории метод оказал услугу. В гидростатике, например, мы определяем жидкость посредством одного из ее известных свойств и, исходя из этого определения, делаем систему выводов, которая и образует науку гидростатики. Этим путем гидростатика может быть построена на основе, взятой из опыта, без учета строения жидкости, т. е. независимо от того, молекулярное оно или непрерывное. Подобным образом, после более или менее остроумных попыток французских математиков построить теорию упруго-твердых тел, исходя из предположения, что они состоят из атомов, находящихся в равновесии под действием их взаимных сил, Стокс и другие показали, что все результаты этой гипотезы, по крайней мере, поскольку они согласны с фактами, можно вывести из постулата, что существуют упругие тела, и из гипотезы, что мельчайшие части, на которые мы можем разде-

лить их, приблизительно однородны. Таким путем принципом непрерывности, составляющий основание метода флюксий и всей современной математики, можно прилагать к анализу задач, связанных с материальными телами, предполагая — чтобы приложить к телам этот анализ, — что они однородны. Все, что нужно, чтобы сделать эти результаты приложимыми к случаю реальных тел, сводится к тому, чтобы мельчайшие части вещества, которые мы принимаем в расчет, были приблизительно одного рода. Так, если железнодорожному подрядчику нужно провести тоннель сквозь холм, состоящий из гравия, и если один кубический ярд гравия настолько схож с другим кубическим ярдом гравия, что строитель может принять их одинаковыми, то, делая расчет работ, потребных для удаления гравия из тоннеля, он, не боясь ошибиться, может делать свои выкладки так, как если бы гравий был веществом непрерывным. Но если сквозь гравий придется прокладывать путь червяку, то для него далеко не все равно, толкнуться ли прямо в кусок гравия или направить свой путь по промежуткам между кусками гравия; для него, следовательно, гравий никоим образом не есть вещество однородное и непрерывное.

Таким же точно образом теория, что некоторое вещество, скажем вода, однородно и непрерывно, может быть хорошей рабочей теорией до известного пункта, но может оказаться несостоятельной, когда придется иметь дело с количествами, настолько малыми или настолько тонкими, что неоднородность их структуры рельефно выступает. Совместима ли эта неоднородность структуры или нет с однородностью и непрерывностью вещества — вопрос другого рода.

Крайняя форма учения о непрерывности выдвинута Декартом, который утверждает, что вся Вселенная одинаково наполнена материей, что вся эта материя одного рода и что единственное существенное свойство ее — свойство протяженности. Все свойства, наблюдаемые нами в материи, он сводит к подвижности ее частей между другими и, таким образом, к возможности все изменения, которые мы можем наблюдать, выводить из движения ее частей («Principia», II, 23). Собственные попытки Декарта вывести различные свойства и действия тел таким путем не имеют большой ценности. Потребовалось больше столетия для изобретения методов исследования условий

движения систем тел, подобных тем, какие воображал себе Декарт. Но гидродинамическое открытие Гельмгольца, что вихрь в совершенной жидкости обладает некоторыми неразрушимыми свойствами, приложено было сэром В. Томсоном к созданию теории вихревых атомов в однородной несжимаемой и лишенной трения жидкости, и к этой теории мы в свое время вернемся.

**Очерк современной молекулярной физики
и, в частности,
молекулярной теории газов**

Мы начнем с допущения, что тела составлены из частей, что каждая из этих частей способна к движению и что эти части действуют одна на другую способом, совместимым с принципом сохранения энергии. Эти допущения оправдываются фактами, что тела можно делить на малые части и что все тела, с которыми нам приходится иметь дело, суть консервативные системы и что этого не было бы, если бы и их части не были также системами консервативными.

Мы можем допустить также, что эти малые части находятся в движении. Это — самое общее допущение, какое только можно сделать, ибо оно включает как частный случай теорию о том, что малые части находятся в покое. Явления диффузии газов и жидкостей одних в другие показывают, что возможно движение малейших частей тела, нами не замечаемое.

Мы не делаем никаких предположений относительно природы этих малых частей — все ли они одинаковой величины или нет. Мы даже не приписываем им ни протяжения, ни формы. Каждую из них нужно измерять ее массой, и каждые две из них, подобно видимым телам, имеют способность действовать одна на другую, поскольку они достаточно близки между собой, чтобы это могло проявляться. Свойства тела или среды определяются конфигурацией и движением их мельчайших частей.

Первым шагом в нашем исследовании будет определение количества движения, существующего в совокупности этих малых частей, независимо от видимого движения среды как целого. Для этой цели удобно воспользоваться одной общей теоремой динамики, данной Клаузиусом.

Когда движение материальной системы таково, что среднее, по времени, значение количества $\Sigma(mx^2)$ остается постоянным, то говорят, что состояние системы есть состояние стационарного движения. Когда движение материальной системы таково, что сумма моментов инерции системы около трех перпендикулярных между собой осей, проходящих через центр ее массы, уклоняется от постоянного значения лишь на малые количества, то говорят, что система находится в состоянии стационарного движения.

Кинетическая энергия частицы есть половина произведения ее массы на квадрат ее скорости, а кинетическая энергия системы есть сумма кинетической энергии всех ее частей.

Когда между двумя точками действует сила притяжения или отталкивания, то половина произведения этой силы на расстояние между двумя точками называется *вириалом* силы. Вириал считается положительным в случае притяжения и отрицательным в случае отталкивания. Вириал системы есть сумма вириалов действующих в ней сил. Когда система находится под действием внешнего напряжения в форме давления стенок сосуда, в котором она заключена, тогда это напряжение внесет количество вириала, равное $\frac{3}{2}pV$, где p — давление на единицу площади, а V — объем сосуда.

Теперь теорему Клаузиуса можно выразить так: в материальной системе, находящейся в состоянии стационарного движения, среднее, для известного промежутка времени, значение кинетической энергии равно среднему, для того же промежутка времени, значению вириала. В случае газа, заключенного в сосуде,

$$\frac{1}{2} \Sigma (mv^2) = \frac{3}{2} pV + \frac{1}{2} \Sigma \Sigma (Rr),$$

где первая часть означает кинетическую энергию и есть полусумма произведений каждой массы на квадрат среднего значения ее скорости. В первом члене второй части p есть давление на единицу поверхности сосуда, объем которого равен V , а второй член этой части выражает вириал, зависящий от внутренних действий между частями системы. Двойной символ суммирования берется потому, что

пужно принимать в расчет каждую пару частиц, между которыми имеет место действие. Теперь мы должны показать, что в газах главная часть давления происходит от движения малых частей среды, а не от отталкивания между ними.

Во-первых, если бы давление газа обуславливалось отталкиванием его частей, то это отталкивание было бы обратно пропорционально расстоянию. В самом деле, рассмотрим кубический сосуд, наполненный газом под давлением p , и пусть куб расширяется, пока длина каждой стороны не увеличится в n раз. Согласно закону Бойля, теперь давление на единицу поверхности будет p/n^3 , а так как площадь грани куба теперь в n^2 раз больше, то полное давление на грань куба составляет $1/n$ первоначальной его величины. Но так как все расширилось симметрично, то расстояние между соответственными частями воздуха теперь в n раз больше первоначального, а сила в n раз меньше. Следовательно, сила должна изменяться обратно пропорционально расстоянию.

Но Ньютон показал («Principia», кн. I, предл. 93), что этого закона допустить нельзя, так как при таком допущении действие отдаленных частей среды на частицу было бы больше действия соседних частей. В самом деле, мы пришли бы к заключению, что давление зависит не только от плотности воздуха, но и от формы и размеров сосуда, его содержащего, а мы знаем, что это неверно.

Если, с другой стороны, мы допустим, что давление всецело обуславливается движением молекул газа, то интерпретация закона Бойля становится очень простой. Действительно, в этом случае

$$pV = \frac{1}{3} \sum (n \cdot v^2).$$

Первая часть есть произведение давления на объем и по закону Бойля оно постоянно для того же самого количества газа при той же температуре. Вторая часть есть $2/3$ кинетической энергии системы, и у нас имеются все основания к допущению, что в газах, когда температура постоянна; кинетическая энергия единицы массы также постоянна. Если мы допустим, что кинетическая энергия единицы массы в данном газе пропорциональна абсолютной температуре, то это уравнение будет выражать закон

Шарля и закон Бойля, и можно написать

$$pV = R\theta,$$

где θ — температура, считаемая от абсолютного нуля, а R — постоянная. Тот факт, что это уравнение выражает с значительной точностью связь между объемом, давлением и температурой газа, когда он находится в крайне разреженном состоянии, и что если газ более и более сжимать, то отклонение от этого уравнения становится более и более очевидным, — показывает, что давление газа почти всецело зависит от движения его молекул, когда газ разрежен, и что только тогда, когда плотность газа значительно увеличится, эффект прямого действия между молекулами становится заметным.

Эффект прямого действия молекул друг на друга зависит от числа пар молекул, в данное мгновение достаточно близких друг другу, чтобы они могли действовать одна на другую. Число таких пар пропорционально квадрату числа молекул в единице объема, т. е. квадрату плотности газа. Следовательно, пока среда настолько разрежена, что на столкновение двух молекул присутствие других не влияет, до тех пор отклонение от закона Бойля будет пропорционально квадрату плотности. Если действие между молекулами всецело отталкивательное, то давление будет больше того, какое указывает закон Бойля. Если оно всецело притягательное, то давление будет меньше того, какое дает закон Бойля. Из опытов Реньо и других оказывается, что давление отстает от закона Бойля, когда плотность газа увеличивается. В случае углекислоты и других легко сжимающихся газов отступление весьма велико. Однако во всех случаях, кроме водорода, давление меньше того, какое дает закон Бойля, и этим доказывается, что вириал всецело зависит от *притягательных* сил, действующих между молекулами.

Другое доказательство, свидетельствующее о природе действия между молекулами, дает опыт д-ра Джоуля. Взяв два сосуда, он из одного удалил воздух выкачиванием, а другой наполнил газом под давлением 20 атмосфер; затем оба сосуда он помещал рядом в сосуд с водой, которая постоянно перемешивалась. Замечали, какова температура. Затем сосуды приводили в сообщение, сжатый газ расширялся, занимая двойной объем, и работа расширения, вначале производившая сильное течение газа, вскоре прев-

ращалась в теплоту, благодаря внутреннему трению в газе. Когда все приходило в спокойное состояние и к равномерной температуре, температуру снова замечали. В первом опыте Джоуля наблюдаемая температура оказалась такой же, как прежде. В дальнейших опытах, которые произведены были Джоулем и В. Томсоном по другому плану, чтобы термический эффект свободного расширения можно было измерить точнее, наблюдалось легкое охлаждение во всех испытанных газах, кроме водорода. Так как температура зависит от скорости движения молекул, то оказывается, что когда газ расширяется, не совершая внешней работы, скорость движения не испытывает значительного изменения, но что в большинстве случаев она слегка уменьшается. Но если молекулы во время удаления их друг от друга действуют одна на другую, то их скорость должна увеличиваться либо уменьшаться, смотря по тому, будет ли сила отталкивательная или притягательная. Следовательно, из этих опытов со свободным расширением газов, по-видимому, следует, что сила взаимодействия между молекулами невелика, но что она всецело притягательная.

Мы, оправдав таким образом гипотезу о том, что газ состоит из молекул, находящихся в движении, и что они действуют друг на друга только тогда, когда при встречах бывают весьма тесно сближены, но что во время интервалов между их соударениями, на которые тратится большая часть всего существования молекул, они описывают свободные пути и никакие молекулярные силы между ними не действуют, перейдем теперь к изучению движения такой системы.

Математическое исследование свойств такой системы молекул, находящихся в движении, есть основа молекулярной физики. Клаузиус впервые выразил соотношение между плотностью газа, длиной свободного пути его молекул и расстоянием, на котором они встречают одна другую. Однако он допускал, по крайней мере в более ранних своих изысканиях, что скорости всех молекул равны. Характер распределения скоростей впервые был исследован автором этой статьи, показавшим, что в движущейся системе скорости молекул имеют все значения от нуля до бесконечности, но что число молекул, скорости которых лежат внутри данных пределов, можно выразить формулой, тождественной формуле, которой в теории погрешностей вы-

ражается число погрешностей наблюдения, лежащих внутри соответствующих пределов. Доказательство этой теории было превосходно разобрано Больцманом*, устранившим ее слабые места, которому мы всецело обязаны методом, принимающим во внимание действие внешних сил.

Однако средняя кинетическая энергия молекулы имеет определенное значение и его легко выразить посредством количеств, входящих в выражение для распределения скоростей. Самый важный результат этого исследования тот, что когда молекулы разного рода находятся в движении и действуют друг на друга, то средняя кинетическая энергия молекулы одинакова, какова бы ни была ее масса, так как молекулы, имеющие большую массу, обладают меньшими средними скоростями. Но при смешении газов их температуры делаются равными. Отсюда мы заключаем, что физическое условие, которым определяется, что температура обоих газов должна быть одинакова, состоит в том, что средние кинетические энергии движения отдельных молекул обоих газов равны. Этот результат имеет огромное значение в теории теплоты, хотя мы и не можем еще установить какой-нибудь подобный результат для тел в жидком или твердом состоянии.

Далее, мы знаем, что в случае, когда полное давление среды обуславливается движением ее молекул, давление на единицу площади численно равно $\frac{2}{3}$ кинетической энергии единицы объема. Отсюда, если равные объемы двух газов находятся под одинаковым давлением, то кинетическая энергия в каждом одна и та же. Точно так же, если они находятся при одинаковой температуре, то средняя кинетическая энергия каждой молекулы в каждом газе одна и та же. Следовательно, если равные объемы двух газов находятся при одинаковых температурах и давлениях, то число молекул в каждом одно и то же и, следовательно, массы обоих родов молекул находятся в таком же точно отношении, как плотности газов, которым они принадлежат.

В это положение химики верили со времен Гей-Люссака, который впервые установил, что веса химических эквивалентов различных веществ пропорциональны плотностям этих веществ в газообразном состоянии. Но определение слова «молекула», как его понимал Гей-Люссак, уста-

* «Sitzungsberichte der K. K. Acad.». Wien, 8 Oct., 1869.

навливая свой закон, никоим образом не тождественно с определением этого слова в кинетической теории газов. Химики убеждаются опытом, каковы отношения масс различных веществ в соединении. Отсюда они выводят химические эквиваленты различных веществ, взяв за единицу химический эквивалент какого-либо одного вещества, скажем водорода. Свои доводы, на которые они опираются, они заимствуют исключительно из химических соединений. Таким образом, чтобы дать себе отчет в фактах, являемых соединениями, допускается, что причина, почему вещества соединяются в определенных отношениях, заключается в том, что молекулы веществ находятся в отношении своих химических эквивалентов и что то, что мы называем соединением, есть некоторое действие, имеющее место, когда молекула одного вещества соединяется с молекулой другого.

Этот способ рассуждения, если представить его в надлежащей форме и подкрепить надлежащими доказательствами, в высшей степени убедителен. Но это рассуждение чисто химическое; это — не динамическое рассуждение. Оно основано на химическом опыте, а не на законах движения.

Наше определение молекулы чисто динамическое. Молекула есть небольшая часть вещества, движущаяся, как нечто целое, так что ее части, если только у нее есть части, не отделяются одна от другой во время теплового движения газа. Выводы кинетической теории должны, следовательно, показать нам, каковы относительные массы молекул, рассматриваемых как движущиеся тела. Согласно этим выводам с дедукциями химиков из явлений соединения значительно усиливает свидетельства в пользу действительного существования и движения молекул газа.

Другое подтверждение теории молекул выводится из опытов Дюлонга и Пти над удельной теплотой газов, откуда они вывели носящий их имя закон, утверждающий, что удельные теплоемкости равных весов газов обратно пропорциональны их атомным весам или, другими словами, что теплоемкости химических эквивалентов различных газов равны. Мы видели, что температура определяется кинетической энергией движения каждой молекулы. Молекула обладает также определенным количеством энергии внутреннего движения, вращательного либо колебательного, но гипотеза Клаузиуса, что среднее значение

внутренней энергии всегда находится в постоянной для каждого газа пропорции к энергии движения, кажется в высшей степени вероятной и согласной с опытом. Полная кинетическая энергия, следовательно, равна энергии движения, помноженной на некоторый множитель. Таким образом, энергия, сообщенная газу нагреванием его, распределяется в известной пропорции между энергией поступательного движения и энергией внутреннего движения каждой молекулы. При данном повышении температуры энергия движения, скажем миллиона молекул, увеличится на одно и то же количество, каков бы ни был газ. Теплота, израсходованная на повышение температуры, измеряется увеличением всей кинетической энергии. Следовательно, отношение теплоемкостей равного числа молекул различных газов равно отношению множителей, на которые нужно помножить энергию движения, чтобы получить полную энергию. Так как этот множитель оказывается приблизительно одинаковым для всех газов той же самой атомности, то закон Дюлонга и Пти верен для всех таких газов.

Другой результат этого исследования имеет большое значение по отношению к некоторым теориям*, допускающим существование эфиров или разреженных сред, состоящих из молекул, гораздо более мелких, нежели молекулы обыкновенных газов. Согласно с нашим выводом, такая среда — не что иное, как газ. Если допустить, что молекулы так малы, что они могут проникать в промежутки между молекулами твердых веществ, как, например, стекло, то так называемая пустота была бы наполнена этим разреженным газом при наблюдаемой температуре и при любом давлении, каково бы оно ни было, эфирной среды в пространстве. Следовательно, удельная теплота среды в так называемой пустоте будет равна удельной теплоте того же объема некоторого другого газа при той же температуре и давлении. Но цель допущения этого молекулярного эфира в этих теориях та, чтобы он действовал на тела своим давлением, и с этой целью допускают, что это давление вообще весьма велико. Следовательно, согласно этим теориям, мы должны прийти к заключению, что удельная теплота так называемого вакуума весьма значительна в сравнении с удельной теплотой количества воздуха, наполняющего то же самое пространство.

* См.: Gustaw Hansemann. Die Atome und ihre Bewegungen, 1871.

Теперь мы уже значительно ближе подошли к полной молекулярной теории газов. Мы знаем среднюю скорость молекул каждого газа в метрах в секунду и знаем относительные массы молекул различных газов. Мы знаем также, что молекулы одного и того же газа все имеют одинаковую массу. Если бы это было не так, то посредством метода анализа, каким пользовался, например, Грэхем, мы могли бы отделить молекулы, обладающие меньшей массой, от молекул с большей массой, так как они проходили бы через пористые вещества с большей скоростью. Таким образом мы могли бы любой газ, скажем водород, разделить на две части, различающиеся плотностями и другими физическими свойствами, различающиеся атомными весами, и вероятно, и другими химическими свойствами. Но так как до сих пор ни одному химику еще не удалось получить образчик водорода, отличающийся в этом отношении от других образчиков, то мы и заключаем, что все молекулы водорода имеют в значительной степени почти одинаковую массу, а не только, что их средняя масса есть статистическое постоянное, обладающее значительной устойчивостью.

Но до сих пор мы еще не рассматривали явлений, которые позволили бы нам сделать оценку действительной массы и размеров молекулы. Клаузиусу мы обязаны первыми определенными представлениями о свободном пути молекулы и о среднем расстоянии, проходимом молекулой от одной встречи до другой. Мы видели, что число столкновений молекулы в данное время пропорционально скорости, числу молекул в единице объема и квадрату расстояния между центрами двух молекул, когда они, действуя одна на другую, сталкиваются. Отсюда следует, что если расстояние центров назвать диаметром молекулы, а, объем шара, имеющего этот диаметр, объемом молекулы и сумму объемов всех молекул — молекулярным объемом газа, то диаметр молекулы будет выражаться некоторым кратным количеством, получаемого уменьшением свободного пути в отношении молекулярного объема к полному объему газа. Численное значение этого кратного немного изменяется сообразно тому, какую гипотезу мы принимаем относительно закона распределения скоростей. Оно зависит также от определения столкновения. Если рассматривать молекулы как упругие сферы, то мы знаем, что подразумевается под их встречаей, но если они действуют друг на друга на расстоянии с притягательной или отталкива-

тельной силой конечной величины, то расстояние между центрами во время встречи будет изменяться и уже не представит собой определенного количества. Тем не менее вышеприведенное положение Клаузиуса — если мы знаем длину среднего пути и молекулярный объем газа — дает нам возможность сделать довольно точную оценку диаметра сферы напряженного действия молекулы, а следовательно, и числа молекул в единице объема и действительной массы каждой молекулы. Чтобы закончить исследование, нам нужно поэтому определить средний путь и молекулярный объем. Первая численная оценка среднего пути молекулы газа была сделана автором этой статьи на основании данных, вытекающих из исследований внутреннего трения воздуха. Три явления зависят от длины свободного пути молекул газа. Очевидно, что чем больше свободный путь, тем быстрее молекула будет двигаться из одной части среды в другую, потому что направление ее движения не будет так часто изменяться встречами с другими молекулами. Если в различных частях среды будут находиться молекулы разного рода, то их движение из одной части среды в другую можно легко проследить, анализируя части среды, взятые из различных мест. Быстрота диффузии, найденная таким образом, дает один метод для оценки длины свободного пути молекулы. Этого рода диффузия происходит не только между молекулами различных газов, но и между молекулами одного и того же газа, только в последнем случае результатов диффузии нельзя проследить анализом. Но диффундирующие молекулы несут с собой на протяжении свободных путей свое количество движения и энергию, которыми они обладают в данный момент. Диффузия количества движения стремится уравнивать видимое движение различных частей среды и составляет явление, называемое внутренним трением или вязкостью газа. Диффузия энергии стремится уравнивать температуру различных частей среды и составляет явление теплопроводности газов.

Эти три явления — диффузия материи, движения и теплоты в газах — были исследованы экспериментально: диффузия материи — Грэхемом и Лошмидгом, диффузия движения — Оскаром Мейером и Клерком Максвеллом, а диффузия теплоты — Стефаном.

Эти троякого рода опыты дают результаты, которые при настоящем несовершенном состоянии теории и при

крайней трудности самых опытов, особенно с теплопроводностью, можно сказать, еще довольно сносно согласуются друг с другом.

При атмосферном давлении и при температуре таяния льда средний путь молекулы водорода составляет около одной десяти тысячной миллиметра, или около $\frac{1}{5}$ длины волны зеленого света. Средние пути молекул других газов короче.

Определение молекулярного объема газа пока еще весьма неточно. Самый лучший способ — это сжатие газа до жидкого состояния. Ввиду большого сопротивления жидкостей сжиманию кажется вероятным, что их молекулы находятся почти на таких одна от другой расстояниях, на каких две молекулы того же вещества в газообразной форме действуют друг на друга во время встречи. Если это так, то молекулярный объем газа несколько меньше объема жидкости, в которую он сгущается под давлением, или, другими словами, плотность молекул несколько больше плотности жидкости.

Нам известны относительные веса различных молекул с большой точностью, а зная средние пути, мы можем приблизительно вычислить их сравнительные диаметры. Отсюда можно вывести относительные плотности различного рода молекул. Вычисленные таким образом относительные плотности Лоренц Мейер сравнивал с наблюдаемыми плотностями жидкостей, в которые эти газы сгущаются, и нашел между ними замечательное соответствие. Однако что касается соотношения между молекулами жидкости и молекулами ее пара, то на этот счет существует большое сомнение, так что пока не будет сделано большее число сравнений, до тех пор слишком полагаться на вычисленные плотности молекул нельзя. Другой и, может быть, более тонкий метод принят ван-дер-Ваальсом, который выводит молекулярный объем из отклонений давления от закона Бойля при сжатии газа.

Первое численное определение диаметра молекулы было сделано Лошмидтом в 1865 г. на основании средних путей и молекулярного объема. Независимо от него и от других, Стони в 1868 г. и сэр В. Томсон в 1870 г. обнаружили результаты подобного же рода, причем числа Томсона получены были не только этим путем, но и из соображений, основанных на толщине мыльных пленок и на электрическом действии между цинком и медью.

Диаметр и масса молекул, полученные на основании этих методов, оказались вообще весьма малы, но никоим образом не бесконечно малы. Около двух миллионов молекул водорода, положенных в ряд, заняли бы миллиметр, и около 200 миллионов миллионов миллионов их весили бы один миллиграмм. Числа эти нужно рассматривать как весьма грубые приближения; они, по мере усовершенствования науки, будут исправлены более разнообразными и точными опытами, но основной результат, который, по-видимому, установлен, есть то, что определение массы молекулы — законный объект научного исследования и что эта масса никоим образом не есть величина неизмеримо малая.

Лошмидт иллюстрирует эти молекулярные измерения сравнением с малейшими величинами, видимыми посредством микроскопа. Ноберт, говорит он, может начертить 4000 линий на протяжении миллиметра. Промежутки между этими линиями видны в хороший микроскоп. Куб, сторона которого равна $\frac{1}{400}$ миллиметра, можно считать за наименьший видимый объект для современного наблюдателя. Такой куб будет содержать от 60 до 100 миллионов молекул кислорода или азота; а так как молекулы органической материи содержат в среднем около 50 более элементарных атомов, то можно допустить, что наименьшая органическая частица, видимая под микроскопом, содержит около двух миллионов молекул органической материи. По крайней мере половина каждого живого организма состоит из воды, так что мельчайшее живое существо видимое под микроскопом, не должно содержать более миллиона органических молекул. Можно предположить, что некоторый крайне простой организм составлен не более как из миллиона подобных молекул. Непостижимо, как мало молекул нужно для образования организма, снабженного целой системой специализированных органов!

Таким образом, молекулярная физика ставит нас лицом к лицу с физиологическими теориями. Она не позволяет физиологу представить себе, каким образом структурные детали беспредельно малых размеров могут дать объяснение бесконечному разнообразию свойств и функций самых малых организмов.

Микроскопический зародыш, как мы знаем, способен развиться в животное с высокой организацией. Другой зародыш, также микроскопический, становится, когда разовьется, животным совершенно иного рода. Но эти беско-

нечные по числу признаки, которыми одно животное отличается от другого, обуславливаются ли, каждое, некоторым различием в структуре соответствующих зародышей? Если даже и допустить это как вещь возможную, то сторонники пангенезиса скажут нам, что мы должны допустить еще большее чудо. Ведь, согласно этой теории, микроскопический зародыш не есть лишь индивидуальное тело, он — представитель, содержащий члены, собранные со всех ветвей широко раскинувшегося родословного дерева, и числа этих членов вполне достаточно не только для того, чтобы передать наследственные особенности каждого органа тела и каждой привычки животного от рождения до смерти, но также и для того, чтобы дать возможность запасу скрытых задатков переходить в недейтельном состоянии от зародыша к зародышу до тех пор, пока, наконец, особенности предков, им представляемые, не возродятся вновь в каком-нибудь отдаленном потомке.

Некоторые представители этой теории наследственности пытались избежать трудности совмещения целого мира чудес в таком малом и в таком лишенном всякой видимой структуры теле, как зародыш, пустив в ход фразу о бесструктурных зародышах *. Но одна материальная система может отличаться от другой только конфигурацией и движением, которые она имеет в данный момент. Поэтому объяснять различия функций и развития зародыша без допущения различий структуры — то же, что допускать, что свойства зародыша не суть свойства чисто материальной системы.

Что касается природы и движения молекул, которыми мы до сих пор занимались, то доказательства были заимствованы из опытов над газами, причем мельчайшая осязательная часть таких сред содержит миллионы миллионов молекул. Постоянство и однообразие свойств газовой среды есть прямой результат невообразимой беспорядочности теплового движения ее молекул. Всякая причина, которая могла бы внести правильность в тепловое движение и заставить молекулы совершать их движение упорядоченно и методически, могла бы задержать или даже обратить это стремление к диффузии материи, движения и энергии, — стремление, представляющее собой одно из самых

* См.: F. C a l t o n. On Blood Relationship. «Proc. Roy. Soc.», June 13, 1882.

пеизменных явлений природы, которому Томсон дал название рассеяние энергии.

Так, например, когда звуковая волна проходит чрез массу воздуха, то ее движение имеет известный определенный характер и, предоставленное самому себе, все это движение распространяется на другие массы воздуха, причем звуковая волна идет дальше и дальше, оставляя воздух за собой в покое. С другой стороны, теплота никогда не исходит из горячего тела без того, чтобы не перейти к более холодному телу, так что энергия звуковой волны или всякая иная форма энергии, распространяющаяся так, что из одной части среды целиком вся переходит в другую, не может быть названа теплотой.

Теперь мы должны обратить наше внимание на класс молекулярных движений, настолько же замечательных своей правильностью, насколько тепловые движения замечательны своей неправильностью.

Посредством спектроскопа найдено, что свет, испускаемый раскаленными телами, бывает различен, смотря по состоянию их сгущения. Когда они находятся в состоянии крайнего разрежения, спектр их света состоит из ряда резко отграниченных светлых линий. Когда вещество становится плотнее, спектр стремится сделаться непрерывным либо так, что линии становятся шире и расплывчатее, либо так, что между ними появляются новые линии и полосы, пока спектр во всю длину не утратит всех своих характерных линий и не сделается тождествен со спектром твердых тел, нагретых до той же температуры.

Следовательно, колеблющиеся системы, служащие источником испускаемого света, должны колебаться различно в том и другом случаях. Когда спектр состоит из нескольких ярких линий, движение системы должно слагаться из соответствующего числа типов гармонического колебания. Чтобы могла появиться резко определенная яркая линия, колебательное движение, ее производящее, должно с совершенной правильностью сохраняться в течение нескольких сотен или тысяч колебаний. Если движение каждого из колеблющихся тел сохраняется лишь в продолжение малого числа колебаний, то как бы правильны ни были колебания каждого тела, пока они длятся, все-таки при анализе призмой мы найдем, что результирующее возмущение светоносной среды содержит, кроме части, производимой правильными колебаниями, и другие движения,

зависящие от того, что каждое отдельное колеблющееся тело приходит в движение и прекращает свои колебания, и это обнаруживается в виде распылчатого свечения, простирающегося на всю длину спектра. Стало быть, спектр ярких линий показывает, что колеблющиеся тела, придя в движение, некоторое время колеблются в соответствии с условиями их внутреннего строения, прежде чем их движение будет возмущено внешними силами.

Следовательно, как кажется, спектроскоп свидетельствует, что каждая молекула разреженного газа в течение большей части своего существования находится в таком удалении от всех остальных молекул, что, ничем не возмущаемая, совершает свои колебания правильным образом. К такому же заключению мы пришли и ранее, исходя из соображений другого рода.

Мы можем, следовательно, рассматривать яркие линии спектра газа как результат колебаний, совершаемых молекулами в то время, как они описывают свободные пути. Когда две молекулы после соударения отделяются одна от другой, то каждая из них находится в состоянии колебания, происходящего от неодинакового действия на различные части этой молекулы во время соударения. Поэтому хотя центр массы молекулы, описывающей свободный путь, движется с равномерной скоростью, части молекулы имеют колебательное движение по отношению к центру массы всей молекулы, и испускаемый свет и есть это возмущение светонесущей среды, сообщаемое ей колеблющимися молекулами.

Колеблющуюся молекулу можно сравнить с колокольчиком. Если ударить в колокольчик, он придет в движение. Это движение складывается из гармонических колебаний с несколькими периодами, и каждое из них действует на воздух, производя тоны различной высоты. Когда колокольчик сообщает свое движение воздуху, эти колебания необходимо затухают, одни скорее, другие медленнее, так что звук содержит меньшее и меньшее число нот, и, наконец, будет слышаться только основной тон колокольчика *. Если мы предположим, что у нас имеется множество колокольчиков, совершенно подобных друг другу, и что мы ударяем в них, сперва в один, потом в другой без

* Часть энергии движения, в случае колокольчика, рассеивается в веществе колокольчика вследствие вязкости металла и при-

всякой правильности, но так, однако, что в среднем, сколько колокольчиков приведем в движение в одну секунду, столько же и в другую, и притом еще так, что в среднем в каждый колокольчик вторично будем ударять не прежде, чем он перестанет звучать, то в результате мы услышим непрерывный звук, слагающийся из звуков, издаваемых колокольчиками во всех состояниях колебания, начиная от удара в колокольчик и кончая финальным звучанием затухающего основного тона.

Пусть теперь колокольчиков будет меньше, число же ударов в секунду пусть будет такое же, как и прежде. И пусть теперь каждый из колокольчиков будет получать удар раньше, чем он перестанет колебаться, так что в результирующем звуке будет слышаться меньше основного тона и больше начального звона. Пусть, наконец, останется один колокольчик, который, непрерывно получая бесчисленное число ударов, будет издавать звук, представляющий собой простой шум, в котором уже нельзя различить музыкального тона.

В случае газа мы имеем бесчисленное множество молекул и каждая из них, приходя в колебание при встрече с другой молекулой, продолжает колебаться, когда описывает свой свободный путь. Молекула есть материальная система, части которой связаны некоторым определенным образом, и из того факта, что яркие линии испускаемого света всегда имеют одну и ту же длину волны, мы заключаем, что соответствующие этим линиям колебания всегда имеют один и тот же период и, следовательно, сила, стремящаяся вернуть некоторую часть молекулы в ее положение равновесия в молекуле, должна быть пропорциональна ее смещению из этого положения.

Математическая теория движения такой системы показывает, что все движения можно разложить на следующие части, которые можно рассматривать как друг от друга независимые: во-первых, центр массы системы движется равномерно по прямой линии. Скорость этого движения может иметь какую угодно величину. Во-вторых, здесь может иметь место движение вращательное, причем угловой момент системы вокруг центра массы во все вре-

нимает форму теплоты, но в целях иллюстрации предмета нет необходимости принимать в расчет эту причину затухания колебаний.

мя свободного пути остается постоянным по величине и по направлению. Этот угловой момент может иметь какую угодно величину, а ось его может иметь какое угодно направление. В-третьих, остальное движение складывается из нескольких составляющих движений, каждое из которых есть гармоническое колебание данного типа. В колебаниях каждого типа период колебания определяется природой системы и для одной и той же системы остается неизменным. Итак, относительное количество движения в различных частях системы определено для каждого типа, но абсолютное количество движения и фаза колебания каждого типа определяются особыми обстоятельствами последнего столкновения и могут как угодно изменяться от одной встречи до другой.

Значения периода колебаний различного типа даются корнями некоторого уравнения, форма которого зависит от природы связей системы. В некоторых исключительно простых случаях, как, например, в случае однородной нити, натянутой между двумя неподвижными точками, корни уравнения связаны простым арифметическим соотношением, и если внутреннее строение молекулы отличается подобной же простотой, то можно ожидать, что в спектре молекулы мы найдем ряд ярких линий, длины волны которых находятся в простых арифметических отношениях.

Но если предположить, что молекула устроена по некоторому другому типу, если, например, это будет упругий шар, если она состоит из конечного числа атомов, которые удерживаются на своих местах притягательными и отталкивательными силами, то корни уравнения уже не будут связаны между собой простыми соотношениями, но надлежащим изменением связей системы можно каждый из них заставить изменяться независимо от другого. Следовательно, мы не имеем никакого права ожидать какого-либо определенного численного соотношения между длинами волн ярких линий газа.

Итак, яркие линии спектра раскаленного газа обязаны своим происхождением гармоническим колебаниям молекул газа в то время, когда они проходят свои свободные пути. Единственный эффект движения центра массы молекулы — это изменение времени колебания света, получаемого неподвижным наблюдателем. Когда молекула летит по направлению к наблюдателю, то каждый последо-

вательный импульс должен пройти более короткое расстояние, прежде чем достигнет глаза наблюдателя, и, следовательно, будет казаться, что импульсы быстрее следуют один за другим, чем если бы молекула оставалась в покое, и обратное будет в случае, когда молекула удаляется от наблюдателя. Соответствующая колебанию яркая линия будет, таким образом, смещена в спектре в направлении к синему концу, когда молекула приближается, и к красному концу, когда она удаляется от наблюдателя. Наблюдая смещения некоторых линий в спектре, д-р Гюггинс и другие измерили скорость приближения или удаления некоторых звезд по отношению к Земле, а г. Локьер определил скорость движения вихрей на Солнце. Лорд Рэлей указал на то, что, согласно динамической теории газов, молекулы движутся вперед и назад с такой большой скоростью, что как бы ни была узка и резко очерчена какая-либо из ярких линий, производимых отдельной молекулой, смещение этой линии к синему концу, при приближении молекулы, и к красному, при удалении молекулы, вызовет до некоторой степени расширение и расплывчатость спектральной линии, так что резкому отграничению линий газа положен известный предел. Расширение линий, вызываемое этой причиной, пропорционально скорости движения молекулы. Оно будет наибольшее для молекул наименьшей массы, каковы молекулы водорода, и возрастает с температурой. Следовательно, измерение ширины линий водорода, например C или F , в спектре солнечных протуберанцев, может дать доказательства, что температура Солнца не превышает известной величины.

О теории вихревых атомов

Уравнения, служащие основанием математической теории движения жидкостей, были полностью установлены Лагранжем и великими математиками конца последнего столетия, но число решений случаев движения жидкостей, приведенных в законченную форму, все еще оставалось невелико, и почти все они относились к тому частному типу движения жидкости, который с тех пор получил наименование безвихревого типа. В самом деле, Лагранж показал, что идеальная жидкость, если ее движение в некоторое время есть движение безвихревое, будет продолжать всегда двигаться безвихревым образом, так что

если допустить, что жидкость была в некоторый момент в покое, то вычисление ее следующего за тем движения может быть значительно упрощено.

На долю Гельмгольца выпало указать весьма замечательные свойства вихревого движения в однородной несжимаемой жидкости, лишенной всякой вязкости. Прежде всего мы должны определить физические свойства такой жидкости. Во-первых, это — материальная субстанция. Ее движение непрерывно в пространстве и во времени, и если мы будем следить за движением некоторой ее части, то оказывается, что масса этой части остается неизменной. Эти свойства она разделяет со всякой материальной субстанцией. Во-вторых, она несжимаема. Форма данной части жидкости может изменяться, но ее объем остается неизменным; другими словами, плотность жидкости во время движения остается неизменной. Кроме того, жидкость однородна, т. е. плотность всех ее частей одинакова. Она также непрерывна, так что масса жидкости, содержащейся внутри некоторой замкнутой поверхности, всегда в точности пропорциональна объему, содержащемуся внутри этой поверхности. Это тождественно утверждению, что жидкость не состоит из молекул; в самом деле, если бы она была составлена из молекул, то масса изменялась бы скачками по мере непрерывного увеличения объема, потому что сначала одна, потом другая молекула включались бы внутрь замкнутой поверхности. Наконец, это совершенная жидкость, или, другими словами, напряжение между какой-либо частью и смежной ей частью всегда нормально к отделяющей их поверхности, независимо от того, находится ли жидкость в покое или в движении.

Мы видели, что в молекулярной жидкости диффузия молекул производит диффузию движения различных частей жидкости, так что действие между смежными частями уже не нормально, но имеет место в направлении, стремящемся уменьшить их относительное движение. Следовательно, совершенная жидкость не может иметь молекулярного строения.

Все, что нужно для построения правильной математической теории материальной системы, состоит в том, чтобы ее свойства можно было ясно определить и чтобы они не противоречили друг другу. Это — существенно необходимо. Существует ли в действительности субстанция с та-

ними свойствами — это вопрос, который приходится рассматривать только тогда, когда мы захотим сделать практические приложения результатов математической теории. Свойства нашей совершенной жидкости ясно определены и согласуются друг с другом, и из математической теории мы можем вывести замечательные результаты, причем некоторые из них можно грубо иллюстрировать при помощи жидкостей, которые отнюдь несовершенны в смысле отсутствия вязкости, как, например, воздух и вода.

Движение жидкости называется безвихревым в том случае, когда оно таково, что если бы сферическая часть жидкости внезапно отвердела, то образованная таким образом твердая сфера не получила бы вращения вокруг некоторой оси. Когда движение жидкости вращательное, то ось и угловая скорость вращения некоторой малой части жидкости суть ось и угловая скорость *малой* сферической части, внезапно отвердевшей.

Математическое выражение этих определений таково. Пусть u , v , w суть компоненты скорости жидкости в точке (x, y, z) и пусть

$$\alpha = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \beta = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z},$$

$$\gamma = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \dots, \quad (1)$$

тогда α , β , γ суть компоненты скорости вращения жидкости в точке (x, y, z) . Ось вращения совпадает с направлением результирующей α , β и γ , а скорость вращения измеряется этой результирующей.

Линия, проведенная в жидкости так, чтобы в каждой точке линии

$$\frac{1}{\alpha} \frac{dx}{ds} = \frac{1}{\beta} \frac{dy}{ds} = \frac{1}{\gamma} \frac{dz}{ds} = \frac{1}{\omega} \dots, \quad (2)$$

(где s — длина линии до точки x, y, z) называется линией вихря. Ее направление во всех точках совпадает с направлением оси вращения жидкости.

Теперь мы можем доказать теорему Гельмгольца, что точки жидкости, находящиеся в некоторый момент на одной и той же вихревой линии, будут лежать на той же линии во все время движения жидкости.

Уравнения движения жидкости имеют вид

$$\rho \frac{\delta u}{\delta t} + \frac{dp}{dx} + p \frac{dV}{dx} = 0 \dots, \quad (3)$$

где ρ — плотность, которую в случае нашей однородной несжимаемой жидкости мы можем принять равной единице; оператор $\frac{\delta}{\delta t}$ изображает быстроту изменения величины, которой он предшествует, в точке, движущейся вперед с жидкостью, так что

$$\frac{\delta u}{\delta t} = \frac{du}{dt} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \dots, \quad (4)$$

где p — давление, а V — потенциал внешних сил. Есть еще два других уравнения того же вида, соответствующих осям y и z . Дифференцируя по z уравнение, соответствующее оси y , и по y — уравнение, соответствующее оси z , и вычитая второе из первого, находим

$$\frac{d}{dz} \frac{\delta v}{\delta t} - \frac{d}{dy} \frac{\delta w}{\delta t} = 0 \dots \quad (5)$$

Выполняя дифференцирование и обращаясь к уравнениям (1) и к условию несжимаемости

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0, \quad (6)$$

находим

$$\frac{\delta x}{\delta t} = \alpha \frac{\partial u}{\partial x} + \beta \frac{\partial u}{\partial y} + \gamma \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (7)$$

Пусть теперь вихревая линия проведена в жидкости так, чтобы она всегда начиналась в одной и той же части жидкости. Компоненты скорости в данной точке суть u , v , w . Найдем компоненты скорости точки движущейся вихревой линии в расстоянии ds от данной точки, где

$$ds = \omega d\sigma. \quad (8)$$

Координаты этой точки суть

$$x + \alpha d\sigma, \quad y + \beta d\sigma, \quad z + \gamma d\sigma, \quad (9)$$

а компоненты ее скорости

$$u + \frac{\delta x}{\delta t} d\sigma, \quad v + \frac{\delta \beta}{\delta t} d\sigma, \quad w + \frac{\delta \gamma}{\delta t} d\sigma. \quad (10)$$

Рассмотрим первую из этих слагающих. В силу уравнения (7) мы можем написать ее так:

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} \alpha d\sigma + \frac{\partial u}{\partial y} \beta d\sigma + \frac{\partial u}{\partial z} \gamma d\sigma, \quad (11)$$

или

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{d\sigma} d\sigma + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{d\sigma} d\sigma + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{dz}{d\sigma} d\sigma, \quad (12)$$

или

$$u + \frac{du}{d\sigma} d\sigma. \quad (13)$$

Но это есть выражение значения компонента u скорости самой жидкости в данной точке, и то же можно доказать и относительно других компонент.

Итак, скорость второй точки вихревой линии тождественна скорости жидкости в данной точке. Другими словами, вихревая линия следует вместе с жидкостью, и всегда состоит из одного и того же ряда жидких частиц. Следовательно, вихревая линия не есть просто математический символ, но имеет физическое существование, непрерывное во времени и в пространстве.

Дифференцируя уравнения (1) по x , y и z и, складывая результаты, получаем уравнение

$$\frac{d\alpha}{dx} + \frac{d\beta}{dy} + \frac{d\gamma}{dz} = 0. \quad (14)$$

Это — уравнение одного вида с уравнением (6), выражающим условие течения жидкости, имеющей постоянную плотность. Следовательно, если вообразим себе жидкость, совершенно независимую от первоначальной жидкости, для которой компоненты скорости суть α , β , γ , то воображаемая жидкость будет течь без изменения ее плотности.

Представим себе теперь замкнутую кривую в пространстве, и пусть проведены вихревые линии из каждой ее точки в обе стороны. Эти вихревые линии образуют трубчатую поверхность, называемую вихревой трубкой или вихревой нитью. Так как воображаемая жидкость течет по вихревым линиям без изменения плотности, то количество, протекающее в единицу времени через какое угодно сече-

ние одной и той же вихревой трубки, должно быть одинаково. Следовательно, для всякого сечения вихревой трубки произведение площади сечения на среднюю скорость вращения одно и то же. Это количество называется *напряжением* вихревой трубки.

Вихревая трубка не может начинаться или оканчиваться внутри жидкости; в самом деле, если бы это было, то воображаемая жидкость, компоненты скорости которой суть α , β , γ , происходила бы из ничего при начале трубки и обращалась бы в ничто при ее конце. Стало быть, если трубка имеет начало и конец, то они должны лежать на поверхности жидкой массы. Если жидкость беспределльна, то вихревая трубка должна быть бесконечна или же должна быть замкнутой.

Итак, относительно конечной вихревой трубки в бесконечной жидкой массе мы приходим к следующим замечательным теоремам: 1) Трубка замкнута, образуя замкнутое кольцо. Мы можем, следовательно, назвать ее *вихревым кольцом*. 2) Она всегда состоит из одних и тех же частей жидкости. Следовательно, ее объем не изменяется. 3) Напряжение ее всегда одно и то же. Следовательно, скорость вращения в некотором сечении изменяется обратно пропорционально площади этого сечения, а скорость некоторого сегмента изменяется прямо пропорционально длине сегмента. 4) Если какая-либо часть жидкости не находилась первоначально в состоянии вращательного движения, то она никогда не может прийти в такое состояние; если же часть жидкости находится в состоянии вращения, то это вращение никогда не может прекратиться. 5) Вихревая трубка никогда не может пройти через другую вихревую трубку или через какой-либо из своих собственных витков. Следовательно, если две вихревые трубки сцепляются одна с другой, то их никогда нельзя разъединить и, если вихревая трубка образует узел, то он никогда не может быть развязан. 6) Движение в некоторый момент каждой части жидкости, заключающей вихревые кольца, можно точным образом представить себе, вообразив, что некоторый электрический ток занимает место каждого вихревого кольца, причем сила тока пропорциональна напряжению кольца. Магнитная сила в некоторой точке пространства будет, следовательно, представлять, по направлению и величине, скорость жидкости в соответствующей точке жидкости.

Эти свойства вихревых колец подали сэру В. Томсону * мысль о возможности построить, основываясь на них, новую форму атомистической теории. Условия, которым должен удовлетворять атом, суть постоянство величины, способность к внутреннему движению или к колебанию и достаточное число возможных признаков, которые позволяли бы объяснять различие между атомами разного рода.

Мельчайшее твердое тело, которое воображал Лукреций и принял Ньютон, было изобретено с явной целью объяснить постоянство свойств тел. Но это предположение отказывается служить, если мы захотим дать себе отчет в колебаниях молекулы, которые обнаруживает спектроскоп. В самом деле, мы можем предположить, что атом — это тело упругое, но это значило бы наградить его тем самым свойством, для объяснения которого, как свойства сложных тел, и было первоначально допущено атомистическое строение тел. Обладающие массой центры сил, которые воображал себе Бошкович, можно было бы рекомендовать скорее математику, который не колеблясь приписал бы им свойства притяжения и отталкивания, согласно некоторому закону расстояния, какой заблагорассудилось бы ему допустить. Такие силовые центры, без сомнения, по природе своей неделимы, но взятые в отдельности, они также неспособны к колебанию. Чтобы получить колебания, мы должны вообразить молекулы, состоящие из нескольких таких центров, но вместе с этим опять вводится возможность полного разделения этих центров. Кроме того, было бы мало научным приемом, вводя атомы как раз для того, чтобы освободиться от сил, действующих на заметных расстояниях, сделать единственной функцией атомов действие на весьма малых расстояниях.

С другой стороны, вихревое кольцо Гельмгольца, которое Томсон представляет себе как истинную форму атома, в большей мере удовлетворяет этому условию, нежели какой-либо из атомов, какие воображали доселе. Во-первых, оно количественно неизменно в отношении его объема и напряжения — двух независимых количеств. Оно неизменно и качественно — в отношении степени сложности его внутреннего строения: будет ли это замкнутый «узел» или «соединение в цепь» с другими вихревыми кольцами.

* «On Vortex Atoms» (О вихревых атомах). «Proc. Roy. Soc. of Edinburgh», 18 Febr., 1867.

Вместе с тем оно способно к бесконечным изменениям формы и может совершать колебания различных периодов подобно молекуле. И число существенно различных сцеплений вихревых колец может быть весьма велико, причем нет надобности в допущении весьма высокой степени сложности какого-либо из них.

Но высшее, с философской точки зрения, достоинство этой теории состоит в том, что ее успех в объяснении явлений не зависит от искусства, с каким ее авторы будто бы «спасают внешние приличия», вводя то одну гипотетическую силу, то другую. Раз вихревой атом пришел в движение, все его свойства абсолютно устанавливаются и определяются законами движения основной жидкости, которые вполне выражаются основными уравнениями. Ученик Лукреция может рассекать и разрезать свои твердые атомы в чайнии, что этим он содействует их соединению для образования миров; последователь Бошковича может придумывать новые законы силы, сталкиваясь с требованиями каждого нового явления; но тот, кто дерзнет вступить на путь, открытый Гельмгольцем и Томсоном, не обладает этими средствами. Его основная жидкость не обладает иными свойствами, кроме инерции, неизменной плотности и совершенной подвижности, а способ, каким можно следить за движением этой жидкости, есть чистый математический анализ. Трудности этого метода невероятны, зато слава победы над ними — в своем роде единственная.

Кажется, не может быть сомнения, что столкновение между двумя вихревыми атомами, по общему своему характеру, будет подобно уже описанному столкновению. В самом деле, встреча двух колец дыма в воздухе дает весьма ясное доказательство упругости вихревых колец.

Но одно из первых, если не самое первое, требование полной теории материи есть объяснение, во-первых, массы и, во-вторых, тяготения. Объяснить массу — это может показаться предприятием абсурдным. Мы вообще предполагаем, что сущность материи — быть носителем количества движения и энергии, и даже Томсон, в определении своей основной жидкости, приписывает ей обладание массой. Однако, согласно Томсону, хотя основная жидкость и есть единственная истинная материя, но то, что мы называем материей, не есть сама основная жидкость, а способ движения этой основной жидкости. Вихревое кольцо и есть этот способ движения, и оно являет нам

пример постоянства и непрерывности существования, которые мы привыкли приписывать самой материи. Основная жидкость, эта единственная истинная материя, совершенно недоступна нашим чувствам, если она не наделена способом движения, превращающим известные ее участки в вихревые кольца и таким образом делающим ее молекулярной.

Следовательно, в теории Томсона масса тел требует объяснения. Нам нужно объяснить инерцию чего-то, что есть лишь способ движения, инерция же есть свойство материи, а не способа движения. Хотя вихревое кольцо во всякое данное мгновение обладает определенной энергией и количеством движения, но показать, что тела, построенные из вихревых колец, обладают таким количеством движения и энергией, какие мы в них находим, при настоящем состоянии теории — задача весьма трудная.

От теории, находящейся еще в периоде младенчества, трудно требовать объяснения тяготения. Со времен Ньютона учение о тяготении было принято и развивалось, пока мало-помалу не приобрело характера скорее исходного факта, нежели факта, подлежащего объяснению.

Кажется сомнительным, рассматривал ли Лукреций тяготение как существенное свойство материи, что, по-видимому, он утверждает в следующих замечательных строках:

Если б клубок шерстяной вещество заключал в себе то же,
Как и свинцовый комок, то и вес был бы равный в обоих,
Так как свойственно каждому телу надавливать книзу.
«О природе вещей» (I, 359—361)

Такое истинное мнение Лукреция, и если падение атомов книзу происходит, по его мнению, вследствие их собственной тяжести, то кажется весьма сомнительным, приписывал ли он вес видимых тел ударам атомов. Последнее мнение принадлежит женевицу Лесажу, который изложил его в своем «*Lucrèce Newtonien*» и в «*Traité de Physique Mécanique*», опубликованном Пьером Прево в Женеве в 1818 г.* Теория Лесажа состоит в том, что тяготение тел друг к другу обуславливается ударами потоков атомов, летящих в пространстве по всем направле-

* См. также «*Constitution de la Matière*», etc., par le P. Leroy, P., 1869.

ниям. Эти атомы он называет внемировыми корпускулами, так как представляет себе, что они прилетают со всех сторон из пространств, лежащих за пределами той части системы мира, которая нам сколько-нибудь известна. Он представляет себе их настолько малыми, что соударение их с другими внемировыми корпускулами есть событие, случающееся крайне редко. Ударяясь о молекулы обычной материи, они и вызывают стремление тел идти навстречу друг другу. Тело, находящееся в свободном пространстве и предоставленное ударам этих корпускул, получает толчки во всех направлениях, но так как вообще в него попадает столько же ударов с одной стороны, сколько и с другой, то оно не может приобрести, таким образом, ощутимой скорости. Но если имеются два тела в пространстве, то каждое будет служить другому экраном, заграждающим некоторую часть тела, куда удары корпускул попадать не будут, так что поверхности тел, обращенные друг к другу, будут испытывать меньшее число ударов, между тем как число корпускул, ударяющих в других направлениях, остается то же самое.

Таким образом, каждое тело будет испытывать побуждение двигаться по направлению к другому действием избытка ударов, падающих на более отдаленные друг от друга стороны тел. Если принять во внимание удары только тех корпускул, которые прибыли из бесконечного пространства, и оставить без внимания те, которые уже ударили в мировые тела, то легко вычислить результат действия их на оба тела, полагая, что размеры тел малы сравнительно с расстоянием между ними. Сила притяжения будет прямо пропорциональна произведению площадей сечения тел, нормальных к расстоянию, и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Но притяжение тяготения изменяется прямо пропорционально произведению масс тел, между которыми оно действует, и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Если поэтому можно вообразить, что строение тел таково, что эффективные площади тел пропорциональны их массам, то оба закона будут совпадать. Итак, в этом, по-видимому, и заключается путь, ведущий к объяснению закона тяготения, и если можно будет показать, что он и в других отношениях совместим с фактами, то он может явиться широкой дорогой в самые таинственные области науки.

Сам Лесаж показывает, что для того чтобы эффективная поверхность тела, благодаря которой оно действует на потоки внемировых корпускул подобно экрану, была пропорциональна массе тела, будет ли оно велико или мало, мы должны допустить, что размеры твердых атомов тела чрезвычайно малы в сравнении с расстояниями между ними, так что только весьма малая доля корпускул задерживается даже самыми плотными и самыми большими телами. Мы можем представить себе, что потоки корпускул, летящих во всех направлениях, подобны свету, испускаемому равномерно освещенным небом. Можно представить себе, что материальное тело состоит из скопищ атомов, находящихся на значительных друг от друга расстояниях, вроде роя насекомых, летающих в воздухе. Наблюдателю, смотрящему на него с некоторого расстояния, этот рой будет казаться легким потемнением неба на некотором участке. Это затемнение и представляет собой действие материального тела, задерживающего полет корпускул. Если часть света, задерживаемого роем, весьма мала, то два таких роя задержат почти то же самое количество света, будут ли они на одной прямой с глазом или нет; но если один из них задерживает заметную часть света, то другому уже не придется задержать столько же, и эффект двух роев на одной линии с глазом будет меньше суммы двух эффектов в отдельности.

Но мы знаем, что действие притяжения Луны Солнцем и Землей не различается заметно, рассматривать ли Луну во время затмения или когда затмения нет. Отсюда следует, что число корпускул, задерживаемых телами, имеющими размеры и массы Земли и даже Солнца, весьма невелико в сравнении с числом корпускул, прямо проходящих сквозь Землю или сквозь Солнце, не встречая ни одной молекулы. Для потоков корпускул Земля и Солнце являются просто системами рассеянных в пространстве атомов и представляют собой скорее отверстия, нежели преграды их прямолинейному полету.

Такова остроумная доктрина Лесажа, посредством которой он стремится объяснить всемирное тяготение. Попытаемся сделать подсчет этой непрерывной бомбардировки внемировых телесц, со всех сторон летящих на нас.

Мы видели, что Солнце задерживает лишь весьма малую долю корпускул, в него входящих. Земля, которая еще

меньше, задержит еще меньшую долю их. Часть, задерживаемая малым телом, например фунтовым ядром, будет неизмеримо меньше, ибо толщина этого тела чрезвычайно мала сравнительно с Землею.

Вес ядра, или его стремление к Земле, согласно этой теории, производится избытком ударов корпускул, идущих сверху, над ударами, идущими снизу и производимыми корпускулами, прошедшими сквозь Землю. Каждое из этих количеств представляет собой чрезвычайно малую долю количества движения всего числа корпускул, проходящих сквозь ядро в секунду, а их разность есть малая доля каждого и, однако, она эквивалентна весу фунта. Скорость корпускул должна быть громадна сравнительно со скоростью какого угодно из небесных тел, иначе, как легко можно показать, они действовали бы как сопротивляющаяся среда, противодействующая движению планет. Но энергия движущейся системы равна половине произведения ее количества движения на скорость. Следовательно, энергия корпускул, своими ударами в шар в течение секунды, побуждающих его двигаться к земле, должна выражаться числом футо-фунтов, равным числу футов, которое корпускула проходит в секунду, т. е. не менее тысяч миллионов. Но это лишь малая доля энергии всех ударов, получаемых атомами шара от бесчисленных потоков корпускул, падающих на него со всех сторон.

Следовательно, скорость затраты энергии корпускул на поддержание в одном фунте свойства тяготения по меньшей мере выражается миллионами миллионов футо-фунтов в секунду.

Что же делается с этим громадным количеством энергии? Если бы корпускулы, ударяясь об атомы, отлетали со скоростью, равной той, какой они до того обладали, они уносили бы с собой свою энергию обратно во внемировое пространства. Но если это имеет место, то корпускулы, отскакивающие от тела в некотором данном направлении, будут и по числу и по скорости в точности эквивалентны тем, которые в этом направлении не пойдут, будучи отклонены телом, и можно показать, что так будет, каков бы ни был вид тела и сколько бы тел ни находилось в поле. Итак, отталкивающиеся корпускулы вполне компенсируют собой корпускулы, отклоняемые телом, и избытка ударов на некоторое другое тело в том или ином направлении не будет.

Следовательно, объяснение тяготения теряет почву, если корпускулы подобны совершенно упругим шарам и отскакивают со скоростью разъединения, равной скорости при сближении. С другой стороны, если они отскакивают с меньшей скоростью, то действие притяжения между обоими телами несомненно будет иметь место, только теперь нужно будет определить, что делается с энергией, которую корпускулы принесли с собой, но не унесли обратно.

Если бы некоторая ощутимая доля этой энергии сообщилась телу в форме теплоты, то количество теплоты, таким образом порожденной, в несколько секунд нагрело бы тело, а подобно этому и всю материальную Вселенную до белого каления.

Сэр В. Томсон высказал мнение, что корпускулы могут иметь такое строение, что уносят с собой свою энергию, если предположить, что часть их кинетической энергии во время соударения превращается из энергии поступательного движения в энергию вращения или колебания. Но тогда корпускулы должны уже быть не просто точками, а материальными системами. Томсон считает их вихревыми атомами, при соударении приходящими в состояние колебания и уходящими с меньшей поступательной скоростью, но в состоянии сильного колебания. Он предполагает также, что вихревая корпускула может снова вернуть свою скорость и потерять часть колебательного движения при встрече с родственными себе корпускулами в бесконечном пространстве.

Мы посвятили этой теории больше места, нежели, по видимому, она заслуживает, потому что она остроумна и потому что это — единственная теория о причине тяготения, которая была настолько подробно развита, что было возможно обсуждать аргументы за и против нее. Видимо, она не может объяснить нам, почему температура тел остается умеренной, между тем как их атомы выдерживают подобную бомбардировку. Температура тел должна стремиться приблизиться к такому значению, при котором средняя кинетическая энергия молекулы тела равнялась бы средней кинетической энергии внемировой корпускулы.

Положим теперь, что существует плоская поверхность, задерживающая все корпускулы. Давление на эту плоскость будет $p = NMu^2$, где M — масса корпускулы, N — число корпускул в единице объема и u — скорость кор-

пускулы, нормальная к плоскости. Мы знаем, что наибольшее давление, существующее во Вселенной, должно быть гораздо меньше этого давления p , которое испытывало бы тело, задерживающее все корпускулы. Таким образом, мы можем быть уверены, что N — число корпускул, находящихся в некоторый момент времени в единице объема, невелико сравнительно со значением N для молекул обыкновенных тел. Следовательно, Mu^2 должно быть громадно по сравнению с соответствующим количеством для обыкновенных тел, а отсюда следует, что удар корпускул должен нагревать все тела до чрезвычайно высокой температуры. Итак, согласно этой теории, обитаемая Вселенная, на которую мы привыкли смотреть как на сцену, где замечательным образом подтверждается закон сохранения энергии, как основной принцип всей природы, в действительности, что касается рабочего порядка в ней, поддерживается исключительно гигантскими затратами на нее внешней силы, которая неизбежно должна была бы истощаться, если бы средства не доставлялись извне из бесконечного пространства, и которая, если соображения наиболее выдающихся математиков могут в каком-либо отношении оказаться несостоятельными, может в любое мгновение разнести на атомы всю Вселенную.

Но оставим эти умозрения о природе молекул и о причине тяготения и рассмотрим материальный мир как здание, составленное из молекул. Каждая молекула, насколько мы знаем, относится к одному из определенного числа видов. Список химических элементов можно считать перечнем известных видов, которые были изучены в лабораториях. Некоторые из них были открыты посредством спектроскопа, и еще многие могут быть открыты тем же путем. Спектроскоп был также применен к анализу света Солнца, более ярких звезд и некоторых туманностей и комет и показал, что свет, испускаемый этими телами, в некоторых случаях подобен свету, излучаемому земными молекулами, а в других — свету, из которого молекулы поглотили некоторые лучи. Таким путем удалось проследить множество совпадений между системами линий, относящихся к известным земным веществам, и соответствующими линиями в спектрах небесных тел.

Значение свидетельств, доставляемых такими совпадениями, можно оценить, рассматривая степень точности, с какой такие совпадения могут быть наблюдаемы. Про-

межутков между двумя линиями, составляющими Фраунгоферову линию D , достигает $5/100$ промежутка между B и G на шкале Кирхгофа. Разницу между положениями двух линий, простирающуюся до $1/10$ этого промежутка, т. е. до $5/1000$ длины яркой части спектра, можно легко заметить в спектроскопы умеренной силы. Разрешающую способность спектроскопа можно определить, сосчитав, сколько раз наименьший измеримый промежуток содержится в длине видимого спектра. Обозначим ее буквой p . В предположенном нами случае p равно приблизительно 5000.

Если солнечный спектр содержит n линий известной степени напряжения, то вероятность, что какая-либо линия спектра газа совпадает с одной из этих линий, равна

$$1 - \left(1 - \frac{1}{p}\right)^n = \frac{n}{p} \left(1 - \frac{n-1}{2} \cdot \frac{1}{2} + \dots\right),$$

и если p по сравнению с n велико, это выражение приблизительно даст n/p . Если в спектре газа r линий, то вероятность, что каждая из них будет совпадать с одной из линий солнечного спектра, будет приблизительно n^r/p^r . Следовательно, в случае газа, спектр которого содержит несколько линий, мы должны сравнить результаты двух гипотез. Если на Солнце существует большое количество этого газа, то у нас имеются сильнейшие основания ожидать, что все эти r линий будут найдены в солнечном спектре. Если его нет, то вероятность, что r линий из n наблюдаемых линий совпадут с линиями газа, чрезвычайно мала. Если, следовательно, мы найдем в солнечном спектре все r линий на свойственных им местах, то у нас будут самые веские основания к допущению, что этот газ на Солнце существует. Вероятность, что газ на Солнце существует, весьма увеличивается, если линии своей относительной интенсивностью и шириной соответствуют в обоих спектрах.

Отсутствие одной или нескольких линий газа в солнечном спектре вообще ослабляет эту вероятность, но количество, выводимое из вероятности, зависит от того, что нам известно об изменении относительной интенсивности линий, если температура и давление газа изменять.

Наблюдаемые совпадения линий нескольких земных веществ с несколькими системами линий в спектрах небес-

ных тел увеличивают свидетельства в пользу учения, что земные вещества существуют в небесных телах, между тем как открытие в спектрах небесных тел особых линий, не совпадающих ни с одной линией спектров земных тел, не может слишком пошатнуть общего аргумента, а скорее только укажет или что в составе небесного тела существует вещество, еще не открытое химиками на Земле, или что температура небесного тела такова, что вещество, неразложимое нашими средствами, там распалось на компоненты, неизвестные нам в изолированном состоянии.

Таким образом, мы пришли к представлению, что в далеко отстоящих частях видимой Вселенной существуют молекулы разного рода, причем различные периоды колебания молекул каждого рода или тождественны или так близки к тождеству, что наши спектроскопы не обнаруживают никакой разницы в них. Отсюда мы можем заключить, что эти молекулы подобны друг другу и во всех других отношениях, как, например, в отношении массы. Но для нашей настоящей цели достаточно заметить, что молекула одного и того же рода, например молекула водорода, имеет один и тот же ряд периодов колебаний, возьмем ли мы водород из воды, из каменного угля или из метеоритного железа, и что свет с тем же рядом периодов колебаний долетает до нас от Солнца, от Сириуса и от Арктура.

Такого же рода рассуждения, как и те, что привели нас к убеждению о существовании водорода на Солнце и на звездах, приводят нас к убеждению и в том, что молекулы водорода во всех этих телах имеют общее происхождение. В самом деле, материальная система, способная к колебаниям, может иметь какой угодно ряд периодов колебаний. Следовательно, вероятность, что две материальные системы, совершенно друг от друга независимые, будут иметь один и тот же ряд периодов колебания, при высокой точности современных спектроскопических измерений так мала, что мы вынуждены допустить, что обе эти системы не независимы друг от друга. Если бы вместо двух таких систем у нас было бесчисленное множество с тем же рядом периодов, то аргумент усилился бы чрезвычайно.

Итак, допустив, что существует родство между любыми двумя молекулами водорода, мы рассмотрим, в чем оно может заключаться.

Можно представить себе взаимодействие двух тел, стремящихся к уподоблению одного другому. Так, двое маят-

никовых часов, соединенных деревянным стержнем, будут идти синхронно, хотя, в случае отсоединения, их ход отличен. Но если молекулы могли бы даже изменять свои свойства, подобно часам, то между Сириусом и Арктуром нет никакой физической связи соответствующего рода.

Большое число предметов, отличных друг от друга, можно разложить в сорта так, что в каждом сорте будут более или менее однородные. При изготовлении дробы ей дают скатываться с наклонной плоскости. Крупные дробинки приобретают большую скорость и падают дальше, чем мелкие. Так сортируются шарики по величине; в один сорт попадают шарики почти одинакового размера, а те, которые сверх допустимой величины, отклоняются от сферической формы и отбрасываются.

Если первоначально молекулы были бы так же разнообразны, как и дробинки и затем рассортированы, то нам пришлось бы объяснить исчезновение всех тех молекул, которые не подходят под один из весьма ограниченного числа известных нам сортов; а освободиться от некоторого числа неразрушимых тел означало бы решить одну из труднейших задач космогонии.

Известно, что можно сгруппировать живые существа в некоторое число видов, более или менее точно определенных, и что трудно или невозможно найти звенья, образующие непрерывную цепь между ними. Однако всегда появляются индивиды, отличающиеся от своих родителей. Каждый индивидуум в течение своей жизни изменяется и либо выживает и продолжает свой род, либо преждевременно умирает, в зависимости от большей или меньшей приспособленности к окружающей среде. Это позволило создать теорию происхождения видов путем естественного отбора. Но эволюционная теория неприменима к молекулам, ибо отдельные молекулы не рождаются и не умирают, не имеют ни родителей, ни потомства и столь мало подвержены влиянию окружающей среды, что две водородные молекулы имеют тождественные свойства, хотя одна из них лежала тысячелетия в каменном угле под землей, а другая была «окклюдирована» в железе метеорита и попала в руки земного химика после бесконечных странствий в небесных пространствах.

Процессы, распределившие молекулы по отдельным сортам, не из тех, аналоги которым мы могли бы найти в настоящее время, и мы не имеем о них никакого пред-

ставления. Если мы предположим, что известные нам молекулы построены из ограниченного числа совершенно одинаковых атомов, то мы должны будем приписать ограниченное число сортов молекул ограниченному числу комбинаций атомов, образующих стойкую систему. Если мы примем теорию Бошковича, утверждающую, что первоначальный атом — просто силовой центр, имеющий некоторую определенную массу, то мы можем обойти трудность, возникающую из-за равенства масс всех атомов, допустив — что не противоречит опыту, — что масса не может изменяться непрерывно в сторону увеличения или уменьшения, а что она, по своей природе, дискретна, подобно числу, и что масса атома — единица и все массы суть кратные этой единицы. У нас нет доказательств, что отношение каких-либо двух масс может быть несоизмеримым; в геометрии же несоизмеримость величин — следствие предположения о непрерывности. Если материя построена из атомов, т. е. дискретна, то она непригодна для идеальных геометрических моделей, но в остальном может выполнять свои функции.

По этой теории, равенство масс различных атомов не есть результат какого-то механизма количественного приспособления, а зависит от самой природы массы. Однако соответствие периодов колебаний существующих молекул — факт иного порядка.

Известно, что существует излучение со всевозможными частотами как внутри видимого спектра, так и за пределами его в обе стороны. Самый сильный спектроскоп не может обнаружить прерывности в спектре раскаленной извести. Частота колебаний светящейся частицы, следовательно, сама по себе может принимать значения, если не непрерывные в математическом смысле слова, все же не отличающиеся друг от друга менее чем на одну десятитысячную. Значит, сама природа времени позволяет молекуле колебаться с любой из многих тысяч различных наблюдаемых частот.

Частота колебаний отдельной частицы определяется соотношением между соответствующим смещением и вызываемой им силой возврата, в которое входят постоянные пространства, времени и массы.

Рассмотрим теперь это равенство постоянных пространства и времени для всех молекул одного сорта. Мы видели, что различные условия, в которых находились эти

молекулы одного рода, даже в течение многих столетий, не привели к заметной разнице в значении этих постоянных. Но если различные процессы в природе с начала мира не смогли привести к какой-либо заметной разнице, то мы должны заключить, что однообразие этих постоянных не есть следствие каких-либо естественных процессов.

Итак, образование молекул — явление, несвойственное нашему времени. Насколько известно, оно не совершается ни на Земле, ни на Солнце, ни в звездах, ни теперь, ни с тех пор, как эти тела образовались. Мы должны его отнести к той эпохе, когда образовались существующие законы природы, и пока не распадутся не только эти тела, но и существующие законы природы, у нас нет оснований ожидать повторения подобного процесса.

При современном состоянии науки мы имеем серьезное основание допустить, что в молекуле или в одном из составляющих ее атомов есть нечто существующее вечно, или по крайней мере с эпохи, предшествующей возникновению законов природы. Но, кроме данного атома, существуют неисчислимы другие атомы того же рода, и их постоянные невозможно изменить никаким способом. Каждый из них физически независим от всех остальных.

Противоречива внутренне или нет концепция множества тел, существующих извечно, но во всяком случае эта концепция становится абсурдной, когда мы приписываем этим телам количественное равенство. Таким образом, мы вынуждены исследовать, нет ли некоторой общей причины или общего происхождения, объясняющих это странное равенство, вместо одного из бесчисленно возможных неравенств.

Наука не может рассуждать о сотворении материи из ничего. Допустив, что материя должна создаваться, так как она не может быть вечной, мы достигли предела наших мыслительных способностей. Лишь рассматривая ту форму, в которой фактически существует материя, а не материю саму по себе, наш разум может за что-то ухватиться.

То, что материя, как таковая, непременно должна иметь определенные свойства — существовать непрерывно в пространстве и времени, что всякое действие есть взаимодействие между двумя частями материи и т. д. — истины такого порядка, которые метафизики считают не-

избежными. Мы можем использовать эти истины для целей дедукции, но они ничего не дают для размышления об их происхождении.

Однако равенство постоянных молекул — факт совсем иного порядка. Оно происходит от особого распределения материи — от расстановки, по выражению д-ра Чалмерса, и мы легко можем представить себе иную расстановку. Некоторые обычные формирования суть приспособления постоянных, не только произвольные по своей природе, но подвергающиеся действительно изменениям; когда указывают, что эти изменения благоприятствуют жизни живых существ и имеют благотворное значение, можно возразить, что те изменения, которые не способствуют росту и размножению, ведут к уничтожению живых существ и тем самым — к устранению доказательств существования неблагоприятных мутаций.

Но атом, насколько нам известно, не подвержен каким-либо опасностям в борьбе за существование. Можно, конечно, привести основательные доводы, что если бы постоянные атомы существенно отличались, то тела, образованные такими атомами, не были бы столь пригодными для построения мира, как те, которые фактически существуют. Но это лишь предположение, ибо мы не знаем тел, составленных подобными изменчивыми атомами.

Учитывая однообразие атомов, сэр Д. Гершель сравнивал их с фабричными изделиями. Однообразие последних диктуется весьма различными соображениями фабрикантов. В некоторых случаях, во избежание лишних издержек и забот, выгоднее выпускать большое количество совершенно одинаковых изделий, чем приспособливать каждый из них к специальному назначению. Так, солдатскую обувь изготовляют массовым способом, а не по мерке ног отдельного солдата. В некоторых других случаях это однообразие фабричных изделий делает их более ценными. Так, болты Витворта имеют лишь определенные размеры и в случае потери легко заменяются без дополнительной подгонки. Тожество книг и копий документов имеет важное практическое значение и лучше обеспечивается печатанием, чем ручной перепиской. В-третьих, некоторым предметам придает ценность лишь их точное соответствие определенному образцу. Сюда относятся веса и меры, и наличие в стране нескольких хорошо проверенных эталонов весов и мер свидетельствует о наличии законов, регу-

лирующих деловые отношения в соответствии с национальными стандартами.

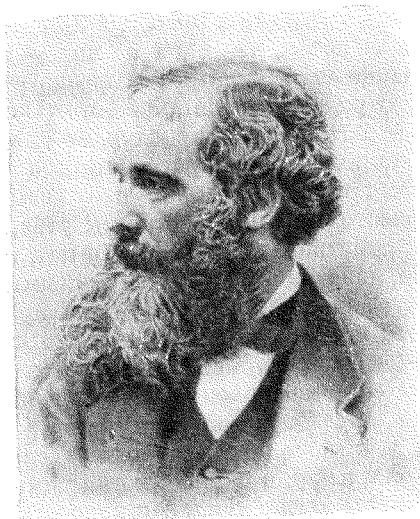
Итак, ценность фабричных изделий зависит от трех качеств: дешевизны, пригодности и точности. Какое из этих трех качеств имел в виду сэр Д. Гершель, сейчас достоверно установить мы не можем, но вернее — что последнее, а не первое, хотя кажется правдоподобным, что он подразумевал невозможность извечного существования совершенно одинаковых тел и, следовательно, необходимость их сотворения; тогда выражение «фабричные изделия» может означать, что они были сотворены в большом количестве.

Притяжение

Ежедневное наблюдение показывает, что различные части материальной системы влияют одна на движение другой. В некоторых случаях нам не удастся открыть никакой материальной связи, которая простиралась бы от одного тела к другому. Эти случаи мы называем действием на расстоянии, в отличие от тех случаев, где мы можем проследить существование между телами непрерывной материальной связи. Взаимное действие между телами называется напряжением. Когда взаимное действие стремится сблизить тела или помешать им отделиться друг от друга, оно называется натяжением или притяжением. Когда оно стремится отделить одно тело от другого или помешать их сближению, оно называется давлением или отталкиванием. Названия «натяжение» и «давление» употребляются, когда действие видимо совершается чрез некоторую среду. Названия «притяжение» и «отталкивание» применяются в случаях действия на расстоянии. Конфигурацию материальной системы всегда можно определить посредством взаимных расстояний частей системы. Всякое изменение конфигурации должно изменить одно или несколько из этих расстояний. Таким образом, сила, производящая подобное изменение или ему противодействующая, может быть разложена на притяжение или отталкивание между теми частями системы, расстояние между которыми изменилось.

Существует множество гипотез о причине таких сил, причем предполагается, что одна из них — давление между соприкасающимися телами — гораздо более понятна, нежели всякого рода иные напряжения. Поэтому сделано было немало попыток сведения случаев кажущегося притяжения и отталкивания на расстоянии к случаю давления. Одно время предполагалось, что возможность притяжения на расстоянии опровергается утверждением, что тело не может действовать там, где его нет, и что, следовательно, всякое действие между различными частями материи должно происходить посредством прямого прикосновения. На это возражали, что у нас нет никаких свидетельств, чтобы между двумя телами всегда имело место действительное соприкосновение и что на деле, когда тела давят друг на друга и, по-видимому, соприкасаются, мы можем иногда действительно измерить отделяющее их расстояние, как, например, в случае, когда один кусок стекла лежит на другом и когда нужно приложить значительное давление, чтобы поверхности их сблизить настолько, чтобы появилось черное пятно в ньютоновых кольцах, указывающее на то, что расстояние достигает почти одной десяти тысячной миллиметра. Если, желая освободиться от идеи действия на расстоянии, мы вообразим себе материальную среду, через которую действие передается, то все, что мы при этом делаем, есть не более как замена одного действия на большом расстоянии рядом действий на меньших расстояниях между частями среды, так что и таким путем мы не можем освободиться от действия на расстоянии.

В последнее время изучение взаимного действия между частями материальной системы было значительно упрощено введением понятия энергии системы. Энергия системы измеряется количеством работы, которую она может совершить, преодолевая внешние сопротивления. Эта энергия зависит от конфигурации в данный момент и от движения системы, а не от того способа, каким система приобрела данную конфигурацию и движение. Если мы вполне знаем, каким образом энергия системы зависит от ее конфигурации и движения, то этого достаточно для определения всех сил, действующих между частями системы. Например, если система состоит из двух тел и если энергия зависит от расстояния между ними, то если при увеличении расстояния энергия увеличивается, то между телами должно существовать притяжение, а если



Д. К. Максвелл

при увеличении расстояния энергия уменьшается, то между ними должно быть отталкивание. В случае двух тяготеющих масс m и m' , находящихся на расстоянии r , часть энергии, зависящая от r , есть $-\frac{mm'}{r}$. Тот факт, что между

обоими телами существует притяжение, мы можем выразить, сказав, что энергия системы, состоящей из двух тел, увеличивается, когда их расстояние увеличивается. Следовательно, вопрос, почему два тела притягивают друг друга, можно выразить другим способом. Почему энергия системы увеличивается, когда расстояние увеличивается?

Но мы должны помнить, что научное или научно-плодотворное значение усилий, которые были сделаны, чтобы ответить на эти старые вопросы, должно измерять не надеждой получить окончательное решение, а тем, что они побуждают людей к тщательному изучению природы. Всякая постановка научных вопросов предполагает наличие научных познаний, и вопросы, которые занимают человеческий ум при современном состоянии науки, весьма вероятно, могут оказаться такими, что несколько большее развитие науки покажет нам, что ответ вообще невозможен. Научное значение вопроса, как действуют тела друг

на друга на расстоянии, нужно искать в стимуле, который этим вопросом был сообщен исследованиям о свойствах промежуточной среды.

Ньютон в своих «Principia» из наблюдаемых движений небесных тел выводит факт, что они притягивают друг друга по определенному закону. Он дает его как результат строго динамических умозаключений и при посредстве их показывает, каким образом не только более простые явления, но и все кажущиеся неправильности небесных движений могут быть предвычислены как следствия единого принципа. В своих «Principia» он ограничивается доказательством и развитием этого великого шага в науке о взаимодействии тел. Он ничего не говорит о том, почему именно тела тяготеют друг к другу. Но его ум на этом не успокаивается. Мы знаем, что он не верил в непосредственное действие тел на расстоянии.

«Непонятно, каким образом неодушевленная косная материя, без посредства чего-либо, что нематериально, могла бы действовать на другую материю без взаимного прикосновения, как это должно бы было иметь место, если бы тяготение в смысле Эпикура было присуще материи и с ней нераздельно... Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии, через пустоту, без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могут быть передаваемы от одного к другому — это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому прийти». (*Письмо к Бенгли*). И мы знаем также, что он думал найти механизм тяготения в свойствах эфирной среды, наполняющей всю Вселенную.

«Из его писем к Бойлю явствует, что таково было его давнишнее мнение, и если он не обнародовал его раньше, то это произошло только вследствие того, что, как он нашел, ему не удавалось из опыта и наблюдений дать удовлетворительных сведений об этой среде и о том, каким образом она действует, производя основные явления природы». *

* Сообщение Маклорена об открытиях сэра Исаака Ньютона.

В самом деле, в своих «Optical Queris» он показывает, что если давление этой среды меньше вблизи плотных тел, нежели на больших от них расстояниях, то эти плотные тела будут притягиваться друг к другу, и что если уменьшение давления обратно пропорционально расстоянию от плотного тела, то закон будет законом тяготения. Ближайший шаг, как он указывает, должен объяснить это неравенство давления в среде; и так как ему не удавалось сделать этого, то задачу объяснения причины тяготения он завещал следующим поколениям. Что касается тяготения, то в решении этой задачи со времен Ньютона не сделано почти никаких успехов. Фарадей показал, что передача электрической и магнитной силы сопровождается явлениями, происходящими в каждой части промежуточной среды. Он проследил ход силовых линий в среде, и он приписал им стремление укорачиваться и отделяться от соседних с ними линий, вводя, таким образом, идею о напряжении в среде в иной форме, нежели предполагал Ньютон; ибо в то время как ньютоновское напряжение было гидростатическим давлением по всем направлениям, фарадеевское напряжение есть натяжение вдоль силовых линий, соединенное с давлением во всех направлениях, нормальных к ним. Показав, что плоскость поляризации светового луча, проходящего через прозрачную среду в направлении магнитной силы, испытывает вращение, Фарадей не только доказал действие магнетизма на свет, но, воспользовавшись светом для обнаружения состояния намагниченности среды, он, по его собственному выражению, «осветил линии магнитной силы».

Впоследствии Томсон, основываясь на этом явлении, чисто динамическим рассуждением доказал, что передача магнитной силы сопровождается вращательным движением малых участков среды. В то же время он показал, каким образом центробежная сила, производимая этим движением, может объяснить магнитное притяжение.

Подобного рода теория с большими подробностями разработана в «Трактате об электричестве и магнетизме» Клерка Максвелла. Там показано, что если допустить, что среда находится в состоянии напряжения, состоящего из натяжений вдоль силовых линий и из давлений во всех направлениях, перпендикулярных к силовым линиям, причем натяжение и давление равны по числовой величине и пропорциональны квадрату силы поля в данной точке, то

это дает полный отчет о наблюдаемых электростатических и электромагнитных действиях.

Ближайший шаг состоит в том, чтобы объяснить это состояние напряжения в среде. В случае электромагнитной силы мы воспользовались способом рассуждения Томсона, примененным им для объяснения указанного выше открытия Фарадея. Мы допускаем, что малые участки среды вращаются вокруг осей, параллельных силовым линиям. Центробежная сила, вызываемая этим вращением, производит избыток давления, перпендикулярного к силовым линиям. Объяснение электростатического напряжения менее удовлетворительно, но не может быть сомнения в том, что теперь открыт путь, посредством которого мы можем приписать воздействию среды все силы, которые, подобно электрическим и магнитным силам, изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния и являются силами притягательными между телами разноименными и отталкивательными между телами одноименными.

Сила тяготения также обратно пропорциональна квадрату расстояния, но она отличается от электрического и магнитного взаимодействий тем, что тела, между которыми она действует, нельзя разделить на два противоположные рода, один — положительный, другой — отрицательный. В отношении тяготения они все одного рода, и сила, с которой они действуют друг на друга, всегда притягательная. Чтобы объяснить такую силу посредством напряжения в промежуточной среде способом, принятым для электрического и магнитного взаимодействий, мы должны допустить существование напряжения противоположного рода, по сравнению с тем, о чем шла речь выше. Мы должны предположить существование давления в направлении силовых линий, соединенного с натяжением во всех направлениях, лежащих под прямым углом к силовым линиям. Такое состояние напряжения объяснило бы наблюдателю эффект тяготения. Однако до сих пор нам не удалось придумать никакой физической причины для такого состояния напряжения. Легко вычислить, какое напряжение потребовалось бы, чтобы объяснить действительные действия тяжести на поверхности Земли. Потребовалось бы давление в 37 000 тонн на кв. дюйм в вертикальном направлении, соединенное с натяжением такой же численной величины во всех горизонтальных направ-

лениях. Следовательно, состояние напряжения, существующее, как мы должны предположить, в невидимой среде, в 3000 раз больше напряжения, какое может выдерживать самая прочная сталь.

Другая теория механизма тяготения, теория Лесажа, объясняющая его ударами «внемировых корпускул», была уже разобрана в статье «Атом».

Сэр Вильям Томсон * показал, что если предположить, что все пространство наполнено однообразной несжимаемой жидкостью, если, далее, предположить, что либо материальные тела всегда производят и испускают эту жидкость с постоянной скоростью, причем жидкость течет в бесконечность, либо что материальные тела всегда поглощают и уничтожают жидкость, причем недостающее количество пополняется притоком из бесконечного пространства, то в том и другом случаях имело бы место притяжение между всякими двумя телами, обратно пропорциональное квадрату расстояния. Напротив, если бы одно из тел испускало жидкости, а другое поглощало, то тела отталкивали бы друг друга.

Здесь, следовательно, мы имеем многообещающую гидродинамическую иллюстрацию действия на расстоянии, так как она позволяет показать нам, как тела одного и того же рода могут притягивать друг друга. Но эта концепция жидкости, постоянно вытекающей из тела без всякого пополнения откуда-либо извне или втекающей без всякого пути для выхода ее из тела, так противоречит всему нашему опыту, что гипотезу, существенной частью которой она является, нельзя назвать *объяснением* явления тяготения.

Роберт Гук, человек, одаренный необычайной изобретательностью, пытался в 1671 г. приписать причину тяготения волнам, распространяющимся в некоторой среде. Он нашел, что тела, плавающие на воде, приводимые в движение волнами, притягивались к центру возмущения **. Однако, кажется, он не исследовал этого наблюдения в такой мере, чтобы вполне определить действие волн на погруженное тело.

Профессор Чэллис исследовал математическую теорию действия волн сгущения и разрежения в упругой жидкости на погруженные в нее тела. Но трудности

* «Proceedings of the Royal Society of Edinburgh», 7 Febr., 1870.

** Posthumous Works, edited by R. Waller, p. XIV and 184.

исследования были так велики, что он не мог прийти ни к каким числовым результатам. Однако он приходит к заключению, что действием таких волн было бы притяжение тела к центру возмущения либо отталкивание его от этого центра, смотря по тому, будет ли длина волны весьма велика или она будет весьма мала сравнительно с размерами тела. Иллюстрации на практике действия таких волн были даны Гюйо, Шельбахом, Гютри и Томсоном*.

Приводят в колебание камертон и подносят к свободно подвешенному легкому телу. Тело тотчас же притягивается к камертону. Если подвесить сам камертон, то он, видимо, притягивается ко всякому соседнему телу.

Сэр В. Томсон показал, что это действие во всех случаях можно объяснить общим принципом, что в движущейся жидкости среднее давление имеет наименьшую величину там, где средняя энергия движения всего больше. Но волновое движение больше всего вблизи камертона, следовательно, давление здесь всего меньше; и так как давления на привешенное тело с противоположных сторон не равны, то оно и движется оттуда, где давление наибольшее, в сторону наименьшего давления, т. е. к камертону. Ему удалось также воспроизвести отталкивание в случае малого тела, которое легче окружающей среды.

Замечательно, что из трех гипотез, приводящих некоторым образом к физическому объяснению тяготения, каждая вводит постоянную затрату работы. Что так именно обстоит дело в случае лесажевской гипотезы внемировых корпускул, мы показали в статье «Атом». Гипотеза испускания или поглощения жидкости требует не только постоянной затраты работы на испускание жидкости под давлением, но и действительного сотворения и разрушения вещества. Гипотеза волн требует некоторого агента в отдаленных частях Вселенной, способного производить волны. Согласно подобным гипотезам, мы должны смотреть на процессы природы не как на иллюстрации великого принципа сохранения энергии, но как на примеры, в которых путем соответствующим образом подобранных мощных агентов, не подчиненных этому принципу, поддерживается кажущееся сохранение энергии. Отсюда мы вынуждены заключить, что объяснения причины тяготения нельзя найти ни в одной из этих гипотез.

* «Philosophical Magazine», June, 1871.

Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц

Вклад, сделанный Гельмгольцем в математику, физику, физиологию, психологию и эстетику, хорошо известен всем, занимающимся этими различными предметами. Большинство тех, кто достиг известности в любой из этих областей, добился этого, посвящая все свое внимание исключительно этой науке, так что лишь в очень немногих случаях люди, работающие в различных областях науки, могут быть друг другу полезны, внося в одну из них навыки, полученные при изучении другой.

Обычно рост человеческих знаний происходит путем накопления их вокруг ряда отдельных центров. Однако рано или поздно должно прийти время, когда два или более раздела науки не смогут долее оставаться независимыми друг от друга и должны будут слиться в одно согласованное целое. Но хотя люди науки и могут быть глубоко убеждены в необходимости такого слияния, сама эта операция чрезвычайно затруднительна. Действительно, хотя явления природы все согласуются друг с другом, мы должны иметь дело не только с ними, но и с гипотезами, изобретенными для их систематизации; но отсюда не следует, что, поскольку ряд исследователей работал, систематизируя одну группу явлений, созданные ими гипотезы будут согласны с гипотезами, которыми другие исследователи объясняют другую группу явлений. Каждая из наук может быть достаточно согласованной внутри себя, но прежде чем соединять их воедино, нужно очистить каждую от сле-

дов цемента, служившего для предварительного соединения ее частей.

Поэтому операция слияния двух наук в одну обычно включает критику установленных методов и разрушение многих считавшихся истинными теорий, которые долго еще сохраняли бы свою научную репутацию.

Большинство тех физических наук, которые имеют дело с объектами неживой природы, либо уже подверглись этому слиянию, либо как раз находятся в состоянии подготовки к нему, и принимаемый ими вид в конце концов есть вид одной из отраслей динамики.

Многие работники биологических наук были убеждены, что для изучения их предмета необходимо основательное знание динамики. Но та манера, с которой некоторые из них кроили и урезывали факты для того, чтобы ввести явления в рамки своей динамики, вела к дискредитации всех попыток применения методов динамики к биологии.

Мы собираемся сделать несколько замечаний об одной из областей научной работы Гельмгольца, являющегося замечательнейшим примером ученого, у которого широкое знакомство с наукой соединилось с глубиной и основательностью знаний, с основательностью, требовавшей овладения многими науками и этим самым оставившей свой след на каждой из них.

Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц родился 31 августа 1821 г. в Потсдаме, где его отец, Фердинанд Гельмгольц, был учителем гимназии. Мать его, Каролина Пэн, происходила из семьи английских эмигрантов. Ограниченные средства отца не позволили ему учиться ничему другому, кроме медицины. Поэтому он стал военным врачом и оставался им до конца 1848 г., когда был принят ассистентом в Берлинский анатомический музей и преподавателем анатомии в Академию художеств. В следующем году он переехал в качестве профессора физиологии в Кенигсберг, в Пруссию. В 1856 г. он стал профессором анатомии и физиологии Боннского университета, в 1859 г.— профессором физиологии Гейдельбергского университета и в 1871 г.— профессором физики Берлинского университета.

Свою знаменитую работу «О сохранении энергии» он опубликовал в бытность военным врачом.

Наука о динамике уже так давно основана, что вряд ли можно предположить о возможности дополнения ее

основных принципов. Но в приложениях чистой динамики к реальным телам остается еще очень много сделать. Великой задачей ученых нашего века является распространение наших знаний о движении вещества от тех случаев, в которых мы можем видеть и измерять движение, к тем, в которых наши чувства не могут его обнаружить. Для этой цели мы должны воспользоваться принципами динамики, применяемыми в тех случаях, когда нельзя непосредственно наблюдать истинную природу движения, и мы должны также найти такие методы наблюдения, при помощи которых можно измерять действия, указывающие на природу невидимого движения. Здесь нет нужды ссылаться на работы различных ученых, содействовавших, каждый в своем направлении, опытами, расчетами или рассуждениями утверждению принципа сохранения энергии. Но несомненно, этим исследованиям был сообщен сильный толчок опубликованной в 1847 г. работой Гельмгольца «Ueber die Erhaltung der Kraft» («О сохранении силы»), заглавие которой мы теперь должны (и, с точки зрения науки, правильно) переводить «Сохранение энергии», хотя в переводе, появившемся в «Scientific Memoirs» Тэйлора, слово Kraft переведено словом «сила», согласно обычному словоупотреблению того времени.

В этой работе Гельмгольц показал, что если бы силы, действующие между материальными телами, были эквивалентны силам притяжения или отталкивания, которые действуют между частицами этих тел и интенсивность которых зависит только от расстояния, то расположение и движение любой материальной системы подчинялось бы определенному уравнению, словесное выражение которого и есть принцип сохранения энергии.

Вопрос о том, приложимо ли это уравнение к реальным материальным системам, может установить только опыт, но поиски того, что называли «вечным движением», производились, и всегда безуспешно, уже со столь давних времен, что мы можем обратиться теперь к объединенному опыту большого числа изобретательнейших людей, из которых каждый, найдя какое-нибудь нарушение этого принципа, использовал бы его наилучшим образом.

Кроме того, если бы этот принцип был в какой-либо мере неправилен, то обычные в природе процессы, происходящие непрерывно и во всех возможных комбинациях, наверное, давали бы время от времени заметные и поразительные

тельные явления, возникающие благодаря накоплению действия какого-нибудь небольшого отклонения от принципа сохранения энергии.

Однако научное значение принципа сохранения энергии зависит не только от точности установления факта и даже не от замечательных заключений, которые из него можно вывести, но от плодотворности методов, основанных на этом принципе.

Заключается ли наш труд в создании науки путем связывания воедино уже известных фактов или в поисках объяснения непонятных явлений путем постановки ряда опытов — принцип сохранения энергии остается нашим надежным руководителем. Он дает нам схему, при помощи которой мы можем представить факты любой физической науки, как примеры превращения энергии из одной формы в другую. Он также говорит нам, что при изучении любого нового явления нашим первым вопросом должно быть: каким образом объяснить это явление с точки зрения превращения энергии? Какова первоначальная форма энергии? Каков ее конечный вид? И каковы условия ее превращения?

Для того чтобы полностью оценить все научное значение небольшой работы Гельмгольца по этому вопросу, нужно было бы спросить тех, кому мы обязаны величайшими открытиями в области термодинамики и в других областях современной физики, сколько раз они перечитывали эту работу и как часто во время изысканий веские утверждения Гельмгольца воздействовали на их ум, подобно непреборимой движущей силе.

Теперь мы переходим к его исследованиям глаза и зрения, изложенным в книге «Физиологическая оптика». Каждый современный окулист признает, что офтальмоскоп, изобретенный в своем первоначальном виде Гельмгольцем, позволил заменить при диагнозе заболеваний внутренних частей глаза предположения наблюдениями и дал возможность производить операции глаза с большей уверенностью.

Хотя офтальмоскоп и является необходимым орудием окулиста, знание оптических принципов имеет еще большее значение. Все сведения по оптике черпались окулистом раньше из учебников, единственной практической целью которых, казалось, являлось объяснение конструкции зрительной трубы. Они были наполнены весьма неи-

зачными математическими вычислениями, и большая часть результатов была совершенно неприложима к глазу.

Уже давно настаивали на важности для физиолога и врача основательного знакомства с физическими принципами, но до тех пор, пока эти физические принципы не представлены в форме, позволяющей непосредственно применять их к сложному строению живого тела, они им очень мало полезны. Но Гельмгольд, Дондерс и Листинг, применив к глазу гауссову теорию об основных точках инструмента, сделали возможным получение при помощи немногих непосредственных наблюдений достаточных сведений о природе оптических явлений в глазу.

Но, пожалуй, наибольшей услугой, оказанной науке этим замечательным трудом, является метод применения изучения глаза и зрения для того, чтобы иллюстрировать условия ощущения и произвольного движения. Ни в одной области исследования нет такой необходимости в объединенной и сосредоточенной помощи всех наук, как в исследовании ощущений. Чисто субъективная школа физиологов утверждала, что для анализа ощущений не требуется никаких аппаратов, кроме тех, которые каждый человек носит внутри себя, так как, поскольку ощущения не могут возникать нигде, кроме нашего сознания, единственным возможным методом изучения ощущений должно быть непосредственное рассмотрение совокупности наших восприятий. Другие могут изучать условия, при которых импульс распространяется вдоль нерва, и могут предполагать, что, поступая таким образом, они изучают ощущения. Но хотя такая процедура опускает самую сущность явления и рассматривает явление осознания ощущений так, как будто бы оно было электрическим током, однако подсказываемый ею метод дает большие результаты, чем когда-либо давал метод самонаблюдения.

Наилучшие результаты получаются тогда, когда мы пользуемся всеми средствами физики, как, например, в том случае, когда, варьируя природу и интенсивность внешних раздражений, мы наблюдаем затем осознание изменений получаемых ощущений. Именно этим способом Иоганнес Мюллер установил тот замечательный принцип, что разница в ощущениях, доставляемых различными чувствами, зависит не от возбуждающих их действий, но от различий устройства нервов, воспринимающих эти воз-

буждения. Следовательно, ощущение, зависящее от определенного нерва, может изменять свою интенсивность, но не свой характер, и поэтому анализ осознанных нами бесконечно различных комплексов ощущений должен состоять в установлении числа и природы тех простых ощущений, которые, становясь каждое в своей мере осознанным, образуют действительное состояние чувствования в каждое мгновение.

Если после этого анализа самого ощущения мы обнаружили бы анатомически, что нервный аппарат объединен в естественные группы, соответствующие по числу элементам ощущения, это было бы веским подтверждением правильности нашего анализа, а если бы мы могли изобрести средства возбуждения или торможения каждого отдельного нерва нашего собственного тела, мы могли бы даже сделать это исследование исчерпывающим с точки зрения физиологии.

Два замечательных труда Гельмгольца — «Физиологическая оптика» и «Восприятие звука» — представляют собой великолепные примеры этого метода анализа в приложении к двум родам ощущений, доставляющих наибольшее количество сырого материала для мышления.

В первой из этих работ исследуется восприятие цвета и показано, что оно зависит от трех изменяющихся величин или элементарных ощущений. В другом исследовании, в котором применяются чрезвычайно тонкие методы, речь идет о движении глаз. Каждый глаз имеет шесть мышц, комбинированным действием которых его угловое положение может изменяться по любой из своих трех осей, а именно: в горизонтальном и вертикальном направлениях относительно оптической оси и вращаясь вокруг этой оси. Между этими мышцами или их нервами нет материальной связи, которая заставляла бы вызывать движением одной из них движение какой-нибудь другой, так что все три движения одного из глаз механически независимы от трех движений второго глаза. Однако хорошо известно, что движение оси одного глаза всегда сопровождается соответственным движением оси другого. Это происходит даже тогда, когда мы закрываем один глаз пальцем; мы чувствуем, как роговая оболочка закрытого глаза движется под нашими пальцами, когда мы поднимаем или опускаем открытый глаз, смотрим налево или направо: действительно, совершенно невозможно произвести движение од-

ним глазом без того, чтобы соответственно не двигался второй.

Однако, хотя движение глаза вверх и вниз происходит благодаря действию соответственных мышц обоих глаз, движение вправо и влево происходит иначе и вызывается действием внутренней мышцы одного глаза и внешней мышцы второго. И все же соединенное движение их настолько правильно, что мы можем совершенно свободно поворачивать наши глаза, соблюдая все время условие пересечения их оптических осей в какой-нибудь точке предмета, за движением которого мы следим. Кроме того, оказывается, что движение каждого глаза вокруг своей оптической оси замечательным образом связано с движением самой оси.

Метод, которым Гельмгольц разбирает эти явления и иллюстрирует условия управления движениями наших тел, достоин внимания всех тех, которые полагают, что они обладают неограниченной возможностью двигать заданным образом любой, способный к этому роду движения, орган нашего тела.

В своей второй замечательной работе «Восприятие звука как физиологическая основа теории музыки» он еще более ясным образом иллюстрирует условия, при которых наши чувства приобретают навык.

«При пользовании нашими органами чувств упражнение и опыт играют, однако, гораздо большую роль, чем мы это обычно склонны предполагать, и так как мы только что заметили, что наши ощущения важны нам главным образом лишь постольку, поскольку мы в состоянии, благодаря их помощи, правильно судить об окружающем нас внешнем мире, то наша способность к наблюдению этих ощущений простирается обычно лишь настолько, насколько этого требует указанная цель. Мы, конечно, слишком склонны думать, что должны сразу осознать все, что мы ощущаем и что заключается в наших ощущениях. Это естественное мнение основывается, однако, лишь на том, что мы в действительности всегда быстро и без труда осознаем то в наших ощущениях, что интересно нам для нашей практической цели — правильного восприятия внешнего мира, так как в течение всей нашей жизни, ежедневно и ежечасно упражняясь в употреблении наших чувств именно для этой цели, мы приобрели для этого большой опыт» (Helmholtz, Tonempfindungen», стр. 102, 3-е изд. 1870 г.).

Недостаток места не позволяет нам рассмотреть ту работу о вихревом движении, в которой он устанавливает принципы чистой гидродинамики, ускользнувшие от пронизательности всех предшествовавших ему математиков, включая сюда и самого Лагранжа, и те работы по электродинамике, в которых он приводит в удобопонятную и систематическую форму сложные и запутанные исследования нескольких независимо работавших теоретиков, для того чтобы сравнить их друг с другом и с опытом.

Мы не должны останавливаться на отдельных статьях, из которых каждая может считаться работой специалиста, хотя очень немногие специалисты, если вообще такие есть, могли бы так талантливо изложить разбираемые в них вопросы. Мы предпочитаем рассматривать Гельмгольца как автора двух замечательных книг о зрении и слухе, и, поскольку мы уже теперь не находимся больше под властью той непреодолимой силы, которая вела нас сквозь дебри математики, анатомии и музыки, мы можем попытаться обозреть издали всю фигуру этого гиганта мысли, который как бы сидит на некоторой высокой скале и наблюдает за волнами, большими и малыми, движущимися каждая своим собственным путем, внизу, на поверхности моря.

«Я должен признаться, — говорит он, — что когда бы я ни рассматривал внимательно эту картину, она всегда пробуждает во мне особый род умственного наслаждения, потому что здесь открыто физическому зрению то, что в случае волн невидимого атмосферного океана может стать понятным лишь глазу понимающего, и лишь при помощи длинного ряда сложных рассуждений» («Tonempfindungen», стр. 42).

Гельмгольц живет в Берлине, руководя в своей прекрасной лаборатории работой талантливых ученых.

Будем надеяться, что в своем настоящем положении он снова сделает широкий обзор волн и ряби нашего интеллектуального прогресса и время от времени будет сообщать нам свое мнение о значении всего этого.

Строение тел

Вопрос о том, конечно ли число мельчайших частиц, составляющих тела, или же, наоборот, тела неограниченно делимы, относится к вопросу о *первичном* строении тел и трактуется в статье «Атом».

То, как простые вещества соединяются, образуя вещества сложные, называется *химическим* строением тела и трактуется в *химии*.

То, как ощутимые количества простого или сложного вещества группируются для образования некоторой массы, обладающей определенными наблюдаемыми свойствами, называется *физическим* строением тела.

Тела можно классифицировать в отношении их физического строения, исходя из действия внутреннего напряжения при изменении их размеров. Если тело может сохранять равновесие под действием напряжения, не являющегося равномерным по всем направлениям, оно называется твердым телом.

Когда тело таково, что оно не может находиться в равновесии, если напряжения в каждой точке неодинаковы по всем направлениям, про него говорят, что оно обладает свойством текучести.

Существуют некоторые вещества, любое количество которых, как бы оно ни было мало, способно беспредельно распространяться и заполнять любой сосуд, как бы он ни был велик. Они называются газами. Существуют другие текучие вещества, небольшое количество которых, поме-

ценное в большой сосуд, не расширяется сразу, равномерно заполняя сосуд, но собирается на дне даже тогда, когда давление устранено. Эти вещества называются жидкостями.

Когда жидкость помещается в такой большой сосуд, что она занимает лишь часть его, то часть жидкости начинает испаряться или, другими словами, переходит в газообразное состояние, и этот процесс продолжается до тех пор, пока вся жидкость не испарится или пока плотность газообразной части вещества не достигнет некоторого предела. Жидкая и газообразная части вещества находятся тогда в равновесии. Если уменьшить теперь объем сосуда, то часть газа стучится в жидкость, а если увеличить его, то часть жидкости испарится и превратится в газ.

Испарение и конденсация, при которых вещество переходит из жидкого в газообразное, а из газообразного в жидкое состояние, являются прерывными процессами, т. е. свойства вещества непосредственно перед изменением и после него чрезвычайно различны. Но это различие тем слабее во всех отношениях, чем выше температура, при которой происходит это изменение, и Каньяр де ля Тур показал в 1822 г. *, что многие вещества, как например, эфир, алкоголь, сероуглерод и вода, будучи нагреты до достаточно высокой температуры, переходят в состояние, столь же отличающееся от обычного газообразного, как и от жидкого. После этого д-р Эндрюс ** произвел полное исследование свойств углекислоты при температуре как ниже, так и выше той, при которой прекращаются явления сжижения и испарения, и таким образом исследовал и установил непрерывность жидкого и газообразного состояния материи.

Так, при температуре, скажем, 0°C и при обычном атмосферном давлении углекислота — газ. Если сжимать этот газ до тех пор, пока давление не поднимется приблизительно до 40 атмосфер, происходит сжижение, т. е. части вещества последовательно переходят из газообразного в жидкое состояние.

Рассматривая вещество, когда часть его уже сжижена, мы обнаруживаем, что жидкая углекислота на дне сосуда имеет все свойства жидкости и отделена отчетливой по-

* «Annales de Chimie», 2-я серия, XXI. XXII.

** «Philosophical Transactions», 1869, стр. 575.

верхностью от газообразной углекислоты, занимающей верхнюю часть сосуда.

Но мы можем превратить газообразную углекислоту при 0°C в жидкую углекислоту при 0°C , и без резкого изменения, повышая сначала температуру газа до $30^{\circ}, 92\text{C}$, что является критической температурой, затем повышая давление приблизительно до 80 атмосфер и, наконец, охлаждая вещество, все еще под высоким давлением, до нуля.

В течение всего этого процесса вещество остается совершенно однородным. Между веществом в обоих состояниях нет поверхности раздела, не наблюдается также какая-либо внезапная перемена, подобная той, которая имеет место в случае сжижения газа при низких температурах. Но в конце процесса вещество несомненно окажется в жидком состоянии, так как если мы теперь понизим давление до величины, несколько меньшей 40 атмосфер, мы увидим в веществе обычное разделение между его жидкой и газообразной частью, т. е. часть его испарится, а другая останется на дне сосуда, и между жидкой и газообразной частью его будет отчетливая поверхность раздела.

Переход вещества из жидкого в твердое состояние и обратно происходит с различной степенью внезапности. Ряд веществ, как, например, некоторые металлы с более ясно выраженной кристаллической структурой, по-видимому, очень резко переходят из совершенно жидкого состояния в совершенно твердое. В некоторых случаях расплавленное вещество, по-видимому, перед тем как затвердеть, делается гуще, но это может происходить благодаря образованию в еще жидкой массе множества твердых кристаллов, так что до тех пор пока расплавленное вещество, в котором плавают кристаллы, все не затвердеет, консистенция этой массы становится подобной консистенции смеси песка и воды.

Есть другие вещества, в большинстве случаев коллоидальные, которые обладают тем свойством, что когда расплавленное вещество охлаждается, оно становится все более и более вязким, почти непрерывно переходя в твердое состояние. Это имеет место в случае смолы.

Теория состояния твердых тел будет разбираться в статье «Упругость», но поведение твердого тела под действием напряжения дает нам систему названий различных степеней и видов твердости.

Как мы видели, вещество, обладающее свойством текучести, может выдерживать напряжение только тогда, когда это напряжение равномерно во всех направлениях, т. е. тогда, когда оно носит характер гидростатического давления.

Существует большое количество веществ, которые в такой мере соответствуют этому определению текучести, что не могут оставаться в постоянном равновесии, если внутри их напряжения не являются равномерными по всем направлениям.

Однако во всех известных жидкостях или газах в тех случаях, когда движение таково, что форма их небольших объемов непрерывно меняется, внутреннее напряжение не является равномерным по всем направлениям, но стремится задержать относительное движение частиц жидкости или газа. Способность жидкости или газа обладать неравномерностью напряжения, обусловливаемой неравномерностью движения, называется вязкостью. Все реальные жидкости или газы вязки, начиная с патоки и дегтя и кончая водой и эфиром, воздухом и водородом.

Но если вязкость очень мала, жидкость называется подвижной, как, например, вода и эфир.

Если вязкость так велика, что значительное неравенство напряжения, хотя и вызывает постоянно возрастающее смещение, производит это так медленно, что мы с трудом его обнаруживаем, мы часто склонны считать такое вещество находящимся в твердом состоянии и даже рассматривать его как твердое тело. Так, вязкость холодной смолы или асфальта настолько велика, что вещество скорее сломается, нежели поддастся неожиданному удару; однако, если оставить его на достаточный промежуток времени, то окажется, что оно не сможет сохранить равновесие даже под действием ничтожного неравенства напряжений, вызываемого его собственным весом, и потечет как жидкость, пока его уровень не станет всюду одинаковым. Поэтому, если мы определим жидкость как вещество, которое не может оставаться в постоянном равновесии под действием напряжения, не являющегося равномерным во всех направлениях, то мы должны назвать упомянутые вещества жидкостями, хотя они настолько вязки, что можно по ним ходить, не оставляя следов.

Если тело, форма которого была изменена приложением напряжения, стремится восстановить свою первоначальную форму, то оно называется упругим.

чальную форму, когда напряжение устранено, оно называется упругим телом.

Отношение численной величины напряжения к численной величине вызванной им деформации называется *коэффициентом упругости*, а отношение деформации к напряжению называется *коэффициентом податливости*.

Существует столько же коэффициентов, сколько существует напряжений и вызываемых ими деформаций или их компонент. Если бы величина коэффициентов упругости беспредельно увеличивалась, тело приближалось бы к состоянию абсолютно твердого тела.

Мы можем образовать упругое тело большой податливости, растворяя в воде желатин или рыбий клей и давая затем раствору остыть в студенистую массу. Уменьшая пропорцию желатина, можно уменьшить коэффициент упругости студенистой массы так, чтобы чрезвычайно малая сила вызывала значительное изменение формы вещества.

Было обнаружено, что когда деформация упругого тела превышает некоторый предел, зависящий от природы вещества, то оказывается, что после устранения напряжения вещество не возвращается точно к своей первоначальной форме, но остается деформированным. Такие пределы для различных видов деформаций называются пределами упругости.

Существуют другие пределы, которые можно было бы назвать пределами сцепления или прочности; если деформация тела достигает этих пределов, тело ломается, разрывается или разрушается каким-нибудь другим образом, причем непрерывность вещества нарушается.

Тело, форма которого может непрерывно изменяться без всяких трещин и разрывов, называется *пластичным* телом. Когда потребная для этого сила невелика, тело называется *мягким*, когда она велика, тело называется *жестким*. Тело, которое, прежде чем его можно достаточно деформировать, раскалывается или ломается, называется *хрупким*. Когда потребная для этого сила велика, тело называется *твердым*.

Твердость тела измеряется силой, потребной для того, чтобы произвести деформацию определенной величины.

Его прочность измеряется силой, потребной для того, чтобы сломать или раздавить его.

Мы можем несколькими различными путями представить себе твердое тело в состоянии, близком к жидкости.

Если мы замесим фарфоровую глину с водой, то чем больше прибавлять воды, тем жиже становится смесь, пока, наконец, мы не получим воду с медленно оседающими в ней частицами глины. Это — пример механической смеси, составные части которой отделяются друг от друга. Однако, если мы смешаем воск с нефтью или камедь со скипидаром, мы можем получить стойкие смеси всех степеней мягкости и таким образом перейти от твердого к жидкому состоянию через все ступени вязкости.

Мы можем также взять такое упругое и обладающее некоторой хрупкостью вещество, как желатин, и прибавлять к нему все большее и большее количество воды, пока не получим чрезвычайно жидкий студень, оказывающий весьма слабое сопротивление движению в нем твердого тела, например ложки. Но даже такой жидкий студень не является настоящей жидкостью, так как он способен оказывать сопротивление очень малой силе, например весу маленькой пылинки. Если в этот студень погружена соломинка или зернышко и если их удельный вес отличается от удельного веса студня, то они будут стремиться подняться на поверхность или погрузиться на дно. Если этого не происходит, мы заключаем, что студень — не жидкость, а твердое тело, правда, далеко не совершенное, но способное оказывать сопротивление силе, с которой стремится двигаться соломинка.

Поэтому оказывается, что можно себе представить переход из твердого в жидкое состояние, происходящий путем неограниченного уменьшения либо коэффициента упругости, либо предельной силы сопротивления разрыву, либо путем уменьшения вязкости. Но подобно тому, как тело не является настоящей жидкостью, до тех пор пока сопротивление разрыву или коэффициент упругости не сведены к нулю, оно не является настоящим твердым телом, до тех пор пока вязкость не становится бесконечно большой.

Однако твердые тела, не обладающие вязкостью в смысле способности неограниченно менять свою форму, все же подвержены изменениям, зависящим от времени, в течение которого на них действовало напряжение. Другими словами, напряжение зависит не только от деформации в каждый данный момент, но и от всей предыдущей истории тела. Таким образом, напряжение несколько больше, когда деформация растет, по сравнению с тем, когда она умень-

шается; и если деформация имела место в течение долгого времени, то тело, предоставленное самому себе, не сразу возвращается к своей первоначальной форме, но как будто бы сохраняет остаточную деформацию, не являющуюся, однако, действительной остаточной деформацией, так как тело постепенно возвращается к своей первоначальной форме, изменяясь, как это можно заметить, в течение многих часов и даже недель после того, как тело было предоставлено самому себе.

Явления такого рода были отмечены Вебером и Кольраушем («Pogg. Ann.», Bd. 54, 119 и 128); они были описаны О. Э. Мейером («Pogg. Ann.», Bd. 131, 108) и Максвеллом («Phil. Trans.» 1866, стр. 249), а теория этого явления была предложена д-ром Л. Больцманом («Wiener Sitzungsberichte», 8 октября 1874 г.).

Немецкие авторы называют это явление *elastische Nachwirkung* (упругое последствие), что можно было бы перевести «упругая реакция» (*elastic reaction*), если бы слово «реакция» не употреблялось уже в другом смысле. В. Томсон называет его вязкостью упругих тел.

Эти явления легче всего наблюдаются при закручивании тонкой проволоки, неподвижно закрепленной в точке подвеса и снабженной небольшим зеркальцем, которое прикреплено к нижнему концу и положение которого можно наблюдать обычным способом при помощи подзорной трубы и шкалы. Если закрутить нижний конец проволоки на не слишком большой угол и затем предоставить ее самой себе, зеркало начинает совершать колебания, размах которых можно прочесть на шкале. Эти колебания затухают гораздо скорее, чем они затухали бы, если бы единственной задерживающей силой было сопротивление воздуха, доказывая этим, что сила кручения проволоки должна быть больше при увеличении закручивания, чем при его уменьшении. Это явление описано сэром В. Томсоном под названием «вязкости упругих тел». Но мы можем также определить среднюю точку этих колебаний или точку временного равновесия, наступающего при убывании колебаний, и отметить изменение ее положения.

Если же мы оставим проволоку закрученной в течение, скажем, минуты или часа, а затем отпустим ее, то обнаружим, что точка временного равновесия переместилась в направлении кручения и что это смещение тем больше, чем дольше проволока была закручена. Но это смещение

точки временного равновесия не носит характера остаточной деформации, так как если предоставить проволоку самой себе, то она мало-помалу, хотя все медленнее и медленнее, вернется к своему первоначальному положению. Автор наблюдал это медленное явление в продолжение более чем недели и он также обнаружил, что если проволоку заставить колебаться, то движение точки равновесия быстрее, чем в том случае, когда проволока не колебалась.

Мы можем получить чрезвычайно сложные серии движений нижнего конца проволоки, подвергая ее предварительному ряду закручиваний. Мы можем, например, сначала закрутить ее в положительном направлении и оставить ее закрученной в течение одного дня, затем — в отрицательном направлении на один час, а затем — в положительном направлении на одну минуту. Когда проволока будет предоставлена самой себе, смещение, вначале положительное, делается через несколько секунд отрицательным, и это отрицательное смещение будет некоторое время расти. Затем оно уменьшается, смещение становится положительным и остается таким в течение значительного времени, пока, наконец, не исчезает.

Эти явления в некоторых отношениях аналогичны изменениям температуры поверхности очень большого железного шара, который в течение целого дня нагревался в печи, потом помещался на час в тающий снег, затем на минуту в кипящую воду и наконец выставлялся на воздух. Но еще более совершенную аналогию можно найти в изменениях потенциала лейденской банки, которую заряжали положительно в течение дня, отрицательно в течение часа и снова положительно в течение одной минуты*.

Результаты последовательного намагничивания железа и стали также во многих отношениях аналогичны результатам, полученным с деформацией и электризацией**.

Метод, предложенный Больцманом для математического изображения таких явлений, заключается в выражении действительного напряжения $L(t)$ не только через действительную деформацию $Q(t)$, но и через те деформации, которым тело было подвергнуто в течение всего предыдущего времени.

* См.: Dr. Hopkinson. On the residual charge of the Leyden jar. «Proc. R. S. of London», XXIV, 408, 30 марта 1876.

** См.: «Widemann's Galvanismus», т. II, стр. 567.

Его уравнение имеет следующий вид:

$$L_t = K\theta_t - \int_0^{\infty} \Psi(\omega) \theta_{t-\omega} d\omega, \quad (1)$$

где ω — интервал времени, отсчитанный назад от настоящего момента времени t до момента времени $t - \omega$, когда существовала деформация $\theta_{t-\omega}$, а $\Psi(\omega)$ — некоторая функция этого интервала.

Мы можем назвать историческим методом этот метод выведения настоящего состояния тела из предыдущих состояний, потому что он заключает в себе знание предыдущей истории тела. Но этот метод может быть преобразован в другой, в котором настоящее состояние тела не рассматривается как обусловливаемое какими бы то ни было состояниями, прекратившимися к этому моменту. Действительно, если мы разложим $\theta_{t-\omega}$ по теореме Тейлора

$$\theta_{t-\omega} = \theta_t - \omega \frac{d\theta}{dt} + \frac{\omega^2}{1 \cdot 2} \frac{d^2\theta}{dt^2} - \text{и т. д.}$$

и, если мы также напишем

$$A = \int_0^{\infty} \Psi(\omega) d\omega, \quad B = \int_0^{\infty} \omega \Psi(\omega) d\omega,$$

$$C = \int_0^{\infty} \frac{\omega^2}{1 \cdot 2} \Psi(\omega) d\omega \text{ и т. д.,}$$

то уравнение (1) превратится в

$$L = (K - A) \theta + B \frac{d\theta}{dt} - C \frac{d^2\theta}{dt^2} + \text{и т. д.,}$$

куда не входит ничего зависящего от времени, так как все величины относятся к настоящему моменту.

Однако это выражение Больцмана ни в какой мере не является физической теорией рассматриваемого явления. Это просто математическая формула, которая, хотя и изображает некоторые из наблюдаемых явлений, неспособна выразить явления постоянной остаточной деформации. Но мы знаем, что некоторые вещества, например гуттаперча или резина в холодном состоянии, могут получить

остаточную деформацию при растяжении, но если потом нагреть их до определенной температуры, они восстанавливают свою первоначальную форму. Желатин также может быть высушен в деформированном состоянии; он может восстановить свою форму, поглощая воду.

Мы знаем, что молекулы всех тел находятся в движении. В газах и жидкостях это движение таково, что ничто не препятствует любой молекуле переместиться из любой части массы в любую другую ее часть. Но мы должны предположить, что в твердых телах, по крайней мере отдельные из молекул, только колеблются вокруг некоторого среднего положения так, что, когда мы рассматриваем некоторую группу молекул, их конфигурация никогда не отличается значительно от некоторой устойчивой конфигурации, около которой она колеблется.

Это будет иметь место даже если тело находится в состоянии деформации, но при условии, что амплитуда колебаний не превышает определенных границ. Однако если она превышает эти границы, то группа молекул не стремится вернуться к своей первой конфигурации, но начинает колебаться около новой устойчивой конфигурации, в которой деформация или равняется нулю, или по крайней мере меньше, чем в первоначальной конфигурации.

Условия разрушения конфигурации, очевидно, зависят частью от амплитуды колебаний, частью от величины деформации в первоначальной конфигурации. И мы можем предположить, что различные группы молекул, даже в однородном твердом теле, не находятся в этом отношении в одинаковых условиях.

Так, можно предположить, что в некотором числе групп обычное движение молекул способно накопиться настолько, что время от времени конфигурация одной из групп разрушается, причем безразлично, находится ли группа в состоянии деформации или нет. В этом случае мы можем предположить, что в каждую секунду некоторая часть этих групп разрушается и принимает конфигурации, соответствующие равномерной во всех направлениях деформации.

Если бы все группы были такого рода, то среда была бы вязкой жидкостью.

Но мы можем предположить, что имеются другие группы, конфигурация которых настолько устойчива, что не разрушается под действием обычного движения молекул

до тех пор, пока среднее напряжение не превысит определенного предела, и этот предел может быть различен для различных систем этих групп.

Если такие более устойчивые группы рассеяны в веществе в таком количестве, что они образуют твердый остов, то вещество называется твердым телом, которое будет испытывать остаточные деформации лишь под действием напряжения, превышающего некоторое данное напряжение.

Если же твердое тело содержит также группы меньшей устойчивости и если группы первого рода также будут самопроизвольно разрушаться, то при приложении напряжения сопротивление ему будет постепенно уменьшаться по мере разрушения групп первого рода, и это будет продолжаться до тех пор, пока напряжение не сведется к тому, которое обусловлено более постоянными группами. Если предоставить теперь тело самому себе, то оно не возвратится сразу к своей первоначальной форме, но вернется к ней лишь тогда, когда группы первого рода разрушатся в достаточном количестве, чтобы вернуться к первоначальному состоянию. Эта точка зрения на строение твердого тела, состоящего из групп молекул, часть которых находится в иных условиях, чем другие, помогает нам также объяснить состояние твердого тела после того, как ему была сообщена постоянная деформация. В этом случае часть менее устойчивых групп разрушилась и приняла новые конфигурации, но вполне возможно, что другие, более устойчивые, удержали свою первоначальную конфигурацию, так что форма тела определяется равновесием между этими двумя системами групп. Но, если разрушение менее устойчивых групп облегчается благодаря повышению температуры, повышению влажности, сильной вибрации или какой-нибудь другой причине, более устойчивые группы преобладают и стремятся возвратить тело к той форме, которую оно имело до деформации.

Эфир

Эфир (αἴθήρ, вероятно, от αἴθω — горю, хотя Платон в своем «Кратиле» (410, в) производит название от его непрерывного движения — ὅτι αἰεὶ θεῖ περὶ τὸν αἴρα ρέων αἰθερὸ δικαίως ἂν κλοῖτο), материальная субстанция, несравненно более тонкая, нежели видимые тела, предполагается существующей в тех частях пространства, которые кажутся пустыми.

Гипотезу эфира поддерживали различные мыслители по различным причинам. Для тех, кто поддерживал как философский принцип воззрение, что все пространство наполнено, — тот принцип, что природа боится пустоты, — было достаточным основанием, чтобы предложить всенаполняющий эфир, если бы даже всякий другой аргумент говорил против. Для Декарта, который сделал протяженность единственным существенным свойством материи, а материю — необходимым условием протяженности, само существование тел, разделенных расстоянием одно от другого, было доказательством существования непрерывной среды между ними.

Но кроме этих, крайне метафизических необходимостей существования среды, были и другие более мирские потребности в наполнении пространства эфирами. Изобретали эфиры для планет, в котором они могли бы плавать, для образования электрических атмосфер и магнитных истечений, для передачи ощущений от одной части нашего тела к другой и т. д., пока все пространство не было на-

полнепо тремя или четырьмя эфирами. Только когда мы вспомним о весьма распространенном и пздоровом влиянии, какое вначале оказывали на науку эти гипотезы эфиров, мы будем в состоянии оценить ту боязнь эфиров, которая замечается у людей здравомыслящих в течение XVIII столетия и которая, вероятно, как род наследственного предрассудка, унаследована была и покойным Джоном Стюартом Миллем.

Ученики Ньютона держались того мнения, что в факте взаимного тяготения небесных тел, согласно ньютонову закону, мы имеем полный количественный отчет об их движениях; и они стремились следовать далее по пути, проложенному Ньютоном, изучая и измеряя притяжения и отталкивания наэлектризованных и намагниченных тел и силы сцепления внутри тел, не пытаясь давать отчета в том, что это за силы.

Однако сам Ньютон пытался объяснить тяготение разницами давления в эфире (см. статью «Притяжение»); но он не опубликовывал своей теории, «так как ему не удалось на основании опытов и наблюдений дать удовлетворительные объяснения касательно этой среды и касательно того, как она действует, производя главные явления природы».

С другой стороны, все вводившие эфиры для объяснения явлений не могли указать, какова природа движения этих сред и не могли доказать, что среды, ими придуманные, производят те эффекты, для объяснения которых они и были придуманы. Только один эфир пережил остальные, это — эфир, придуманный Гюйгенсом для объяснения распространения света. Доказательства в пользу существования светоносного эфира получили прочную опору, когда были открыты новые явления света и других излучений; и свойства этой среды, выведенные на основании явлений света, оказались совершенно такими же, какие требуются для объяснения электромагнитных явлений.

Функции эфира в отношении распространения излучений. Полное доказательство в пользу волновой теории света будет дано в статье «Свет»; здесь же мы дадим краткое резюме этого доказательства, поскольку оно касается существования эфира.

Что самый свет не есть вещество, доказывается явлением интерференции. Луч света от некоторого источника

разделяют известными оптическими способами на две части, и эти части, после того как ими пройдены неравные пути, заставляют снова соединиться на экране. Если одну половину луча загородить, то другая упадет на экран и осветит его, но если обе части упадут на экран, то в некоторых частях экрана покажутся темные места, доказывая этим, что из двух частей луча одна уничтожила действие другой.

Но ведь нельзя же предположить, чтобы два тела, положенные рядом, могли уничтожить друг друга; следовательно, свет не может быть веществом. Мы доказали только то, что одна часть света может быть совершенно противоположна другой, совершенно так же, как $+a$ совершенно противоположно $-a$, чем бы a ни было. Между физическими величинами есть такие, которые способны изменять свой знак, и есть такие, которые не могут изменять знака. Так, перемещение в одну сторону совершенно противоположно равному перемещению в обратную сторону. Такие величины служат мерами не вещества, а всегда процессов, имеющих место в веществе. Отсюда мы заключаем, что свет не вещество, а процесс, происходящий в веществе, причем процесс, происходящий в первой части света, всегда противоположен процессу, происходящему в тот же момент во второй части, так что когда две эти части будут соединены вместе, никакого действия не будет. Чтобы определить природу того процесса, который имеет место в луче, мы изменяем длину пути одной или обеих частей луча и находим, что свет гаснет всякий раз, как разность длины путей равна нечетному числу некоторых малых расстояний, называемых длиной полуволны. Во всех остальных случаях будет большая или меньшая степень света; а когда пути равны или когда их разность составляет целое число волн, то экран кажется освещенным вчетверо ярче, чем когда на него падает только одна часть луча. В обыкновенной форме опыта эти различные случаи имеют место одновременно в различных точках экрана, так что мы видим на экране ряд полос, состоящий из темных линий, равноотстоящих одна от другой, со светлыми полосами между ними, с определенной градацией изменения яркости.

Если рассматривать, что происходит в различных точках на оси светового луча в один и тот же момент, то найдем, что если расстояние между точками равно целому

числу волн, то в этих точках в один и тот же момент совершается одинаковый процесс, если же расстояние равно нечетному числу полуволн, то процесс, имеющий место в одной точке, совершенно противоположен процессу, происходящему в другой точке.

Известно, что свет распространяется с определенной скоростью (согласно Кюрню, в пустоте со скоростью $3,004 \cdot 10^{10}$ сантиметров в секунду). Если, следовательно, предположить, что некоторая движущаяся точка идет вдоль луча с этой скоростью, то мы найдем, что в каждой точке луча, когда наша движущаяся точка туда приходит, совершается один и тот же процесс. Если же на оси луча представить себе неподвижную точку, то в ней будет совершаться быстрая смена противоположных процессов, причем промежуток времени между двумя одинаковыми процессами равен времени, потребному свету на прохождение расстояния в одну длину волны.

Эти явления можно резюмировать в форме математического выражения

$$u = A \cos (nt - px + a),$$

которым определяется u — фаза процесса в точке луча, отстоящей от неподвижной точки на расстоянии x , в момент t .

Что же касается природы процесса, то ее мы не определяли. Это может быть перемещение, либо вращение, либо электрическое возмущение, либо какая угодно физическая величина, способная принимать и положительные, и отрицательные значения. Какова бы ни была природа процесса, но если он может быть выражен уравнением этой формы, то процесс, происходящий в нашей неподвижной точке, называется *колебанием*; постоянная A называется *амплитудой*; время $2\pi/n$ называется *периодом*; а $nt - px + a$ есть *фаза*.

Конфигурация в данный момент называется *волной*, а расстояние $2\pi/p$ *длиной волны*. Скорость распространения есть n/p . Если рассматривать различные части среды, когда в них последовательно происходит тот же самый процесс, то словом «*волнообразный*» мы обозначаем этот характер процесса без всякого ограничения его физической природы.

Дальнейшие сведения о физической природе процесса

мы черпаем из того факта, что если два луча поляризованы и если плоскость поляризации одного из них поворачивать вокруг оси луча, то когда обе плоскости поляризации будут параллельны, появятся вышеописанные явления интерференции. Если поворачивать плоскость далее, то темные и светлые полосы сделаются уже не так отчетливы, и если плоскости поляризации будут образовывать прямой угол, то освещение экрана делается равномерным и никаких следов интерференции заметно не будет.

Следовательно, физический процесс, представляемый распространением света, должен быть не только величиной, обладающей направлением, должен быть не только вектором, способным менять свое направление на противоположное, но этот вектор должен стоять к лучу под прямым углом и находиться либо в плоскости поляризации, либо в плоскости, ей перпендикулярной. Френель предполагал, что это есть перемещение среды, перпендикулярное к плоскости поляризации. Мак-Келлог и Нейман предполагали, что это — перемещение в самой плоскости поляризации. Сравнение этих двух теорий нужно отложить до рассмотрения явлений в плотных средах.

Но этот процесс может быть и электромагнитным, и так как в этом случае электрическое смещение и магнитное возмущение друг другу перпендикулярны, то можно предположить, что любое из них совершается в плоскости поляризации.

Все, что было сказано относительно излучений, действующих на наш глаз и называемых нами светом, приложимо также и к тем излучениям, которые не производят на наш глаз никакого светового впечатления, так как наблюдались явления излучения, о которых мы узнаем только по их тепловым или по их химическим действиям.

Упругость, твердость и плотность эфира. Определив таким образом геометрический характер процесса, мы должны теперь обратить внимание на среду, в которой он имеет место. Какова бы ни была эта среда, мы будем называть ее *эфиром*.

Во-первых, она способна передавать энергию. Передаваемое ею излучение не только способно действовать на наши чувства, что уже само по себе служит доказательством производимой работы, но и нагревать тела, его поглощающие; а измеряя теплоту, сообщаемую таким телам, можно вычислять энергию излучения.

Во-вторых, эта энергия передается от тела излучающего телу поглощающему не мгновенно, но некоторое время существует в среде.

Примем ли мы волновую теорию в форме, приданной ей Френелем или Мак-Келлогом, половина этой энергии существует в форме потенциальной энергии, зависящей от нарушения равновесного состояния элементарных участков среды, а половина — в форме кинетической энергии, производимой движением среды. Следовательно, мы должны предположить, что эфир обладает упругостью, подобной упругости твердого тела, а также, что он имеет конечную плотность. Если взять цифру Пулье, что прямой солнечный свет, падая в течение минуты на квадратный сантиметр, сообщает 1,7633 единиц теплоты, то эта теплота эквивалентна $1,234 \cdot 10^6$ эргам в секунду. Разделив это число на $3,004 \cdot 10^{10}$, т. е. на скорость света в сантиметрах в секунду, мы найдем, что энергия в кубическом сантиметре составляет $4,1 \cdot 10^{-5}$ эрга. Вблизи Солнца энергия в кубическом сантиметре приблизительно в 46 000 больше, т. е. равна 1,886 эрга. Если, следуя сэру В. Томсону, допустить, что амплитуда не больше одной сотой длины волны, то будет

$$A\rho = \frac{2\pi}{100}, \text{ или около } \frac{1}{16}; \text{ так что}$$

Энергия в куб. сантиметре = $\frac{1}{2} \rho V^2 A^2 p^2 = 1,886$ эргам¹.

Наибольшее тангенциальное напряжение на кв. сантиметр = $\rho V^2 A\rho = 30,176$ динам.

Коэффициент упругости эфира . . . = $\rho V^2 = 842,8$.

Плотность эфира = $\rho = 9,36 \cdot 10^{-19}$.

Коэффициент упругости стали составляет около $8 \cdot 10^{11}$, а стекла $2,4 \cdot 10^{11}$.

Если бы температура атмосферы всюду была 0° С и если бы она находилась в равновесии вокруг Земли, предполагаемой находящейся в покое, то ее плотность в бесконечном удалении от Земли была бы $3 \cdot 10^{-346}$, что почти в $1,8 \cdot 10^{327}$ раз меньше указанной плотности эфира. Следовательно, в межпланетном пространстве плотность эфира весьма велика в сравнении с плотностью разреженной атмосферы межпланетного пространства, но вся масса эфира

¹ Числа этого столбца неверно выведены из данных. Их нужно заменить числами: 1,886; 60,352; 965,632 и $1,07 \cdot 10^{-18}$. — *Прим. ред.*

внутри сферы, радиус которой равен расстоянию до самой отдаленной планеты, весьма мала сравнительно с массой самих планет*.

Эфир отличен от обыкновенной материи. Когда свет движется через воздух, то очевидно, что среда, по которой свет распространяется, не есть самый воздух, потому что, во-первых, воздух не может передавать поперечных колебаний, а продольные колебания, им передаваемые, распространяются почти в миллион раз медленнее света. Твердые прозрачные тела, как стекло и кристаллы, без сомнения, способны передавать поперечные колебания, но скорость передачи ими этих колебаний все-таки в сотни тысяч раз меньше скорости, с которой свет передается через эти тела. Следовательно, мы вынуждены принять, что среда, по которой свет распространяется, есть нечто отличное от прозрачной среды, нам известной, хотя она и проникает во все прозрачные тела, а, вероятно, также и в тела непрозрачные.

Однако скорость света различна в различных прозрачных средах, и, следовательно, мы должны предположить, что эти среды принимают некоторое участие в процессе, и что их частицы колеблются, как и частицы эфира. Однако энергия колебания частиц обыкновенного вещества должна быть значительно меньше энергии эфира, ибо иначе количество падающего света, отражающегося при переходе луча из пустоты в стекло или из стекла в пустоту, было бы гораздо больше, чем это бывает на самом деле.

Относительное движение эфира. Итак, эфир внутри плотных тел мы должны рассматривать как нечто такое, что слабо связано с плотными телами, и теперь нам нужно исследовать, несут ли с собой эти твердые тела, когда они движутся по великому океану эфира, содержащийся в них эфир или эфир проходит сквозь них, подобно тому, как морская вода проходит сквозь ячейки сети, которая тянется за лодкой. Если бы можно было определить скорость света, наблюдая время, употребляемое им на прохождение от одного пункта до другого на поверхности Земли, то, сравнивая наблюдаемые скорости движения в противоположных направлениях, мы могли бы определить скорость эфира по отношению к этим земным пунктам. Но все методы, которые можно применить к нахождению скорости света из

* См.: сэръ В. Томсон. «Trans. R. S. Edin.», v. XXI, стр. 60.

земных опытов, зависят от измерения времени, необходимого для двойного перехода от одного пункта до другого и обратно, и увеличение этого времени вследствие относительной скорости эфира, равное скорости Земли на ее орбите, составило бы всего около одной стомиллионной доли всего времени перехода и было бы, следовательно, совершенно незаметно.

Теория движения эфира едва ли достаточно развита, чтобы позволить нам составить строго математическую теорию аберрации света, принимая в соображение движение эфира. Тем не менее профессор Стокс показал, что, согласно весьма вероятной гипотезе относительно движения эфира, на величину аберрации это движение не должно заметным образом влиять.

Единственный возможный способ прямого определения относительной скорости эфира по отношению к солнечной системе заключается в сравнении значений скорости света, выведенных из наблюдений затмений спутников Юпитера, когда Юпитер виден с Земли приблизительно в противоположных точках эклиптики.

Араго предложил сравнивать отклонения луча света, посылаемого звездой, по выходе его из ахроматической призмы, причем направление луча в призме образовывало бы различные углы с направлением движения Земли по ее орбите. Если бы эфир передвигался в призме быстро, то можно было бы ожидать, что отклонение неодинаково, в зависимости от того, было ли направление света таково же, как и направление движения эфира, или эти направления были противоположны.

Автор* расположил опыт более удобным образом, взяв обыкновенный спектроскоп, в котором щель коллиматора была заменена плоским зеркалом. Перекрецающиеся нити наблюдательной трубы были освещены. Свет от некоторой точки нити проходил сквозь объектив, а затем сквозь призмы в виде пучка параллельных лучей, оттуда падал на объектив коллиматора, сходился в фокусе зеркала, которое отражало его, снова проходил через объектив и образовывал пучок, проходивший сквозь каждую призму параллельно своему первоначальному направлению, так что объек-

* «Phil. Trans», CLVIII (1868), p. 532. [Сообщено проф. Максвеллом д-ру Гюггинсу и включено им в мемуар о спектрах некоторых звезд и туманностей].

тив наблюдательной трубы сводил его в фокус, совпадавший с той точкой перекрещенных нитей, из которой вначале он вышел. Так как изображение совпадало с предметом, то его нельзя было видеть прямо, но, отклоняя пучок путем отражения части его от плоской стеклянной поверхности, было найдено, что можно было отчетливо различать изображение тончайшей паутины, хотя свет, дававший изображение, дважды прошел сквозь три призмы под углом 60° . Сперва прибор поставлен был так, чтобы направление света при первом прохождении сквозь вторую призму совпадало с направлением движения Земли по ее орбите. Затем прибор поворачивали так, чтобы направление света было противоположно направлению движения Земли. Если эта причина увеличивала либо уменьшала отклонение луча призмой на первом пути, то это отклонение было бы уменьшено либо увеличено на обратном пути и изображение появилось бы по одну сторону от предмета. Если прибор повернуть кругом, оно появилось бы по другую сторону. Опыт производили в разные времена года, но получались только отрицательные результаты. Однако из этого опыта еще нельзя сделать решительного заключения, что эфир близ земной поверхности увлекается вместе с Землей по ее орбите, ибо Стокс * показал, что, согласно гипотезе Френеля, относительная скорость эфира внутри призмы относилась бы к скорости эфира вне ее обратно пропорционально квадрату показателя преломления и что в этом случае отклонение не изменялось бы заметным образом вследствие движения призмы в эфире.

Однако Физо **, наблюдая изменение плоскости поляризации света, пропускаемого наклонно сквозь ряд стеклянных пластинок, получил, как он думает, доказательство разницы в результате соответственно различию направления луча в пространстве, а Ангстрем пришел к подобным же результатам путем дифракции. Автору неизвестно, подвергались ли эти трудные опыты повторной проверке.

В другом опыте Физо, заслуживающем, по-видимому, большого доверия, он наблюдал, что распространение света в текущей воде совершается с большей скоростью в направлении движения воды, нежели в противоположном направлении, но что изменение скорости меньше того, кото-

* «Phil. Magaz.», 1846, p. 53.

** «Ann. de Chimie et de Physique», Feb., 1860.

рое имело бы место вследствие действительной скорости воды, и что явление не наблюдается, если воду заменить воздухом. Этот опыт, по-видимому, скорее подтверждает френелеву теорию эфира; но весь вопрос о состоянии светоносной среды возле Земли и об ее отношении к обыкновенной материи еще далеко не решен опытом.

Функции эфира в явлениях электромагнетизма. Фарадей высказывал догадку, что та же самая среда, которая участвует в распространении света, могла бы также быть агентом и в электромагнитных явлениях. «Что касается меня,— говорил он,— то, рассматривая отношение пустоты к магнитной силе и общий характер магнитных явлений вне магнита, я скорее склонен думать, что распространение силы есть действие вне магнита, нежели что эти действия суть простые притяжения и отталкивания на расстоянии. Подобное действие может быть функцией эфира; ибо нет ничего невероятного в том, что если существует эфир, то он имеет и иные функции, кроме простой передачи излучений» *. Последующие изыскания только подтвердили эту догадку.

Электрическая энергия бывает двоякого рода — электростатическая и электрокинетическая. У нас имеются основания к допущению, что первая зависит от свойства среды, в силу которого электрическое смещение вызывает электродвижущую силу в противоположном направлении, причем электродвижущая сила для единицы смещения обратно пропорциональна диэлектрической постоянной среды. С другой стороны, электрокинетическая энергия есть просто энергия движения, вызываемого в среде электрическими токами и магнитами, причем это движение не ограничивается несущими ток проволоками или магнитами, но существует всюду, где только можно найти магнитную силу.

Электромагнитная теория света. Итак, свойства электромагнитной среды, насколько можно судить, подобны свойствам светоносной среды, но лучший способ для их сравнения между собой состоит в определении скорости, с которой электромагнитное возмущение распространяется в среде. Если бы она равнялась скорости света, то у нас были бы веские основания к допущению, что обе среды, занимая, как и есть на деле, то же самое пространство, в дей-

* «Experimental Researches», 3075.

ствительности тождественны. Данные, на которых можно основывать вычисления, доставляются опытами, которые были сделаны с целью сравнения электромагнитной системы единиц с электростатической. Скорость распространения электромагнитного возмущения в воздухе, как она вычислена на основании различных данных, не больше отличается от скорости света в воздухе, как она определена различными наблюдениями, чем множество вычисленных значений этих количеств разнятся одно от другого.

Если скорость распространения электромагнитного возмущения равна скорости света в других прозрачных средах, то в немагнитных средах диэлектрическая постоянная должна быть равна квадрату показателя преломления.

Больцман* нашел, что это хорошо оправдывается для газов, им исследованных. Жидкости и твердые тела обнаруживают значительные отклонения от этого соотношения, но мы едва ли можем надеяться даже на приближительную проверку, если будем сравнивать результаты наших медленно протекающих электрических опытов со световыми колебаниями, совершающимися биллионы раз в секунду.

Волновая теория в форме, рассматривающей явления света как движение упруго-твердого тела, до сих пор борется с разного рода трудностями**.

Первая и самая важная из них та, что теория указывает возможность колебаний нормальных к поверхности волны. Единственное средство объяснить себе тот факт, что оптические явления, которые могли бы возникнуть благодаря этим волнам, не могут иметь места, это — допустить, что эфир несжимаем.

Вторая трудность, это — трудность ответить на вопрос, почему явления отражения лучше объясняются гипотезой, что колебания перпендикулярны к плоскости поляризации, между тем как явления двойного преломления требуют допущения, что колебания совершаются в этой плоскости?

Третья трудность заключается в том, что для объяснения того факта, что в двупреломляющих кристаллах скорость лучей во всякой главной плоскости, поляризованных в этой плоскости, одинакова, мы должны допустить неко-

* «Wiener Sitzb.», 23, April, 1874.

** См.: Стокс. Report on Double Refraction. 1862, p. 253.

торые в высшей степени искусственные соотношения между коэффициентами упругости.

Электромагнитная теория света удовлетворяет всем этим требованиям единственной гипотезой*, а именно, что электрическое смещение перпендикулярно к плоскости поляризации. Никаких нормальных смещений существовать не может, и допускается, что в двупреломляющих кристаллах диэлектрическая постоянная для каждой главной оси равна квадрату показателя преломления луча, перпендикулярного к этой оси и поляризованного в плоскости, перпендикулярной к этой оси. Больцман** нашел, что эти соотношения приблизительно верны в случае кристаллизованной серы — тела, имеющего перавные оси. Диэлектрические постоянные для этих осей соответственно равны: 4,773, 3,970, 3,811, а квадраты показателей преломления: 4,576, 3,886, 3,591.

Физическое строение эфира. Каково строение эфира? Молекулярное оно или эфир непрерывен?

Мы знаем, что эфир передает поперечные колебания на весьма большие расстояния без чувствительной потери энергии путем рассеяния. Молекулярная среда, движущаяся при условии, что группа соседних друг другу молекул остается группой соседних друг другу молекул и во все время движения, способна передавать колебания без большого рассеяния энергии, но если движение таково, что группы молекулы не просто слегка изменяются в конфигурации, но совершенно разбиваются, так что составляющие их молекулу переходят в новые типы группировок, то при переходе от одного типа группировок к другому энергия правильных колебаний рассеивается в энергию хаотических движений, которую мы называем теплотой.

Следовательно, нельзя допустить, что строение эфира подобно строению газа, в котором молекулы находятся всегда в состоянии хаотического движения, ибо в такой среде поперечное колебание на протяжении одной длины волны ослабляется до величины менее чем одна пятисотая начальной амплитуды. Если эфир имеет молекулярное строение, то группировка молекул должна сохранять один

* Over de theorie der terugkaatsing en breking van het licht. Akademisch Proefschrift door H. A. Lorentz, 1875.

** Über die Verschiedenheit der Dielectricitätsconstante des Krystallisirten Schwefels nach verschiedenen Richtungen, von Ludwig Boltzmann. «Wiener Sitzb.», 8 Oct., 1874.

и тот же тип и конфигурация групп должна только слегка изменяться во время движения.

Тольвер Престон *предположил, что эфир подобен газу, молекулы которого чрезвычайно редко сталкиваются друг с другом, так что их средний свободный пробег гораздо больше всяких планетных расстояний. Он не исследовал свойств такой среды сколь-нибудь обстоятельно, но легко видеть, что мы можем составить теорию, по которой молекулы *никогда* не сталкивались бы одна с другой при их поступательном движении, но летали бы во всех направлениях со скоростью света; и если, далее, мы предположим, что колеблющиеся тела имеют способность сообщать этим молекулам некоторые векторные свойства (как, например, вращение около осей), которые не мешали бы их поступательному движению,— свойства, которые молекулы носили бы с собой, и если изменение среднего значения этого вектора для всех молекул внутри элемента объема было бы процессом, который мы называем светом, тогда уравнения, выражающие это среднее, будут точно такой же формы, как и уравнения, выражающие смещение в обыкновенной теории.

Часто утверждают, что тот простой факт, что среда упруга или сжимаема, есть доказательство того, что она непрерывна, но составлена из отдельных частиц, разделенных пустыми промежутками. Но нет ничего несовместимого с опытом в предположении, что упругость или сжимаемость суть свойства каждой части, как бы мала она ни была, и можно представить, что вся среда разделена на такие части, а в таком случае среда была бы строго непрерывна. Среда, однородная и непрерывная в отношении ее плотности, может быть, однако, сделана разнородной ее движением, как в гипотезе В. Томсона о вихревых молекулах в совершенной жидкости (см. статью «Атом»).

Эфир, если это — среда электромагнитных явлений, вероятно, молекулярен, по крайней мере в этом смысле.

Сэр В. Томсон ** показал, что влияние магнетизма на свет, открытое Фарадеем, зависит от направления движения движущихся частиц, и что оно указывает на вращательное движение в среде, когда она намагничена. См. также «Трактат» Максвелла § 806 и след.

* «Phil. Mag.», Sept. and Nov. 1877.

** «Proceedings of the Royal Society», June, 1856.

Затем, очевидно, что это вращение не может быть вращением среды как целого около некоторой оси, так как магнитное поле может иметь некоторую ширину, и нет никаких доказательств существования движения, скорость которого возрастает с расстоянием от одной постоянной линии в поле. Если существует здесь вращательное движение, то оно должно быть вращением весьма малых участков среды, каждого около его собственной оси, так что среда должна распадаться на множество молекулярных вихрей.

У нас пока нет данных, из которых можно было бы определить размеры или число этих молекулярных вихрей. Но мы знаем, что магнитная сила в некоторой области вокруг магнита сохраняется, пока сталь удерживает свой магнетизм, и так как у нас нет оснований к допущению, что магнит может потерять весь свой магнетизм просто с течением времени, то мы заключаем, что молекулярные вихри не требуют постоянной затраты работы на поддержание своего движения и что, следовательно, это движение не необходимо ведет за собой рассеяние энергии.

Пока еще не создано такой теории строения эфира, которая объясняла бы систему молекулярных вихрей, сохраняющихся неограниченное время без постоянного рассеяния своей энергии в то хаотическое движение среды, которое в обыкновенных средах называют теплотой.

С какими бы трудностями в наших попытках выработать состоятельное представление о строении эфира ни приходилось нам сталкиваться, но несомненно, что межпланетное и межзвездное пространства не суть пространства пустые, но заняты материальной субстанцией, или телом, самым обширным и, нужно думать, самым однородным, какое только нам известно.

Приспособлен ли этот широко разлившийся однородный океан изотропной материи к тому, чтобы не только быть средой физического взаимодействия между отдаленными телами и выполнять другие физические функции, о которых, может быть, пока мы не имеем никакого понятия, но и к тому, чтобы, как внушает нам автор «Невидимой Вселенной», образовать собой материальный организм существ, у которых функции жизни и мысли так же высоки или даже выше, нежели наши, это — вопрос, лежащий далеко за пределами умозрений физики.

Фарадей

Михаил Фарадей, химик, исследователь электричества и физик, родился в Ньюингтоне в Сэррее 22 сентября 1791 г. и умер в Гэмптон-Корте 25 августа 1867 г. Его родители переехали из Йоркшира в Лондон, где отец его был кузнецом. Сам Фарадей поступил в ученики к переплетчику г. Рибо. Письма, написанные им в то время своему другу Венъямину Абботу, дают нам яркое представление о его жизненных целях и о его методе самовоспитания в тот период, когда ум его начинал обращаться к экспериментальному изучению природы. В 1812 г. м-р Дэнс, один из клиентов его хозяина, повел его на четыре лекции сэра Гемфрия Дэви. Фарадей записал эти лекции, а затем обработал их в более пространной форме. Поощряемый Денсом, он написал сэру Г. Дэви письмо, посылая эти записки. «Ответ пришел немедленно, был любезен и благоприятен». Фарадей продолжал работать в качестве подмастерья у переплетчика до 1 марта 1813 г., когда он был зачислен, по рекомендации сэра Г. Дэви, ассистентом в лабораторию Британского королевского института. Он был назначен директором лаборатории 7 февраля 1825 г., а в 1833 г. получил пожизненную фуллертоновскую профессиуру по химии в Институте, без обязательства чтения лекций. Таким образом, он оставался в Институте в течение 54 лет. Он сопровождал сэра Г. Дэви в путешествии по Франции, Италии, Швейцарии, Тиролю, в Женеву и т. д. с 13 октября 1813 г. по 23 апреля 1815 г.

В своей первой химической работе Фарадей следует по пути, открытому Дэви, у которого он работал ассистентом. Он специально изучал хлор и открыл два новых хлористых соединения углерода. Он произвел также первые, ориентировочные опыты с диффузией газов, явлением, на которое впервые указал Дальтон и физическое значение которого было более полно освещено Грэхемом и Лошмдитом. Ему удалось произвести сжижение нескольких газов. Он исследовал сплавы стали и получил несколько новых сортов стекла для оптических целей. Кусок одного из этих тяжелых стекол приобрел впоследствии историческое значение как вещество, в котором Фарадей открыл вращение плоскости поляризации света при помещении стекла в магнитное поле, а также — как первое вещество, которое оттолкнули полюсы магнита. Он пытался также довольно успешно сделать предметом специального изучения и популярного изложения общие методы химии, независимо от получаемых результатов.

Но химические работы Фарадея, как значительны они ни были сами по себе, скоро совершенно затмились его открытиями в области электричества. Первым опытом, который он отметил в записках, было составление им вольтова столба из семи кружков листового цинка, из семи полупенсовиков и шести кусочков бумаги, смоченных соленой водой. При помощи этого столба он разложил серноокислый магний (первое письмо к Абботу 12 июля 1812 г.). С тех пор, какие бы другие вопросы ни привлекали время от времени его внимание, он всегда выбирал среди электрических явлений те проблемы, на которые он обращал всю силу своего мышления и которыми он постоянно занимался, даже тогда, когда год за годом его попытки разрешить их терпели неудачу.

Его первым значительным открытием было получение непрерывного вращения — одного вокруг другого — магнитов и проводов, по которым идет электрический ток. Следствия, которые можно вывести из великого открытия Эрстеда (21 июля 1820 г.), все еще весьма смутно понимали даже самые передовые люди науки. Правда, д-р Волластон питал надежды, что ему удастся заставить провод, по которому идет электрический ток, вращаться вокруг собственной оси, и приходил в 1821 г. вместе с Дэви в лабораторию Королевского института, чтобы произвести этот опыт. Фарадей при этом не присутствовал, но, придя

потом, слышал разговор о предполагаемом вращении провода.

В июле, августе и сентябре того же года Фарадей написал для журнала «Annals of Philosophy» по просьбе г-на Филлипса, издателя этого журнала, исторический очерк об электромагнетизме и повторил почти все опыты, описанные им. Это привело его в начале сентября к открытию метода получения непрерывного вращения вокруг магнита и магнита вокруг провода. Ему не удалось заставить провод или магнит вращаться вокруг собственной оси. Этот первый успех Фарадея в исследованиях по электромагнетизму послужил поводом к чрезвычайно тяжелым, хотя и необоснованным нападкам на него. Мы не будем заниматься этим вопросом, отсылая читателя к книге Бенс Джонса «Life of Faraday».

Мы можем, однако, заметить, что хотя самый факт существования тангенциальной силы между электрическим током и полюсом магнита был уже высказан Эрстедом и ясно понимался Ампером, Волластоном и другими, но существование непрерывного вращения — одного вокруг другого — провода и магнита было научной задачей, требовавшей немало остроумия для своего первоначального разрешения. Действительно, с одной стороны, электрический ток всегда образует замкнутую цепь, а с другой стороны, оба полюса магнита имеют равные, но противоположные свойства и неразрывно связаны, так что каждому стремлению одного из полюсов двигаться вокруг линии тока в одном направлении противостоит равная тенденция другого полюса вращаться в противоположном направлении и, таким образом, один полюс не может ни заставить второй полюс двигаться вокруг проволоки, ни оторваться от него. Вращение не может быть осуществлено, если мы не примем в той или иной форме остроумного решения Фарадея, заставившего ток разделиться в некоторой точке своего пути на два канала, по одному соответственно каждой половине магнита, таким образом, чтобы во время вращения магнита ток переходил из канала, находящегося сверху, в канал, находящийся снизу, так, чтобы середина магнита могла проходить сквозь линию тока, не прерывая ее, подобно тому как Кир провел свою армию посуху через Кинод, отведя реку в канал, прорытый для этого в тылу.

Мы должны теперь перейти к открытию, увенчавшему исследования Фарадея, — к открытию индукции электрических токов.

В декабре 1824 г. он пытался получить электрический ток при помощи магнита и трижды делал тщательные, но безуспешные попытки получить ток в одном проводе при помощи тока в другом проводе или при помощи магнита. Он продолжал упорствовать и 29 августа 1831 г. получил первое доказательство того, что электрический ток может индуцировать ток в другой цепи. 23 сентября он пишет своему другу Р. Филлипсу: «Я теперь занимаюсь опять электромагнетизмом и думаю, что попал на удачную вещь, но не могу еще утверждать это. Очень может быть, что после всех моих трудов я в конце концов вытащу водоросли вместо рыбы». Это был его первый удачный опыт. Еще через девять дней опытов он достиг результатов, описанных в его первой серии «Опытных исследований» («Experimental Researches») и доложенных в Королевском обществе 24 ноября 1831 г.

Напряженным усилием своего мышления он меньше чем в три месяца развил новую идею из первоначального состояния ее до полной зрелости. Все величие и оригинальность фарадеевского достижения могут быть оценены путем рассмотрения последующей истории этого открытия. Как и следовало ожидать, оно немедленно сделалось предметом исследований со стороны всего научного мира. Но некоторые из наиболее опытных физиков оказались неспособными избежать ошибок в формулировке изучаемого явления, полагая при этом, что они применяют более научный язык, чем язык Фарадея. До настоящего времени математики, отбросившие фарадеевский метод формулирования его закона, как несоответствующий точности их науки, никогда не могли изобрести никакой другой существенно отличной формулы, которая бы полно изображала явление, не вводя гипотезы о взаимном действии вещей, не имеющих физического существования, как, например, элементы токов, вытекающих из ничего, затем текущих по проводу и, наконец, снова погружающихся в ничто.

После почти полувековой работы этого рода мы можем сказать, что хотя практические применения открытия Фарадея возросли и возрастают по количеству и по значению с каждым годом, не было найдено ни одного исключения из формулировки этих законов, данной Фарадеем, не прибавлен ни один новый закон, и его первоначальная формулировка и по сей день остается единственной, утверждающей не более того, что может быть проверено опы-

том, и единственной, при помощи которой теория этого явления может быть выражена строго и численно точно, оставаясь в то же время в рамках элементарных методов изложения.

В течение первого периода своих открытий Фарадей установил, кроме открытия индуктивного действия электрических токов, тождественность электризации, производимой разными способами; затем закон об определенном электролитическом действии тока и факт, которому он придавал огромное значение, что каждая единица положительной электризации определенным образом связана с единицей отрицательной электризации, так что невозможно получить то, что Фарадей называл «абсолютным электрическим зарядом» одного рода, не связанным с равным зарядом противоположного рода.

Он открыл также различие в свойстве разного рода веществ принимать участие в электрической индукции — факт, лишь в последние годы признанный учеными на континенте. Впрочем, из неопубликованных до последнего времени бумаг Генри Кавендиша видно, что он не только открыл еще до 1773 г., что стекло, воск, шеллак и камедь имеют более высокую удельную индуктивную емкость, чем воздух, но и действительно определил численное соотношение этих постоянных. Это, конечно, было неизвестно как Фарадею, так и всем остальным физикам его времени.

Первый период открытий Фарадея в области электричества продолжался 10 лет. В 1841 г. он нашел, что ему необходим отдых, и лишь в 1845 г. он вступил во второй период замечательных исследований, в течение которого он открыл действие магнетизма на поляризованный свет и явление диамагнетизма.

Фарадей давно уже думал о возможности использования луча поляризованного света как средства исследования состояния прозрачных тел, находящихся под действием электрических и магнитных сил. Д-р Бенс Джонс («Life of Faraday», т. I, стр. 362) приводит следующую заметку из лабораторного дневника Фарадея от 10 сентября 1822 г.:

«Поляризовал отражением луч лампы и пытался определить, оказывает ли на него какое-нибудь деполяризующее действие вода, помещенная между обоими полюсами вольтового столба в стеклянном сосуде; однажды пользовался волластоновским сосудом; разлагаемыми жидко-

стями являлись чистая вода, слабый раствор сернокислого натрия и крепкая серная кислота. Ни одна из них не оказала никакого влияния на поляризованный свет ни в том случае, когда она была включена в электрическую цепь, ни в том случае, когда она не была включена, так что таким способом нельзя было установить никакого специального расположения частиц».

Одиннадцать лет спустя мы находим в его записной книжке другие записи от 2 мая 1833 г. («Life» Венса Jones, т. II, стр. 29). Он пытался исследовать не только действие постоянного тока, но и действие прерывания его.

«Поэтому я не думаю, чтобы разлагающиеся растворы или вещества оказывали в результате разложения или перегруппировок какое бы то ни было действие на поляризованный луч. Я испытаю теперь неразлагающиеся тела — как твердую селитру, азотнокислое серебро, буру, стекло и др. — в твердом состоянии, чтобы посмотреть, создается ли какое-нибудь внутреннее состояние, которое разрушается при разложении, т. е. существует ли, когда их нельзя разложить, какое-либо состояние электрического напряжения. Мое стекло с бурой хорошо и обычное электричество лучше вольтаического».

6 мая он производит дальнейшие опыты и заключает: «Следовательно, я не вижу никаких причин для того, чтобы предполагать, что можно сделать явной какую-либо структуру или напряжение в разлагающихся или в неразлагающихся телах, находящихся в состоянии непроводимости или же проводимости».

Подобные упомянутым выше опыты были недавно произведены в Глазго д-ром Кэрром, полагающим, что он получил явное свидетельство действия на луч поляризованного света, когда электрическая сила перпендикулярна к лучу и наклонена под углом в 45° к плоскости поляризации. Однако многие физики не были в состоянии получить результатов Кэрра.

Наконец, в 1845 г. Фарадей взялся за старую проблему, но на этот раз с полным успехом. Прежде чем описать полученные им результаты, мы упомянем о том, что в 1862 г. он избрал вопрос о связи между светом и магнетизмом предметом своей последней экспериментальной работы. Он пытался, но безуспешно, открыть какое-либо изменение в спектральных линиях пламени, подвергнутого действию мощного магнита.

Эта длинная серия исследований является примером его настойчивости. Его энергия проявилась в том пути, которому он следовал при своем открытии и в конце которого он все же добился успеха. Впервые явление вращения плоскости поляризации света под действием магнетизма было получено им 13 сентября 1845 г.; прозрачным веществом служило изобретенное им же тяжелое стекло.

30 августа 1845 г. он начал работать над проблемой прохождения поляризованного света сквозь электролиты. Через три дня он работал с обычным электричеством, пробуя стекло, тяжелое оптическое стекло, кварц, исландский шпат — все безрезультатно, так же как и при предыдущих попытках. 13 сентября он работал над линиями магнитных сил. Исследовались воздух, флинт, стекло, горный хрусталь, известковый шпат — но все безрезультатно.

«Производились опыты с тяжелым стеклом. Оно не дало никаких результатов ни когда одинаковые магнитные полюсы или противоположные полюсы паходились по разные стороны (относительно направления поляризованного луча), ни когда оба одинаковых полюса находились по одну сторону как при постоянном, так и при прерывистом токе. Но когда противоположные полюсы находились с одной стороны, то имелось воздействие на поляризованный луч, и таким образом было доказано, что магнитная сила и свет находятся в каком-то соотношении. Весьма вероятно, что этот факт окажется чрезвычайно плодотворным и весьма важным в деле исследования условий проявления сил природы».

Он немедленно продолжает исследовать другие вещества, но «без результатов» и заканчивает, говоря: «с меня хватит на сегодня». 18 сентября он «великолепно поработал весь день». В течение сентября он работал четыре дня: в октябре — шесть, а 6 ноября он послал в Королевское общество 19-ю серию своих «Experimental Researches», в которых полностью излагаются все условия получения явлений. Отрицательное вращение в ферромагнитной среде — единственный важный факт, который оставалось открыть. (Впоследствии открыт в 1856 г. Верде.)

Его работа этого года еще не была закончена. 3 ноября был получен новый подковообразный магнит, и Фарадей немедленно начинает экспериментировать над действием магнита на поляризованный луч, проходящий через газы, но безрезультатно. На следующий день он повторяет опыт,

не давший никакого результата 6 октября. Стержень из тяжелого стекла был подвешен на шелковой нити между полюсами нового магнита. «Когда это было сделано и стержень пришел в состояние покоя, я обнаружил, что мог действовать на него магнитными силами и придавать ему некоторое положение». К 6 октября он послал Королевскому обществу 20-ю, а 24 декабря — 21-ю серию своих «Researches», в которых полностью описывались свойства диамагнитных тел. Таким образом, два великих открытия были разработаны, как и одно его более раннее открытие, в течение приблизительно трех месяцев.

Открытие магнитного вращения плоскости поляризации света, хотя и не вело к столь же важным практическим применениям, как некоторые из более ранних открытий Фарадея, имело для науки величайшую ценность, так как давало полное динамическое доказательство того, что, где бы ни существовали магнитные силы, там есть материя, малые частицы которой вращаются вокруг осей, параллельных направлению этой силы.

Мы привели несколько примеров сосредоточенных усилий Фарадея для отождествления, казалось бы, различных сил природы, его дальновидности при выборе предмета исследования, его настойчивости в преследовании поставленной перед собой цели, энергии, с которой он разрабатывал результаты своих исследований, и точности и полноты окончательных формулировок законов явлений.

Особенности исследовательского духа Фарадея легко обнаружить, читая его произведения. Но в его натуре была и другая сторона, которой он придавал не меньшее значение и которая проявлялась в его отношении к друзьям, к семье и к церкви, к которой он принадлежал.

Его письма, его беседы всегда были полны содержанием, могущим вызвать живой интерес, и никогда не содержали ничего порождающего недоброжелательство. В тех редких случаях, когда ему приходилось, выходя из области науки, вступать на поприще полемики, он ограничивался установлением фактов, предоставляя им говорить самим за себя. Он был совершенно свободен от гордыни и самовосхваления. В период расцвета его творческих сил он всегда с благодарностью принимал всякую поправку и пользовался всяким даже самым скромным указанием, которое позволяло ему внести улучшение в какую-либо деталь его работы. Когда к концу жизни его память и умст-

венная мощь стали ослабевать, он незаметно и без жалоб отказался от всей той части своей работы, которую не мог более вести с той эффективностью, которую считал необходимой. Когда же он не мог более заниматься наукой, то удовлетворился спокойной жизнью, посвященной дружеским и семейным привязанностям, которые он лелеял не менее усердно, чем научные свои труды.

Родители Фарадея принадлежали к очень малочисленной и замкнутой христианской секте, обычно называемой последователями Роберта Сандемана. Фарадей посещал ее собрания с детства; в возрасте 30 лет он официально вступил в нее и дважды, в различное время, исполнял функции старосты. Его точка зрения на отношения между наукой и религией изложена в лекции об умственном воспитании, прочитанной в 1854 г. и опубликованной в конце его книги «Researches in Chemistry and Physics».

О цветовом зрении

Всякое зрение есть цветовое зрение, так как только наблюдая разницу в цвете, мы различаем форму предметов. Я включаю различие в яркости или в оттенке¹ в различие в цвете.

Где-то в начале этого столетия Томас Юнг сделал в Королевском институте первое достоверное сообщение о той доктрине цветового зрения, которую я собираюсь проиллюстрировать. Ее можно сформулировать следующим образом. Мы способны воспринимать три цветовых ощущения. Свет различного вида возбуждает эти ощущения по-разному, и все вариации цветового зрения осуществляются при различных комбинациях этих трех первичных ощущений. В этом утверждении есть одно слово, на котором мы должны зафиксировать свое внимание. Это слово — ощущение. Кажется почти трюизмом говорить, что цвет — это ощущение; и еще Юнг, действительно признавая эту основную истину, дал первую последовательную теорию цвета. Насколько мне известно, Томас Юнг был первым, кто, пачав от всем известного факта, что существуют три основных цвета, нашел объяснение этому факту не в природе света, а в строении человека. Даже среди тех, кто писал о цвете после Юнга, некоторые полагали, что они должны изучать свойства пигментов, а другие — что они должны анализировать световые лучи. Они стремились по-

¹ Д. К. Максвелл определяет оттенок (shade) как больший или меньший недостаток яркости (см. стр. 221).

стичь цвета, изучая нечто в окружающей природе — вне себя.

Итак, если ощущение, которое мы называем цветом, имеет некоторые законы, то должно существовать что-то в нашей собственной природе, что определяет вид этих законов; и мне нет необходимости говорить вам, что единственные данные, которые мы можем получить о себе, дает нам сознание. Следовательно, наука о цвете должна рассматриваться как существенно теоретическая наука. Она отличается от большей части того, что называют теоретической наукой в широком смысле, от того, что составляет физические науки, и, в частности, от оптики и анатомии. Но дает доказательства тому, что она — теоретическая наука, многочисленными иллюстрациями, которыми она снабжает различные действия мозга.

Мы всегда чувствуем себя увереннее, когда имеем дело с физикой. Поэтому я пачну с показа того, как мы применяем открытия Ньютона к преобразованию света, чтобы дать вам возможность самим испытать различные ощущения цвета. До Ньютона белый свет считали из всех известных вещей самым чистым. Когда свет оказался окрашенным, предположили, что он загрязняется при соприкосновении с грубыми телами. Мы можем еще думать, что белый свет — эталон чистоты, хотя Ньютон учил, что его чистота не означает его простоты.

Получим теперь призматический спектр на экране. Видим простые цвета, из которых всегда состоит белый свет. Мы можем различить множество оттенков, переходя от одного края к другому; но, применив мощные спектроскопы или воспользовавшись работами тех, кто составил атлас спектров, узнаем множество разновидностей света, каждая из которых требует специального изучения. С увеличением разрешающей способности приборов возрастает в том же отношении число линий, видимых в спектре.

Свет, как доказал Ньютон, состоит из тех лучей, на которые он разлагается прибором. Предметы, которые мы называем окрашенными, будучи освещены белым светом, производят отбор этих лучей, и до нашего глаза доходит лишь часть того света, который попадает на них. Но если их освещают лучи только одного цвета спектра, то они могут казаться только этого цвета. Если я помещу диск, состоящий из чередующихся квадрантов красной и зеленой бумаги, в пучок красных лучей, то он покажется весь крас-

лым, но красные квадранты будут ярче. Если я помещу диск в пучок зеленых лучей, то оба листа покажутся зелеными, но красный диск теперь будет самым темным. Таким образом, это является оптическим объяснением окраски тел, освещенных белым светом. Тела разделяют белый свет на компоненты, поглощая одни и отражая другие.

Возьмем два прозрачных раствора. Один кажется желтым — он содержит бихромат углекислого калия; другой представляется голубым — он содержит сульфат меди. Если я пропущу свет электрической лампы одновременно через оба раствора, то пятно на экране окажется зеленым. С помощью спектра мы сможем объяснить это. Желтый раствор обрезает голубой конец спектра, пропуская только красный, оранжевый, желтый и зеленый. Голубой раствор обрезает красный конец, пропуская только зеленый, голубой и фиолетовый. Как видите, через оба раствора может пройти только свет зеленого цвета. Аналогично смесь большого количества голубой и желтой красок кажется зеленой. Свет, попадающий на смесь, так распределяется между желтыми и голубыми частицами, что остается только зеленый. Но желтый и голубой свет при смешении не дадут зеленого, как вы увидите, если мы направим их одновременно на одну и ту же часть экрана.

То, что многие не только продолжают верить, основываясь на смешивании красок, что голубой и желтый дают зеленый, но даже убедили себя, что они могут отделить ощущение голубизны и желтизны в ощущении зеленого, служит поразительной иллюстрацией мышления.

До сих пор мы анализировали свет, используя окрашенные вещества. Теперь мы должны вернуться, еще под руководством Ньютона, к призматическому спектру. Ньютон не только

Раскрыл, что таит в себе сиянье дня,

но и указал, как свести цвета опять вместе. У нас здесь чистый спектр, но вместо того чтобы ловить его на экране, мы пропустим его через линзу, достаточно большую, чтобы собрать все цветные лучи. Эти лучи проходят в соответствии с хорошо известными положениями оптики, чтобы дать изображение призмы на экране, расположенном на соответствующем расстоянии. Это изображение создается лучами всех цветов, и вы видите результат: оно белое. Но если я задержу любые цветные лучи, изображе-

ние более не будет белым, а станет цветным; если я пропущу лучи только одного цвета, изображение призмы окажется того же цвета.

Здесь у меня есть набор щелей, с помощью которых я могу выделить один, два или три вида лучей спектра; они-то и создадут изображение призмы, в то время как остальные лучи будут задержаны. Это дает мне полную власть над цветами спектра, и я могу образовать на экране любой возможный оттенок, меняя ширину и положение щелей, через которые проходит свет. Я также мог бы, поставив линзу на пути света, показать вам увеличенное изображение щелей, на котором бы вы увидели различные сорта света, которые составляют смесь.

Есть цвета — красный, зеленый и голубой, а смесь этих трех, как видите, почти белая. Попробуем смешать два из этих цветов. Красный и голубой дают яркий пурпур или темно-красный; зеленый и голубой дают цвет морской волны или лазурный; красный и зеленый — желтый.

Здесь мы вновь сталкиваемся с не всем известным фактом. Ни один художник, желая получить ярко-желтую краску, не станет смешивать красную и зеленую. В результате получился бы грязный серовато-коричневый цвет. Природа снабжает художника яркими желтыми красками, и он пользуется ими. При смешении красной и зеленой красок на палитре, красный свет, рассеиваемый красной краской, теряет почти всю свою яркость, проходя среди частиц зеленой, и то же относится к зеленому свету. Но если кисть, которой мы рисуем, состоит из лучей света, то эффект от двух слоев цвета получается совсем другой. Красный и зеленый дают очень яркую желтизну, интенсивность которой, как можно показать, равна интенсивности чистейшего желтого в спектре.

Теперь я расположу щели так, чтобы они пропускали желтый свет спектра. Как видите, он подобен по цвету желтому, полученному смешением красного и зеленого, но отличается от смеси, будучи строго однородным с физической точки зрения: призма не разделяет его на две части, как смесь. Теперь скомбинируем этот желтый с голубым из спектра. В результате получаем не зеленый; мы можем сделать его розовым, если наш желтый был теплой окраски, но если мы выберем зеленовато-желтый, то сможем получить хороший белый.

Вы увидели наиболее замечательные комбинации цве-

тов — другие отличаются от них по степени, но не по качеству. Теперь я должен попросить вас не думать больше о физических устройствах, с помощью которых вы смогли увидеть эти цвета, и сосредоточить внимание на цветах, которые вы видели, т. е. на некоторых ощущениях, которые доходят до вашего сознания. Здесь мы сталкиваемся с такого рода трудностями, которые не встречаются при чисто физическом исследовании. Мы все можем воспринимать эти ощущения, но никто не может описать их. Они не только субъективное свойство, но и непередаваемое свойство. Мы называем внешние объекты, возбуждающие наши ощущения, но не сами ощущения.

Когда мы смотрим на широкое поле одного цвета, будь то цвет действительно простой или составной, мы обнаруживаем, что ощущение цвета воспринимается как одно и неделимое. Мы не можем так выделить те элементарные ощущения, из которых оно состоит, как мы можем различить отдельные ноты музыкального аккорда. Цвет, следовательно, должен рассматриваться как нечто простое, качественно способное к изменениям.

Чтобы привнести качество в точную науку, мы должны понять, как оно зависит от значений одной или более величин, и первый шаг в этом — определение числа переменных, которые необходимы и достаточны для определения качества цвета. Нам не надо никаких тщательных экспериментов для доказательства того, что качество цвета может изменяться тремя, и только тремя, независимыми способами.

Один способ выразить это — сказать вслед за художниками, что цвет может изменяться по окраске, тону и оттенку. Лучший пример цветового ряда, изменяющегося по окраске, — сам спектр. Разница в окраске может быть проиллюстрирована разницей между соседними цветами в спектре. Ряд окрасок в спектре неполон; поэтому для получения пурпурных оттенков мы должны смешать красный и голубой.

Тон может быть определен как степень чистоты цвета. Таким образом, ярко-желтый, темно-желтый и кремовый создают цветовой ряд, примерно одинаковый по окраске, но изменяющийся по тону. Тона, соответствующие любой данной окраске, создают ряд, начинающийся с наиболее ярко выраженного цвета и закапчивающийся совершенно нейтральным тоном.

Оттенок можно определить, как больший или меньший недостаток яркости. Если начать с какого-либо тона любой окраски, то можно создать постепенный переход от этого цвета к черному, и этот переход есть последовательность оттенков этого цвета. Таким образом, можем сказать, что коричневый — это темный оттенок оранжевого.

Качество цвета может изменяться тремя различными и независимыми способами. Мы не можем представить себе что-либо другое. Фактически, если мы соотнесем один цвет с другим с тем, чтобы согласовать их в окраске, тоне и оттенке, два цвета будут абсолютно неразличимы. Следовательно, существуют три, и только три, способа, которыми цвет может изменяться.

Я сознательно избегал пока говорить о том, что могло быть названо научным экспериментом, а хотел указать на возможность просто из нашего повседневного опыта определить число величин, от которых зависит изменение цвета.

Возьмем некоторую точку в этой комнате: если я хочу определить ее положение, я должен оценить три расстояния — а именно, высоту над полом, расстояние от стены за мной и расстояние от стены слева от меня.

Это — только один из многих способов определения положения точек, но один из наиболее удобных. И цвет также зависит от трех величин. Если мы укажем интенсивность трех первичных цветовых ощущений и сможем каким-либо способом измерить эти три интенсивности, то можем рассматривать цвет как определенный этими тремя измерениями. Следовательно, определение цвета подобно определению точки в комнате, поскольку оба они зависят от трех измерений.

Сделаем следующий шаг и предположим, что цветовые ощущения, измеренные по некоторой шкале интенсивности, и точка, для которой известны три расстояния, или координаты, содержат одинаковые по величине степени интенсивностей и число футов соответственно. Тогда мы можем сказать, используя геометрическую интерпретацию, что цвет описывается математически точкой, определенной в комнате таким образом; и если есть несколько цветов, представленных несколькими точками, то хроматические связи цветов будут соответствовать геометрическим связям точек. Такой метод выражения связей цветов очень помогает воображению. Эти связи цветов, устанавливаемые чрезвычайно ясно, вы найдете в книге Бенсона «Руковод-

ство по цвету», одной из очень немногих книг по цвету, в которой утверждения основаны на правильных экспериментах.

Но есть и еще более удобный способ представить связи цветов — с помощью цветового треугольника Юнга. На плоскости невозможно представить себе все мыслимые цвета; для этого необходимо пространство трех измерений. Но если мы рассматриваем цвета только одного и того же оттенка, т. е. цвета, у которых сумма интенсивностей трех ощущений одинакова, то изменения в тоне и окраске всех таких цветов могут быть представлены точками на плоскости. Для этого мы должны провести плоскость, отсекающую равные отрезки от трех линий, представляющих первичные ощущения. Часть этой плоскости внутри пространства, в котором мы распределяли наши цвета, будет равносторонним треугольником. Три основных цвета — в трех вершинах треугольника, белый или серый — в середине его, тон, или степень чистоты, любого цвета будет определяться расстоянием от средней точки, а окраска будет зависеть от направления линии, соединяющей ее со средней точкой.

Таким образом, представления о тоне и об окраске могут быть геометрически выражены на треугольнике Юнга. Чтобы понять, что означает оттенок, мы должны только предположить, что освещенность всего треугольника увеличивается или уменьшается, так что с помощью такого регулирования освещенности треугольник Юнга можно приспособить для представления любого изменения цвета. Если мы теперь выберем какие-либо два цвета в треугольнике и смешаем их в любой пропорции, то результирующий цвет обнаружим на линии, соединяющей компоненты в точке, соответствующей их центру тяжести.

Я ничего не говорил ни о природе этих трех первичных ощущений, ни каким цветам они более всего соответствуют. Для того чтобы изобразить на бумаге связи между действительными цветами, необязательно знать основные цвета. Мы можем заранее взять любые три цвета в качестве вершин треугольника и определить положение любого другого наблюдаемого цвета относительно этих цветов и, таким образом, получаем некую диаграмму цветов.

Все видимые нами цвета, возбуждаемые различными лучами призматического спектра, имеют величайшее научное значение. Весь свет состоит из одного сорта этих лучей,

либо из их комбинаций. Цвета всех природных тел составлены из цветов спектра. Следовательно, если мы можем построить диаграмму цветности спектра, дающую связи между цветами в различных составах, то цвета всех естественных тел определим по диаграмме в некоторых границах, устанавливаемых положением цветов в спектре.

Но диаграмма спектра поможет нам также узнать природу трех первичных ощущений. Так как каждое ощущение — существенно положительная величина, то любое составное цветовое ощущение должно находиться внутри треугольника, у которого основные цвета являются углами. В частности, диаграмма спектра должна целиком находиться внутри треугольника цветов Юнга, так что если какой-либо цвет идентичен с одним из цветовых ощущений, диаграмма спектра должна представляться линией, образующей острый угол в точке, соответствующий этому цвету.

Я уже показывал, как можно смешать любые три цвета спектра и менять цвет смеси, изменяя интенсивность любой из трех компонент. Если мы поместим этот составной цвет рядом с другим цветом, то можем изменить составной цвет до точного совпадения с другим. Это может быть сделано с наибольшей точностью, когда результирующий цвет — почти белый. Я сконструировал прибор, который назвал бы цветовым ящиком, для сравнения двух цветов. Он может быть использован одновременно только одним наблюдателем и требует дневного света, почему я и не принес его с собой сегодня вечером. Он является просто реализацией конструкции одного из предложений Ньютона из «Лекций по оптике», где он показал, как выделить пучок света, разделить его на компоненты, оперировать с этими компонентами, как нам угодно, а затем соединить их опять в пучок. Наблюдатель смотрит в ящик через маленькую щель. Он видит круглое световое поле, состоящее из двух полукругов, разделенных вертикальным диаметром. Левый полукруг образован светом, который ослабляется за счет двух отражений от поверхности стекла. Правый полукруг — смесь цветов спектра, положение и интенсивность которых регулируется системой щелей.

Наблюдатель приходит к определенному мнению о цветах двух полукругов. Предположим, ему кажется, что правая часть более красная, чем другая. Тогда оператор с помощью внешних винтов уменьшает ширину одной из ще-

лей, так что смесь становится менее красной; и так продолжается до тех пор, пока правый полукруг не будет казаться точно таким же, как и левый, а линия раздела не станет почти невидимой.

Если оператор и наблюдатель поработают некоторое время вместе, они начнут понимать друг друга, и цвета будут приводиться в соответствие значительно быстрее, чем вначале.

Когда оба полукруга совершенно совпадают друг с другом, отмечается положение щелей по шкале, а ширина каждой щели тщательно измеряется калибром. Полученный результат измерения называется «цветовым уравнением». Оно утверждает, что смесь трех цветов является, с точки зрения наблюдателя, идентичной с нейтральным тоном, который мы назовем стандартным белым. Каждый цвет характеризуется положением щели по шкале, которая указывает на его положение в спектре, и шириной щели, которая измеряет его интенсивность.

Для исследования спектра мы выбираем три точки для сравнения и называем их тремя стандартными цветами. Стандартные цвета выбираются исходя из тех же принципов, которыми руководствуются инженеры в выборе станции слежения. Они должны быть заметными и неизменными и не находиться на одной прямой.

На спектральной диаграмме вы можете обнаружить связи между различными цветами и между ними и тремя стандартными. Очевидно, что стандартный зеленый, который я выбрал, не может оказаться одним из трех основных цветов, потому что остальные цвета не все попадают внутрь треугольника, полученного при их соединении. Но диаграмма спектра может быть описана как состоящая из двух прямых, сходящихся к точке. Эта точка соответствует зеленому цвету на расстоянии примерно $\frac{1}{5}$ от b к F . Этот зеленый имеет, по измерениям Дитшайнера, около $0,000510$ мм и является либо действительно основным зеленым, либо, по крайней мере, ближе всего подходит к тому, что мы можем всегда видеть. Двигаясь от этого зеленого к красному концу спектра, мы обнаружим другие цвета, лежащие почти точно на прямой. Крайний красный находится значительно дальше стандартного красного, но на той же прямой, и потому мы можем, если у нас нет другого доказательства, допустить, что крайний красный действительно основной красный. Однако, как мы увидим,

настоящий основной красный не точно совпадает по цвету с любой частью спектра. Он лежит до некоторой степени вне крайнего красного, но на той же прямой.

С голубого конца основного зеленого цветовые уравнения редко так точны. Однако цвета лежат на линии, очень близкой к прямой. Я не мог бы указать на какую-либо измеримую цветовую разницу между крайним индиго и фиолетовым. Цвета этого конца спектра представляются рядом очень близко расположенных точек. Мы можем допустить, что основной голубой есть ощущение, несколько отличное от того, которое возбуждается частями спектра вблизи G.

Первое, что приходит большинству на ум, то, что деление спектра ни в коем случае не является удовлетворительным. Между красным и зеленым мы имеем ряд цветов, несомненно, очень отличающихся друг от друга, и имеющих такие характерные особенности, что двум из них — оранжевому и желтому — дали различные названия. С другой стороны, цвета между зеленым и голубым имеют очевидное сходство с одним или обоими крайними цветами, но никакие различные названия для этих цветов не стали общепринятыми.

Я не собираюсь улаживать это несоответствие между повседневным и научным опытом. Оно только указывает на невозможность лишь на основе самоанализа верно проанализировать наши ощущения. Сознание — наш единственный источник; но сознание необходимо систематически проверять для получения сколько-нибудь правдоподобных результатов.

Благодаря любезности профессора Хаксли я располагаю изображением той ткани на задней стенке глаза, на которую попадает свет. Она состоит из мельчайших тел, похожих на стерженьки и конусы или заостренные палочки, и можно себе представить, что мы узнаем о форме предметов благодаря тому, что наше восприятие изменяется в соответствии с тем, на окончание каких стерженьков попадает свет, так же как узор на ткани, создаваемый на ткацком станке Жекарда, зависит от способа, каким перфорированные карты действуют на систему движущихся стержней в этой машине. Говоря о глазах, мы имеем, с одной стороны, свет, попадающий на эту изумительную ткань, а с другой стороны, чувство зрения. И мы не можем сравнить эти две вещи; они принадлежат к противоположным

категориям. Они разделены огромной бездной — всей Метафизикой. Вероятно, если проследить путь нервного возбуждения

От тонких нитей до чувствующего мозга,

можно будет сделать открытие в физиологии, но это не привело бы нас к лучшему пониманию тех цветовых ощущений, которые мы можем узнавать только, воспринимая их сами. И еще, хотя невозможно познакомиться с ощущением, анатомически изучая орган, с которым оно связано, мы можем использовать ощущение для исследования анатомической структуры.

Замечательный тому пример — вывод теории Гельмгольца о строении сетчатки из теории Юнга относительно восприятия цвета. Юнг утверждает, что существуют три элементарных ощущения цвета; Гельмголец утверждает, что существуют три системы нервов в сетчатке, каждая из которых обладает свойством при действии на нее света или любого другого возмущающего фактора возбуждать в нас одно из этих трех ощущений.

До сих пор анатомам не удалось отличить эти три системы нервов при наблюдении в микроскоп. Но оно показало физиологам, что ощущение, возбужденное отдельным нервом, может изменяться только при изменении интенсивности. Интенсивность ощущения может меняться от самого слабого впечатления до невыносимой боли. Но какова бы ни была возбуждающая причина, ощущение остается одинаковым при одной и той же интенсивности. Если допустить такое представление о функции нерва, то можно перейти от того, что цвет может изменяться тремя различными способами, к выводу, что эти три вида изменений происходят от независимого действия трех различных нервов или системы нервов.

Замечательные наблюдения по ощущению цвета были проделаны М. Зигмундом Экснером в физиологической лаборатории Гельмгольца в Гейдельберге. Глядя на интенсивный свет яркого цвета и двигая пальцами перед глазами, он добился быстрой смены света и темноты. При этих обстоятельствах особая детальная структура, которую многие из нас могли наблюдать, оказалась в поле зрения. М. Экснер устанавливает, что характер этой структуры различается в зависимости от цвета используемого света. Когда пользуются красным светом, то видна покрытая

жилками структура; когда свет зеленый, поле кажется покрытым мелкими черными точками; а когда свет голубой, видны пятна, по размеру бóльшие, чем точки в зеленом свете, и более светлые.

Я не могу сказать, характерны ли эти явления для всех глаз или их физической причиной является какое-либо различие в устройстве нервов трех систем по теории Гельмгольца, но я уверен, что если эти системы нервов действительно существуют, то нет метода более подходящего для демонстрации их существования, чем тот, который избрал М. Экснер.

Цветовая слепота

Наиболее ценные доказательства, которыми мы обладаем относительно цветового зрения, получены благодаря слепым к цвету. Значительное число людей неспособны различать определенные пары цветов, которые обычным людям представляются контрастными. Доктор Дальтон, основатель атомистической теории химии, рассказал нам о самом себе.

На действительную причину этой странности зрения впервые указал сэр Джон Гершель в письме к Дальтону в 1832 г., которое не было известно до опубликования доктором Генри биографии Дальтона. Недостаток состоит в отсутствии одного из трех первичных ощущений цвета. Такое зрение зависит от переменных интенсивностей двух ощущений вместо трех. Лучшее описание такого зрения дано профессором Полем в его рассказе о самом себе в «Philosophical Transactions» (1859).

Во всех случаях, которые проверялись с достаточной тщательностью, отсутствующее ощущение, видимо, сходно с тем, что мы называем красным. Точка *P* на диаграмме спектра дает связь отсутствующего ощущения с цветами спектра, выведенную из наблюдений с цветовым ящиком профессора Поля.

Если было бы возможно представить цвет, соответствующий этой точке, на диаграмме, то она для профессора Поля была бы невидимой, абсолютно черной. Если цвет не находится в пределах цветового ряда спектра, то мы не можем его изобразить; а фактически, люди с цветовой слепотой могут замечать крайний конец спектра, который мы

называем красным, хотя он кажется им значительно темнее, чем нам, и не возбуждает в них ощущения, которое мы называем красным. На диаграмме интенсивностей трех ощущений, возбужденных различными частями спектра, верхний рисунок, отмеченный буквой *П*, выведен из наблюдений профессора Поля; в то время как нижний рисунок, обозначенный буквой *К*, основан на наблюдениях очень точного наблюдателя обычного типа.

Единственное отличие между двумя диаграммами то, что на верхнем рисунке отсутствует красная кривая. Форма двух других кривых почти одинакова для обоих наблюдателей. Следовательно, у нас есть большие основания для вывода, что цветовые ощущения, которые воспринимает профессор Поля, — это те, которые мы называем зеленым и голубым. Это — результат моих размышлений; но профессор Поля, а также и все, страдающие цветовой слепотой люди, которых я знал, отрицают, что зеленый — один из его ощущений. Такие люди ошибаются относительно зеленых предметов и путают их с красными. Цвета, относительно которых они никогда не ошибаются, — голубой и желтый, и они упорно заявляют, что желтый, а не зеленый, они способны видеть.

Чтобы объяснить такое несоответствие, надо вспомнить, что люди с цветовой слепотой заучивали название цветов по той же системе, что и мы. Им говорили, что небо — голубое, трава — зеленая, а солдатские шинели — красные. Они воспринимали разницу в цвете между этими предметами, и часто считали, что видят те же цвета, что и мы, но только не так хорошо. Но если посмотрим на диаграмму, то увидим, что самый яркий пример их второго ощущения в спектре находится не в зеленой области, а в той, которую мы называем желтой и которую мы учили их называть желтой. Давая изображение спектра ниже кривых профессора Поля, я пытаюсь представить людям с обычным зрением то, что видели бы в спектре люди с цветовой слепотой. Я с трудом решился привлечь ваше внимание к рисунку, так как если бы вы решили, что любая нарисованная картина дала бы вам возможность видеть зрением другого человека, то моя лекция определенно оказалась бы напрасной.

О желтом пятне

Опыты по цвету обнаруживают весьма значительные различия между зрением разных, но относящихся к обычному типу, людей. Например, цвет, который один, при сравнении его с белым, назовет розоватым, другой назовет зеленоватым. Однако различие происходит не от разнообразия в природе цветовых ощущений у разных людей. Это точно то же, что наблюдалось бы, если бы кто-либо носил желтые очки. Фактически, большинство из нас имеет примерно в середине сетчатки желтое пятно, через которое лучи должны проходить прежде, чем достигнут чувствительного органа. Это пятно кажется желтым, потому что оно поглощает лучи, близкие к линии F , которая зеленовато-голубого цвета. Некоторые обладают сильно развитым желтым пятном. Мои собственные наблюдения спектра вблизи линии F на сей счет малоценны. Я обязан профессору Стоксу знанием метода, с помощью которого каждый может увидеть, есть ли у него желтое пятно. Он состоит в том, чтобы смотреть на белый предмет через раствор хлорида хрома или на экран, на который попадает свет, прошедший через этот раствор. Этот свет — смесь красного с тем, который так интенсивно поглощается желтым пятном. Когда он попадает на обычную поверхность сетчатки, то оказывается нейтрального тона, но когда он попадает на желтое пятно, то только красный свет достигает оптического нерва, и мы видим красное пятно, плывущее подобно розовому облаку по освещенному полю.

Очень немногие не могут обнаружить таким образом желтое пятно. Наблюдатель K , цветовые уравнения для которого были использованы при изготовлении диаграммы спектра, один из тех немногих, которые ничего не видят через желтые очки. Для меня положение белого света в диаграмме спектра смещено в желтую сторону от действительно белого даже при использовании внешних частей сетчатки; но если я смотрю прямо на него, то он становится значительно более желтым, как показано точкой WC . Любопытно, что мы не видим это желтое пятно в каждом случае и что мы не считаем белые предметы желтыми. Но если мы некоторое время носим очки любого цвета или живем в комнате, освещаемой одним цветом, то вскоре начнем определять белую бумагу как белую. Это показывает, что

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 прошло 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 естественные опыты 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 диабатических процессах. Если для одноатомного газа, например паров ртути, значение отношения обеих удельных теплоемкостей, рассчитанных согласно газовой теории, при условии шарообразности молекул, равно $\frac{5}{3}$, 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 $\frac{4}{3}$, тогда как для водорода, кислорода, азота измерения дают $\frac{7}{5}$. 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 проследивать 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-

торые 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 дальнодействии, 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 дальнодействии, 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 беспрецедентным 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-

ности, поскольку она изменчива. К понятию материальной точки, безусловно, привели наблюдаемые тела; материальную точку можно себе представить подобной лишенному признаков протяженности, формы, пространственной ориентации, всех «внутренних» свойств, сохранившему лишь инерцию и трансляцию, движущемуся телу, к которому добавляется лишь понятие силы. Материальные тела, которые психологически вызвали образование понятия «материальная точка», со своей стороны сами должны были теперь рассматриваться как система материальных точек. Необходимо отметить, что по своей сущности эта теоретическая система является атомистической и механистической. Все события рассматривались чисто механически, т. е. как происходящие по закону Ньютона простые движения материальных точек.

Самым уязвимым местом теоретической системы, отвлекаясь от обсуждающихся вновь в последнее время трудностях понятия «абсолютного пространства», было главным образом учение о свете. В соответствии со своей теорией Ньютон считал, что свет тоже состоит из материальных точек. Уже тогда со всей остротой возникала проблема: что происходит с материальными точками, образующими свет, при его поглощении? Кроме того, не удовлетворял тот факт, что для описания света и весомой материи необходимо было ввести в рассмотрение материальные точки совершенно различного рода. К ним позже добавились частицы третьего рода — электрические, с совершенно другими основными свойствами. Наконец, слабость всей системы заключается в абсолютно произвольном гипотетическом выборе сил, определяющих происходящие явления. И все-таки эта концепция реальности дала многое. Как случилось, что почувствовалась необходимость ее остановить?

Чтобы придать своей системе математическую форму, Ньютон был вынужден ввести понятие производной и представить законы движения в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. Это был, возможно, крупнейший мыслимый шаг, который суждено было сделать кому-либо из людей. Дифференциальные уравнения в частных производных здесь не нужны, и Ньютон ими систематически и не пользовался. Но эти уравнения были необходимы для механики деформируемых тел; это было связано с тем, что в начале в таких задачах не играло роли, каким образом тела построены из материальных точек.

Дифференциальное уравнение в частных производных вошло в теоретическую физику в качестве служанки, но постепенно оно стало госпожой. Это началось в XIX в., когда утвердилась волновая теория света. Свет в пустом пространстве рассматривался как колебательный процесс в эфире, и должно было казаться бесполезным считать и эфир конгломератом материальных точек. Здесь впервые дифференциальные уравнения в частных производных выступили в физике как естественное выражение элементарного процесса. Континуальное поле вошло в одну из областей теоретической физики как представитель физической реальности наряду с материальной точкой. Этот дуализм не исчез до сих пор хотя такое положение должно казаться неестественным.

Хотя после этого представление о физической реальности перестало быть чисто атомистическим оно оставалось механистическим. Вновь и вновь пытались все происходящие события интерпретировать как движения инертной массы, ибо другой трактовки просто нельзя было себе представить. И тут наступил великий перелом, который во все времена будут связывать с именами Фарадея, Максвелла и Герца. Львиная доля в этой революции принадлежит Максвеллу. Он показал, что все известное тогда о свете и электромагнитных явлениях может быть изложено с помощью его, ныне широко известной, двойной системы дифференциальных уравнений в частных производных, куда электрическое и магнитное поля входили как зависимые переменные. Правда, Максвелл пытался обосновать или оправдать эти уравнения с помощью мысленных механических построений. Он использовал одновременно несколько таких построений, и ни одно из них не считал истинным, так что существенными оказались лишь уравнения и фигурирующие в них элементарные, не сводимые к другим сущностям, силы поля. К концу XIX в. концепция об электромагнитном поле как несводимой сущности, стала уже всеобщей, и серьезные физики перестали верить в правомочность или возможность механического обоснования уравнений Максвелла. Наоборот вскоре стали даже пытаться использовать материальные точки и их инерцию с позиций теории поля при помощи уравнений Максвелла. Но эти попытки конечно не увенчались успехом.

Если отвлечься от отдельных значительных результатов, полученных Максвеллом на протяжении всей его жиз-

ний в важных областях физики, и направить все внимание на те изменения, которые из-за них претерпело воззрение на природу физической реальности, то можно сказать, что до Максвелла физическая реальность, поскольку она выражает явления в природе, мыслилась как материальные точки, изменения которых состоят только в движениях, регулируемых дифференциальными уравнениями в частных производных. После Максвелла физическая реальность мыслится выраженной необъяснимыми, с механической точки зрения, координатными полями, подчиняющимися дифференциальным уравнениям в частных производных. Это изменение представления о реальности является наиболее глубоким и плодотворным из всех, которые знала физика после Ньютона. Но нужно признать, что полная реализация идей этой программы еще никоим образом не удалась. Установленные с тех пор и добившиеся успеха физические теории являются скорее компромиссом между обеими программами. Именно из-за своего компромиссного характера эти системы носили на себе печать недолговечности и логического несовершенства, несмотря на то, что в отдельности каждая из них добивалась значительных успехов.

В первую очередь следует назвать созданную Лоренцом электронную теорию, в которой поле и электрические частицы одновременно выступают в качестве равноправных элементов концепции реальности. За ней последовали специальная и общая теория относительности, которые (хотя они полностью основаны на представлениях теории поля) не смогли избежать введения материальных точек и обыкновенных дифференциальных уравнений.

Последним, добившимся больших успехов, творением теоретической физики является квантовая механика. В своей основе она принципиально отклоняется от обеих программ, которые мы кратко назовем программами Ньютона и Максвелла. Ибо фигурирующие в ее законах величины не претендуют на выражение *самой* физической реальности; они дают только *вероятности* наступления какой-либо рассматриваемой физической реальности. Дирак, которому, по моему мнению, мы обязаны наиболее логически удовлетворительным изложением этой теории, справедливо указывает, что, например, должно быть нелегко так теоретически описывать фотон, чтобы это описание содержало достаточное основание для суждения о том, пройдет

ли фотон через поставленный на его пути под углом поляризатор или нет.

Я все-таки склонен думать, что физики недолго будут ограничиваться таким косвенным описанием реальности, даже если удастся удовлетворительным образом согласовать эту теорию с постулатом общей относительности. Тогда, вероятно, снова нужно будет вернуться к попытке реализации программы, которую мы можем, собственно, назвать программой Максвелла: описание реальности полями, удовлетворяющими дифференциальным уравнениям, не содержащим сингулярностей.

Максвелл и современная теоретическая физика

Н. Бор

Я чувствую себя польщенным тем, что мне предоставлена возможность отдать дань уважения памяти Джемса Клерка Максвелла, создателя электромагнитной теории, которая имеет такое существенно важное значение для работы каждого физика. В связи с этим юбилеем мы слышали выступления главы Тринити-колледжа и сэра Джозефа Лармора, которые очень авторитетно и обаятельно говорили об удивительных открытиях Максвелла и о его личности, а также о неразрывной традиции, сохраняемой здесь, в Кембридже, и связывающей жизнь и труды Максвелла с нашим временем. Хотя в мои ранние учебные годы я имел огромное преимущество пользоваться чарами Кембриджа и вдохновляться влиянием английских физиков, боюсь, что мне не удастся добавить что-нибудь достаточно интересное в этом отношении. Но мне, конечно, доставляет огромное удовольствие приглашение сказать несколько слов о связи между трудами Максвелла и последующим развитием атомной физики.

Я не буду говорить о фундаментальном вкладе Максвелла в развитие статистической механики и кинетической теории газов, о чем уже говорил профессор Планк, особенно в части плодотворного сотрудничества Максвелла с Больцманом. Я намерен только сделать несколько замечаний о применении электромагнитной теории к проблеме строения атома, где теория Максвелла не только была исключительно плодотворна в истолковании явлений, но дала

максимум того, что может дать какая бы то ни было теория, а именно способствовала различным предположениям и управляла развитием за пределами ее первоначальных рамок.

Я должен, конечно, быть весьма кратким в обсуждении применений идей Максвелла к атомной теории, что само по себе составляет целую главу физики. Я только напомним, с каким успехом идея об атомной природе электричества была включена в теорию Максвелла Лармором и Лоренцем и в особенности, как с ее помощью были объяснены явления дисперсии, в том числе замечательные особенности эффекта Зеемана. Я хотел бы также упомянуть о существенном вкладе в электронную теорию магнетизма, сделанном профессором Ланжевенем, которого, к великому сожалению, нет среди нас сегодня. Но больше всего я думаю в этой связи о влиянии, оказанном идеями Максвелла на сэра Джозефа Томсона в его основоположном труде по электронному строению материи — начиная с основной идеи об электромагнитной массе электрона и кончая его знаменитым методом подсчета электронов в атоме посредством рассеяния рентгеновских лучей, сохранившим свое значение до настоящего времени.

Развитие атомной теории, как известно, скоро вывело нас за пределы прямого и последовательного применения теории Максвелла. Однако я должен подчеркнуть, что именно возможность анализа явлений излучения благодаря электромагнитной теории света привела к признанию существенно новых особенностей в законах природы. Фундаментальное открытие кванта действия Планком заставило радикально пересмотреть все наши представления в естественных науках. И все же при таком положении теория Максвелла продолжала оставаться ведущей теорией. Так, соотношение между энергией и импульсом излучения, которое следует из электромагнитной теории, нашло применение даже в объяснении комптон-эффекта, для которого идея фотона Эйнштейна оказалась таким подходящим средством учета заметного отклонения от классических представлений. Теория Максвелла не перестала использоваться в качестве направляющего начала и на позднейшей стадии развития атомной теории. Хотя фундаментальное открытие лордом Резерфордом атомного ядра, приведшее к замечательному завершению наших представлений об атоме, ярче всего обнаружило ограниченность обычной ме-

ханики и электродинамики, единственным путем развития в этой области осталось сохранение возможно более тесного контакта с классическими идеями Ньютона и Максвелла.

На первый взгляд может показаться, что здесь необходимо было какое-то существенное видоизменение теории Максвелла, и было даже предложено добавить новые члены к знаменитому уравнению Максвелла для электромагнитного поля в свободном пространстве. Но теория Максвелла оказалась слишком последовательной и слишком изящной, чтобы допускать такого рода модификацию. Может только возникнуть вопрос об обобщении теории в целом или, скорее, о переводе ее на новый физический язык, приспособленный для того, чтобы учесть существенную неделимость элементарных процессов таким образом, чтобы каждая особенность теории Максвелла нашла соответствующую особенность в новом формализме. За последние несколько лет эта цель действительно была в значительной степени достигнута замечательным развитием новой квантовой механики, или квантовой электродинамики, связанной с именами де Бройля, Гейзенберга, Шредингера и Дирака.

Когда приходится слышать как физики в наши дни толкуют об электронных волнах и о фотонах, может показаться, пожалуй, что мы полностью оставили почву, на которой строили Ньютон и Максвелл. Но мы все, я думаю, согласимся, что такие понятия, как бы плодотворны они ни были, не могут никогда представлять что-либо большее, чем удобное средство выражения следствий квантовой теории, которые не могут быть представлены обычным способом. Не следует забывать, что только классические идеи материальных частиц и электромагнитных волн имеют недвусмысленное поле применения, между тем как понятия фотона и электронных волн его не имеют. Их применение существенно ограничивается случаями, в которых, учитывая существование кванта действия, невозможно рассматривать наблюдаемые явления, как независимые от приборов применяемых для их наблюдения. Мне хочется в качестве примера назвать наиболее яркое применение идей Максвелла, а именно электромагнитные волны в беспроводной передаче. Было бы чистым формализмом говорить о том, что эти волны состоят из фотонов, так как условия, при которых мы управляем передачей и приемом радио-

волн, исключают возможность определения числа фотонов, которое они должны содержать. В таком случае мы можем сказать, что всякие следы идеи фотона, которая по существу связана с перечислением элементарных процессов, совершенно исчезли.

Вообразим на минуту, в качестве иллюстрации, что новейшие экспериментальные открытия эффектов электронной дифракции и фотонов, которые так хорошо укладываются в символизм квантовой механики, были сделаны до работ Фарадея и Максвелла. Конечно, такое положение немислимо, поскольку истолкование рассматриваемых экспериментов существенно основано на понятиях, созданных трудами этих ученых. Тем не менее позвольте принять такую воображаемую точку зрения и спросить: каково было бы в этом случае состояние науки? Я думаю, не будет преувеличением сказать, что мы были бы дальше от непротиворечивого взгляда на свойства материи и света, чем Ньютон и Гюйгенс. В самом деле, мы должны осознать, что недвусмысленное истолкование любого измерения должно быть по существу выражено в терминах классических теорий, и мы можем сказать, что в этом смысле язык Ньютона и Максвелла останется языком физиков на все времена.

Я не думаю, что это — подходящий случай для того, чтобы входить в дальнейшие подробности относительно этих проблем и для того, чтобы обсуждать новые взгляды. Однако в заключение я с удовольствием отмечаю то громадное напряжение, с которым весь научный мир следит за исследованиями в совершенно новой области экспериментальной физики, а именно за исследованиями внутреннего строения ядра, которые сейчас проводятся в Максвелловской лаборатории под великим руководством теперешнего кавендишского профессора. В том факте, что никто и здесь, в Кембридже, не склонен забывать трудов Ньютона и Максвелла, мы видим, пожалуй, лучший залог неременного успеха этих попыток. Даже если мы должны быть готовы к дальнейшему отказу от ставших привычными физических представлений, основные понятия физики, которыми мы обязаны великим учителям, несомненно окажутся незаменимыми также и в этой новой области физики.

Максвелл

о логике динамического объяснения*

Д. Турнер

В ходе своих исследований по электромагнетизму и по кинетической теории газов Джеймс Максвелл изложил некоторые мысли о природе самой науки. Его наблюдения в этой области интересны в настоящее время не только потому, что они принадлежат ему, а потому, что они остаются до сих пор поучительными. Взгляды Максвелла можно найти во многих отступлениях, которыми он оживлял свои научные статьи и трактаты, и в различных статьях и обзорах, подготовленных им для более популярного изложения. Рассмотренные вопросы имеют отношение к его собственным вкладам в физику; они включают логику динамического объяснения, метод физической аналогии, и вечный вопрос о противопоставлении действия на расстоянии непосредственному соприкосновению. В настоящем очерке я хочу рассмотреть взгляды Максвелла на динамическое объяснение.

1. То, что Максвелл называл динамическим объяснением, можно лучше всего пояснить на примере динамической аналогии, которую, в свою очередь, можно лучше всего иллюстрировать тем, что он называл физической аналогией.

Физическая аналогия есть соотношение между ветвью одной науки и ветвью другой науки — такое, что обе ветви имеют одинаковую математическую форму, но в то же

* Из журнала «Annals of Science», 1956, 11, стр. 238—245.

время ветвь первой науки описывает одну группу физических явлений, а ветвь второй науки описывает другую группу. Так, например, в аналогии, открытой лордом Кельвином между электростатикой и теорией распространения теплоты в твердом теле, обе науки имеют ту же самую математическую форму, причем линии электрической силы соответствуют линиям теплового потока, но первая ветвь описывает распределение электричества в проводниках и изоляторах, а вторая ветвь описывает движение тепла от более нагретых к более холодным частям тела ¹/*.

То, что я назову *динамической аналогией*, есть специальный вид физической аналогии. В динамической аналогии по крайней мере одна из двух рассматриваемых дисциплин является ветвью динамики. Ветви науки динамики описывают конфигурацию и движение того, что Максвелл называл материальными системами. Так, например, в аналогии, которую сам Максвелл открыл между электростатикой и установившимся движением несжимаемой жидкости, обе дисциплины имеют ту же самую математическую форму, причем линиям электрической силы соответствуют линии движения жидкости или линии тока, но первая дисциплина описывает электрические явления, а вторая — то, как жидкость течет от источников к стокам. Другим примером служит аналогия Максвелла между электростатикой и распределением натяжений и давлений в упругом теле. Здесь линии электрической силы соответствуют линиям, вдоль которых распространяется растяжение и от которых направляется давление.

Динамическое объяснение ² есть, таким образом, отношение между двумя дисциплинами, из которых по крайней мере одна является ветвью динамики, причем такое, что математическая форма одной дисциплины тождественна математической форме другой. Но вместо описания групп свойств этими двумя дисциплинами, соответствующими одна другой, говорят, что первая группа свойств оказывается тождественной второй группе. Чтобы придать этому определению максвелловскую терминологию, будем говорить, что динамическое объяснение есть динамическая аналогия, взятая в буквальном смысле. Вместо свойств материальной системы, имитирующих ³ свойства, описываемые второй дисциплиной, говорят, что первая

* См. примечания в конце статьи.— *Прим. ред.*

группа свойств образует⁴ вторую группу. Так, в кинетической теории газов коллективные свойства большого числа материальных частиц образуют наблюдаемые свойства газов, как, например, средняя кинетическая энергия частиц образует температуру газа. Максвелл называл такую ветвь динамики, которая описывает подобную материальную систему, физической гипотезой⁵.

Конечно, не все объяснения, которые приписывают тождество двум группам свойств, описываемым двумя различными дисциплинами, являются динамическими объяснениями, так как не все такие объяснения рассматривают ветви динамики. Так, например, в электромагнитной теории света говорят, что электромагнитные волны внутри известного диапазона длин волн образуют световые волны.

Но определение динамического объяснения составляет только половину дела. Воображение не должно обгонять природу. Если динамическое объяснение должно быть научным, то физическая гипотеза должна удовлетворять определенным условиям адекватности. Максвелл более или менее явно признавал два таких условия: условие непротиворечивого представления и то, что я назову условием независимого доказательства.

Физическая гипотеза удовлетворяет условию *непротиворечивого представления*, если эта гипотеза оказывается совместной с фундаментальными принципами динамики, включающими, например, ньютоновы законы движения и принцип сохранения механической энергии. Новая наука не только должна оправдывать группу физических явлений, которую она описывает, но не должна также противоречить принципам, установленным другими науками⁶. Слова «consistent representation» («непротиворечивое представление») являются максвелловским переводом выражения, употребленного в 1845 г. Гауссом в письме к Вильгельму Веберу⁷. Гаусс писал, что не способен образовать «konsruirbar Vorstellung» того, как распространение электромагнитных возмущений имеет место в конечный период времени⁸.

Физическая гипотеза удовлетворяет условию *независимого доказательства*, если свойства материальной системы, которую она описывает, можно исследовать независимо от той науки, которую она имеет назначением объяснить. Заканчивая трактат «Электричество и магнетизм», ссылаясь на более раннюю попытку построить ди-

намическое объяснение электромагнитной науки, Максвелл указывал, что задача динамического объяснения всегда позволяет бесконечное число решений. «Попытка представить работающую модель этого механизма, которую я тогда сделал, должна быть принята не за что большее, чем она на самом деле есть — доказательство того, что можно вообразить механизм, способный осуществить связь, механически эквивалентную действительной связи частей электромагнитного поля. Задача определения механизма, требуемого для того, чтобы осуществить данный вид связи между движениями частей некоторой системы, всегда допускает бесконечное число решений. Из этих решений некоторые могут быть более неуклюжи, или более сложны, чем другие, но все они должны удовлетворять условиям механизма вообще»⁹. Если нет никаких независимых признаков для того, чтобы выделить одно объяснение среди бесчисленного множества других, то это объяснение в лучшем случае тривиально; оно служит только для того, чтобы доказать возможность динамического объяснения.

Я предполагаю сначала рассмотреть применение динамического объяснения Максвеллом в его исследованиях по электромагнетизму, а затем — роль, которую такая программа играла в его исследованиях кинетической теории газов.

2. В первом из трех мемуаров по электричеству и магнетизму — «О фарадеевых линиях силы» [13], прочитанном в 1865 г., Максвелл демонстрировал динамическую аналогию между электростатикой и движением жидкости. Он также утверждал, что ближайшей задачей физики является обеспечить динамическое объяснение наук об электричестве и магнетизме. Во втором мемуаре — «О физических линиях силы» [14], опубликованном в 1861—1862 гг., Максвелл вывел знаменитые уравнения поля и электромагнитную теорию света и начал проектируемое динамическое объяснение, заключавшееся в том, что он назвал теорией молекулярных вихрей. В этой теории свойств системы вращающихся сферических ячеек, натянутых подобно шарикам вдоль линий магнитной силы, утверждалось, что эти шарики образуют наблюдаемые свойства магнитного действия. Вращение ячеек заставляет их раздвигаться в боковом направлении и сжиматься в продольном направлении, что в свою очередь создает натяжение вдоль линий магнитной силы и одинаковое во

всех направлениях давление в плоскости, расположенной под прямым углом к линиям силы. Далее, свойства системы маленьких частичек, движущихся между соседними вихрями, когда их угловые скорости различаются, образуют наблюдаемые свойства электрического действия. Теория молекулярных вихрей, к удовлетворению Максвелла, отвечала условию непротиворечивого представления, но не могла удовлетворить условию независимого доказательства. В третьем мемуаре — «Динамическая теория электромагнитного поля» [9], опубликованном в 1864 г. и в «Электричестве и магнетизме», опубликованном в 1863 г., Максвелл утверждал, что физика пока должна удовлетвориться более скромным достижением — тем, что он называл динамической теорией.

Динамическая теория есть динамическое объяснение в менее полной форме. Она ставит задачей спецификацию материальной системы, которая прежде всего не противоречила бы науке, которая должна быть объяснена и должна обладать такой общностью чтобы избегать деталей, требуемых динамическим объяснением. В заметке «О доказательстве уравнений движения системы со связями» Максвелл рассматривает переход от динамического объяснения к динамической теории, пользуясь слегка отличающимися терминами.

«При формулировке динамических теорий физических наук очень часто бывало на практике, что изобреталась какая-нибудь специальная динамическая гипотеза и затем при помощи уравнений движения из нее выводились определенные результаты. Согласие с этими результатами, как предполагалось, давало определенную степень доказательства в пользу этой гипотезы.

Истинный метод физического объяснения состоит в том, чтобы начать с явлений и вывести из них силы путем прямого применения уравнений движения. Трудность при таком подходе заключалась до сих пор в том, что мы наталкиваемся, по крайней мере во время первых стадий исследования, на столь неопределенные результаты, что не имеем достаточно общих членов для выражения их без введения какого-нибудь понятия, не выводимого строго из наших предпосылок.

Поэтому очень желательно, чтобы люди науки изобрели какой-нибудь метод утверждения, благодаря которому представления настолько точные, насколько они могут

быть, могли бы быть доведены до ума и в то же время были бы достаточно общими, чтобы можно было избежать введения неоправданных деталей»¹⁰.

А в рецензии для «Nature» на книгу «Натуральная философия» лорда Кельвина, тогда еще В. Томсона, и П. Г. Тэта Максвелл добавил:

«Но когда мы имеем основание считать, что явления, попадающие в сферу нашего наблюдения, образуют только малую часть того, что действительно происходит в системе, вопрос заключается не в том, какие явления будут результатом гипотезы, что система эта есть система определенного специфического вида, но в том — какова наиболее общая характеристика материальной системы совместной с условием, что движения тех частей системы, которые мы можем наблюдать, суть те же, которые мы на самом деле находим»¹¹.

В электромагнетизме искомая для спецификации материальная система оказалась уравнениями движения, развитыми в 1788 г. Лагранжем в его «Аналитической механике». Законы движения Ньютона и уравнения Лагранжа эквивалентны, но представляют собой разные методы определения движения материальной системы. В заметке об уравнениях движения и в главе по этому вопросу в «Электричестве и магнетизме» Максвелл рассматривает уравнения Лагранжа как с математической, так и с физической точек зрения¹². С математической точки зрения исследования Лагранжа сделали возможным сведение законов движения Ньютона, которые необходимо иметь в количестве трех для каждой частицы материальной системы, к числу, равному числу степеней свободы данной системы. С физической точки зрения исследования Лагранжа позволили перенести описание части механизма из жесткой системы протяженных координат в пространстве Декарта к тому, что Максвелл характеризовал как «независимые ведущие колеса»¹³ механизма.

Кельвин и Тэт назвали эти новые координаты, служившие для замены координат Декарта, игнорируемыми координатами; теперь они называются обобщенными координатами, а изменения их по времени называются обобщенными скоростями. Для того чтобы применить уравнения Лагранжа к материальной системе, необходимо сначала определить, каковы обобщенные координаты и скорости этой системы, и затем найти, как потенциальная

и кинетическая энергии системы зависят от этих величин. Тогда можно определить, удовлетворяет ли система принципу сохранения механической энергии. Этот принцип утверждает, что сумма потенциальной и кинетической энергий материальной системы остается постоянной во время движения.

В рецензии на труд Кельвина и Тэта Максвелл объяснил природу динамического объяснения. Объяснил, почему иногда такое объяснение должно быть оставлено, объяснил природу динамической теории и то, как задача динамической теории может быть разрешена применением уравнений Лагранжа. Для иллюстрации Максвелл описал церковный перезвон с определенными специфическими свойствами.

«В обычном перезвоне каждый колокол имеет один канат, который спускается через отверстие в полу в комнату звонарей. Но представим себе, что каждый канат вместо того, чтобы приводить в действие один колокол, участвует в движении многих частей механизма, и что движение каждого колокола определяется не движением одного только каната, а движением нескольких; далее предположим, что весь этот механизм закрыт и совершенно неизвестен людям, стоящим у канатов, которые могут видеть только дыры в потолке над ними»¹⁴.

Задача динамического объяснения состоит в том, чтобы выяснить природу механизма в перезвоне на основании наблюдаемых движений канатов. Но так как имеется бесконечное множество решений этой задачи, и так как этот механизм, по определению, недоступен, то такое объяснение тривиально. Оно не может удовлетворить условию независимого доказательства. Задача динамической теории заключается в том, чтобы доказать, не прибегая к недоступному механизму, что наблюдаемое движение канатов совместимо с основными принципами динамики. Решение состоит в определении, применимы ли уравнения Лагранжа к механизму перезвона и остается ли сумма потенциальной и кинетической энергий механизма постоянной во время движения. Для того чтобы применить уравнения Лагранжа, прежде всего необходимо установить обобщенные координаты и скорости системы. В задаче о механизме перезвона обобщенные координаты оказываются положениями канатов, а обобщенные скорости — скоростями изменения этих положений. При помощи надле-

жащей манипуляции с канатами звонари могут определить, как выражаются потенциальная и кинетическая энергии этого механизма в функции обобщенных координат и скоростей ¹⁵.

История электромагнетизма является в своем роде задачей о перезвоне. Закон Ампера о притяжении и отталкивании между элементами тока и закон Фарадея об электромагнитной индукции соответствуют наблюдаемому движению канатов. Попытка Максвелла дать динамическое объяснение этих законов в его теории молекулярных вихрей соответствует попытке объяснить природу механизма в перезвоне из наблюдаемого движения канатов. Более скромную задачу динамической теории Максвелл описывает в «Электричестве и магнетизме»: «Что я теперь предлагаю сделать — это изучить следствия из допущения, что явление электрического тока — это явление движущейся системы, причем движение передается от одной части этой системы к другой силами, природу и законы которых мы даже не пытаемся определить, потому что мы можем исключить эти силы из уравнений движения методом, данным Лагранжем для любой системы со связями» ¹⁶. Задача применения уравнений Лагранжа к системе электрических цепей упрощается, если она ограничивается цепями, в которых электрическая емкость пренебрежимо мала. Для такой системы Максвелл обнаружил, что обобщенные координаты являются совокупностью значений, необходимых для фиксирования положения, формы и размеров каждой цепи; а обобщенными скоростями являются скорости изменения этих значений вместе с силой тока в каждой цепи; энергия же системы является по форме полностью кинетической ¹⁷. При помощи такой эмпирической модели Максвелл получил из уравнений Лагранжа законы Ампера и Фарадея в несколько обобщенной форме и доказал, что они совместимы с принципом сохранения механической энергии.

3. В предыдущем рассуждении о вкладе Максвелла и его истолковании этого вклада один пункт нуждается в разъяснении. Максвелл обнаружил, что уравнения Лагранжа являются наиболее общей характеристикой материальной системы, совместимой с наблюдаемым действием электрических токов. Таким образом, его вклад состоял в доказательстве динамической аналогии, хотя в этой аналогии соответствующие свойства были весьма об-

цами. Но Максвелл истолковал свой вклад, как доказательство динамической теории, т. е. как доказательство того, что законы электричества и магнетизма описывают наблюдаемые действия промежуточного механизма, хотя детали этого механизма остаются не уточненными.

Максвелл в глубине души никогда не сомневался в том, что в основе совокупности всех физических явлений лежит движение материи как непосредственно наблюдаемое, так и в скрытом виде наблюдаемых действий материальных систем. Он допускал, что использование динамических терминов в электромагнетизме являлось только аналогией, но он считал, что имеется одно важное исключение. В последнем из трех мемуаров по электричеству «Динамическая теория электромагнитного поля», рассматривая более раннюю попытку полного динамического объяснения, Максвелл настаивал на том, что энергия, независимо от различного рода явлений, в которых она обнаруживается, всегда представляет собой механическую энергию.

«Я попытался ранее описать специфический тип движения и специфический вид напряжения, которые были бы так распределены, чтобы объяснять эти явления. В настоящей статье я избегаю гипотез такого рода и, применяя такие термины, как электрическое количество движения и электрическая упругость в отношении известных явлений индукции токов и поляризации диэлектриков, я хочу просто направить внимание читателя на механические явления, которые помогут ему в понимании электрических явлений. Все подобные фразы в настоящей статье должны пониматься как иллюстративные, а не объясняющие.

Однако, говоря об энергии поля, я хочу, чтобы меня понимали буквально. Вся энергия есть то же, что и механическая энергия, независимо от того, существует ли она в форме движения или в форме упругости или в какой-либо другой форме. Энергия электромагнитных явлений есть механическая энергия»¹⁸.

А в самом последнем параграфе «Электричества и магнетизма» Максвелл цитировал утверждение Торричелли о том, что энергия «...является квинтэссенцией такой тонкой природы, что она не может содержаться ни в каком сосуде за исключением самой внутренней субстанции материальных вещей»¹⁹.

Убеждение, что вся энергия является механической энергией, отражается также в максвелловской интерпретации электромагнитной теории света. Вместо того чтобы считать, что электромагнитные свойства образуют и свойства света, он утверждал, что свойства материальной системы образуют и электромагнитные, и оптические свойства. В мемуаре «О физических линиях сил», где впервые дано математическое выражение электромагнитной теории света, Максвелл обсуждает доказательства в пользу этой теории. После замечания о том, что отношение электростатической единицы заряда к электромагнитной единице тока, вычисленное из экспериментов Кольрауша и Вебера, имеет размерность и приблизительную величину скорости света в воздухе, измеренную Физо, Максвелл приходит к заключению: «... едва ли мы можем избежать вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений»²⁰. Подобные же комментарии встречаются и в позднейшем мемуаре «Динамическая теория электромагнитного поля»²¹ и в изложении электромагнитной теории в «Электричестве и магнетизме». «Если будет обнаружено, что скорость распространения электромагнитных возмущений такая же, как скорость света, и притом не только в воздухе, но и в других прозрачных средах, то мы будем иметь сильные доводы для того, чтобы поверить, что свет является электромагнитным явлением, а комбинация оптического и электрического доказательств создаст убеждение в реальности среды, подобное тому, которое мы получаем в случае других видов материи от комбинированного доказательства наших чувств»²². Безусловно, Максвелл не только верил в то, что свойства материальной системы образуют как электромагнитные, так и оптические свойства, но он верил также, что когда-нибудь знание таких вещей, как «... является ли электрический ток в действительности потоком материального вещества или двойным потоком, или является ли его скорость большой или малой при измерении в футах в секунду... сделает возможным появление приемлемого динамического объяснения электромагнетизма»²³.

«Знание этих вещей приведет по крайней мере к началу полной динамической теории электричества, в которой мы будем рассматривать электрическое действие, не

как в этом трактате — как явление, вызываемое неизвестной причиной и подчиненное только общим законам динамики, но как результат известных движений, известных частей материи, в котором в качестве объектов изучения будут не только суммарные эффекты и окончательные результаты, но весь промежуточный механизм и детали этого движения»²⁴.

4. Теперь я хочу показать, что и в своих исследованиях по кинетической теории газов или, как он называл ее, динамической теории газов, Максвелл истолковывал свои результаты как неполные и верил, что когда-нибудь физика исправит этот недочет.

В статье для «Nature» о молекулах Максвелл проводил различие между свойствами совокупности существ, исследуемой индивидуально и свойствами этих же самых существ, исследуемых коллективно. Он называл изучение первого рода свойств *историческим*, или *динамическим*, *методом*, а изучение второго рода свойств *статистическим методом*²⁵. Физическая гипотеза кинетической теории газов состоит в описании движения малых материальных частиц, называемых молекулами, которые не могут быть непосредственно наблюдаемы. Максвелл допускал, что хотя отдельная молекула при столкновении с другой молекулой изменяет ее скорость, распределение молекулярных скоростей в совокупности молекул остается постоянным. Исходя из такого допущения, он доказал, что распределение молекулярных скоростей происходит по закону ошибок. Физическая гипотеза не говорит о том, какие молекулы обладают какими скоростями; она игнорирует индивидуальные истории. В этом смысле теория для Максвелла была неполной.

Вера Максвелла в то, что статистический метод являлся временным выходом, необходимым только до тех пор, пока физика не получит более полного знания о движении молекул, ясно обнаруживается в некоторых других замечаниях, сделанных им в статье «Молекулы». Он замечает, что статистический метод описывает «новый род закономерностей, закономерность средних», но эта закономерность не является «совершенным знанием всех данных»; она является только достаточной «для всех практических целей».

«Уравнения динамики полностью выражают законы исторического метода в применении к материи, но при-

менение этих уравнений предполагает совершенное знание всех данных. Но мельчайшее количество материи, которое мы можем подвергнуть эксперименту, состоит из миллионов молекул, ни одна из которых никогда не является ощутимой индивидуально для нас. Поэтому мы не можем удостовериться в действительном движении любой из этих молекул; так что мы вынуждены оставить строго исторический метод и принять статистический метод, когда мы имеем дело с большими группами молекул.

Данные статистического метода в применении к молекулярной науке являются суммами большого числа молекулярных величин. При изучении соотношений между величинами такого рода мы встречаемся с новым видом закономерности — закономерностью средних, на которую мы можем полагаться совершенно достаточно для всех практических целей, но которая не может претендовать на тот характер абсолютной точности, который принадлежит законам абстрактной динамики»²⁶.

Вера в то, что статистический метод является только временным выходом, ясна также из рассуждения Максвелла о возможном противоречии, возникающем в науке из сосуществования двух методов исследования²⁷. В «Теории теплоты» Максвелл изобрел знаменитого *демона* для того, чтобы иллюстрировать возможность того, что свойства совокупности существей, исследуемые историческим методом, могут противоречить свойствам тех же самых существей, исследуемых статистическим методом. С помощью простого механического приспособления демон, наделенный способностью наблюдать отдельные молекулы, может нарушить второй закон термодинамики в его статистической интерпретации.

«...представим себе существо, чувства которого настолько обострены, что оно может проследить за траекторией каждой молекулы; такое существо, атрибуты которого все еще существенно конечны, как и наши, было бы способно делать то, что в настоящее время невозможно для нас. В самом деле, мы видели, что молекулы в сосуде, наполненном воздухом при однородной температуре, движутся с отнюдь не равномерными скоростями, хотя средняя скорость любого произвольно выбранного большого количества их почти точно равномерна. Теперь предположим, что сосуд разделен на две части *A* и *B* перегородкой,

в которой имеется малое отверстие, и что существо, которое может видеть отдельные молекулы, открывает и закрывает это отверстие так, чтобы пропускать только более быстрые молекулы из *A* в *B* и только более медленные молекулы из *B* в *A*. Таким образом, это существо без затраты работы поднимет температуру в *B* и понизит температуру в *A* в противоречии со вторым законом термодинамики»²⁸.

5. В инвентарной книге максвелловской мысли имеется как приходная, так и расходная сторона. На стороне прихода, в электромагнетизме, Максвелл ограничил свои исследования после отступления от полного динамического объяснения тем, что мы теперь называем макроскопической областью. А в кинетической теории проникновение в микроскопическую область было поддержано независимым доказательством. С расходной стороны Максвелл оставался убежденным, что вся энергия является механической энергией. Однако его не следует слишком обвинять за это убеждение. Это было не столько догмой относительно природы Вселенной, сколько программой объединения физики, создания новой теории и открытия новых физических явлений.

В «Действии на расстоянии» Максвелл заметил, что некоторые силы в природе кажутся действующими на расстоянии из отдельных центров, как, например, тяготение, в то время как другие силы кажутся действующими через промежуточную среду, как, например, круги, распространяющиеся по воде, когда бросают камень в пруд. Он также заметил, что эти два вида сил фигурируют в программах, которые намечают физики в их попытках исключить силы другого рода. Максвелл присоединялся к защитникам непосредственного действия, потому что это казалось ему более «философским», более научным²⁹.

«Почему мы не должны тогда допускать, что знакомый нам способ передачи движения путем толчков и тяги нашими руками является примером всех действий между телами даже в тех случаях, в которых мы не можем ничего наблюдать между телами, что принимало бы участие в действии»³⁰.

Динамическое объяснение привело физику от времен Ньютона далеко в XIX столетие. В исследованиях Максвелла оно продвинуло как теорию электричества, так и

теорию материи. Но, как оказалось, это продвижение помогло установить пределы той программы, которая вызвала его.

В заключение я хочу упомянуть о комментариях Анри Пуанкаре и в новейшее время Артура Розенблюта и Норберта Винера о возможности бесконечного числа решений задачи о динамическом объяснении³¹. Комментарии Пуанкаре интересны не только ввиду их ясности, но и потому, что ему неоднократно приписывали открытие такой возможности³². В предисловии к «Электричеству и оптике»³³, опубликованном в 1901 г., и в рассуждениях об исследованиях Максвелла в «Основаниях науки»³⁴ Пуанкаре объяснял, как Максвелл доказал, что действие электрических токов совместимо с основными принципами динамики и как общность этого доказательства сделала возможным игнорирование как деталей механизма, так и связи между механизмом и совокупностью наблюдаемых явлений, и как это доказательство, таким образом, установило возможность бесконечного числа решений задачи о динамическом объяснении без построения в отдельности этих связей.

В статье для «Philosophy of Science» о «Роли моделей в науке», опубликованной в 1945 г., Розенблют и Винер, не упоминая о Максвелле, обобщили это наблюдение, указывая, что любой вид объяснения допускает бесконечное число решений. Вместо перезвона с канатами, ведущими к недоступному механизму, они в качестве иллюстрации предложили закрытый ящик с входами и выходами, соединенными с системой электрических цепей, скрытых внутри ящика. Одно и то же соотношение между входами и выходами можно объяснить различными схемами цепей, различными токами, различными сопротивлениями и т. д. Возможно получить тот же самый выход для того же входа с различными физическими схемами. Если несколько различных схем такого рода заключены в ящики, к которым возможен подход только через входные и выходные клеммы, то нельзя различить между различными возможностями, не обращаясь к новым входам или выходам или к обоим»³⁵. Для того чтобы выделить одно объяснение из бесчисленного множества других, требуется независимое доказательство.

Примечания

- ¹ Более подробное рассмотрение взглядов Максвелла на метод физической аналогии см. в моей статье по этому вопросу [27].
- ² См. Максвелл [12], 2, 418. Он писал: «...когда физическое явление может быть полностью описано, как изменение в конфигурации и движении материальной системы, говорят, что динамическое объяснение этого явления полно».
- ³ См. Максвелл [14], 1, 488.
- ⁴ См. Максвелл [14], 1, 490.
- ⁵ См. Максвелл [13], 1, 155.
- ⁶ См. Максвелл [20], § 567. Он писал: «Образуя представления и слова, относящиеся к какой-либо науке, которая, подобно электричеству, имеет дело с силами и их действием, мы должны постоянно иметь в виду представления, свойственные фундаментальной науке — динамике, чтобы мы могли на первой стадии развития науки избежать несовместимости с тем, что было уже установлено...»
- ⁷ См. Максвелл [20], § 861 и [12], 2, 419.
- ⁸ Письмо к Веберу было опубликовано в [3], 5, 629. Как Дж. Дж. Томсон, так и сэр Джозеф Лармор ссылаются на это письмо, переводя эту фразу соответственно как «конкретное представление» [26], стр. 1 и как «рабочее представление» [5], стр. 319.
- ⁹ Максвелл [20], § 831. См. также отзыв о лагранжевых уравнениях движения в главе «Об уравнениях движения системы со связями» [20], особенно §§ 555—557.
- ¹⁰ Максвелл [15], 2, 309.
- ¹¹ Максвелл [17], 2, 781. Сэр Джозеф Лармор отзывался о новом способе Максвелла рассматривать физику, как об «агностической точке зрения». [5], стр. 28.
- ¹² Максвелл [15], 2, 308 и [20] §§ 553—554. См. также [17], 2, 782—783.
- ¹³ Максвелл [17], 2, 782.
- ¹⁴ Максвелл [17], 2, 783.
- ¹⁵ Максвелл [17], 2, 783—784. Он писал: «Они могут придать каждому канату любое положение и любую скорость и могут оценить его количество движения, остановив все канаты сразу и чувствуя, какое усилие натяжения дает каждый канат. Если они возьмут на себя труд установить, какое количество работы им необходимо затратить для того, чтобы стянуть канаты вниз к заданному ряду положений, и выразить это через эти положения, то они найдут потенциальную энергию системы, выраженную в известных координатах. Если они затем найдут натяжение какого-либо каната, вызванное скоростью, равной единице, сообщенной этому или какому-нибудь другому канату, то они смогут выразить кинетическую энергию через координаты и скорости».
- ¹⁶ Максвелл [20], § 552. См. также §§ 110—111, в которых Максвелл рассматривает состояние натяжения в электростатическом поле. Он писал: «Необходимо тщательно усвоить, что мы сделали только один шаг в теории действия среды. Мы предположили, что среда находится в состоянии натяжения, но мы никаким путем не учитывали этого натяжения и не объясняли, как оно сохраняется. Однако этот шаг представляется мне

очень важным, так как он объясняет действием последовательных частей среды явления, которые, как предполагалось ранее, объяснимы только непосредственным действием на расстоянии... Я не был в состоянии сделать следующий шаг, а именно, объяснить механическими соображениями эти натяжения в диэлектрике. Поэтому я оставляю теорию в этом пункте...»

¹⁷ Максвелл [20], §§ 568—577.

¹⁸ Максвелл [9], 1, 563—564. См. также [8], 2, 227: «Таким образом, слова: скорость, количество движения, сила и т. д. приобрели определенное точное значение в элементарной динамике. Они употребляются также в динамике систем со связями в таком смысле, который хотя и совершенно аналогичен элементарному смыслу, шире его и более общ... Имеются опять-таки определенные электрические явления, связанные соотношениями такой же формы, как и соотношения, которые связывают динамические явления. Прилагать к этим электрическим явлениям фразы динамики с соответствующими различиями и с временными оговорками представляет собой смелую метафору: но это — законная метафора, если она сводит истинное представление об электрических соотношениях к таким, которые уже испытаны в динамике».

¹⁹ Максвелл [20], § 866. Цитата взята из «Lezioni Accademiche» (Флоренция, 1715), стр. 25.

²⁰ Максвелл [14], 1, 500.

²¹ Максвелл [9], 1, 580.

²² Максвелл [20], § 781.

²³ Максвелл [20], § 574.

²⁴ Там же.

²⁵ Максвелл [10], 2, 374. Различие между динамическим и статистическим методами и сейчас в широком употреблении и было приписано Максвеллу. См., например, Гиббс [4], стр. VIII; Коген [1], стр. 139; и Винер [28], сноска к стр. 81.

²⁶ Максвелл [10], 2, стр. 374.

²⁷ Дальнейшим доказательством этой веры Максвелла является его утверждение, что когда физика не в состоянии исследовать, вследствие малой величины, то, что он называет «явлениями на водоразделе» (water shed phenomena), она должна обратиться за помощью к статистическому методу. В явлениях на водоразделе наблюдается неустойчивое состояние: очень малая причина может вызвать очень большое следствие — подобно тому, как легкий толчок, данный неустойчиво сбалансированному валуну, вызывает оползень. Максвелл противопоставляет явления на водоразделе явлениям, подчиняющимся принципу непрерывности, в которых малое изменение причины вызывает только малое изменение следствия. См. Максвелл [21] и [18], стр. 13—14.

²⁸ Максвелл [19], стр. 328—329. См. также [16], 2, 670. См. также рассуждение Максвелла об использовании статистического метода в социальных науках. Оно сходно с его рассуждением о применении статистического метода в физике в том отношении, что Максвелл опять-таки видел возможное противоречие, возникающее вследствие сосуществования статистического метода с историческим [10], 2, 373—374.

²⁹ Максвелл [11], 2, 312.

- ³⁰ Там же. См. также [20], § 502. Сравнивая свою программу с программой континентальных ученых, Максвелл писал: «Представления, которым я пытался следовать, это представления о действии через среду — от одной части до прилегающей к ней части. Эти представления были в значительной степени использованы Фарадеем, и моей целью, поставленной в нескольких опубликованных статьях, была разработка их в математической форме и сравнение результатов с известными фактами. Это сравнение результатов, двух методов, совершенно противоположных в самых основных принципах, с философской точки зрения должно привести к ценным данным для изучения условий научного размышления».
- ³¹ Возможность бесконечного числа решений задачи о динамическом объяснении может даже быть источником юмора, как на карриатурах Руба Гольдберга, на которых показано некоторое количество механизмов, последовательно воздействующих друг на друга, в выполнении такой простой функции, как задувание горячей спички.
- ³² См., например, Коген [1], стр. 85; Шлик [25], стр. 29; Маргенау [7], стр. 77; Линдсей и Маргенау [6], стр. 191; Деверё [2], стр. 705.
- ³³ Пуанкаре [22], стр. VII—VIII.
- ³⁴ Пуанкаре [23], стр. 174—183.
- ³⁵ Розенблют и Винер [24], стр. 318—319.

Литература

1. Cohen M. R. Preface to Logic. N. Y. 1945.
2. Devereux G. A. conceptual Scheme of Society. «Am. J. of Sociology», v. XLV (1941).
3. Gauss C. F. Werke, 2-nd ed. Goetiingen, 1877.
4. Gibbs J. W. Elementary Principles in Statistical Mechanics. N. Y., 1902.
5. Larmor J. Aether and Matter. Cambridge, 1900.
6. Lindsay R. B. and Margenau H. «Foundations of Physics», N. Y., 1936.
7. Margenau H. Nature of Physical Reality. N. Y., 1950.
8. Maxwell J. C. Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association. «Scientific Papers of James Clark Maxwell». Cambridge, 1890, 2, 215—229.
9. Maxwell J. C. «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. «Roy. Soc. Transactions», v. CLV (1864); reprinted in Papers, 1, 526—597.
10. Maxwell J. C. Molecules. «Nature», 8 (May, 1873 — Oct. 1873); repr. in «Papers», 2, 361—378.
11. Maxwell J. C. On Action at a Distance. Papers, 2, 311—323.
12. Maxwell J. C. On the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies. «Nature», 11 (Nov. 1874 — April 1875); repr. in Papers, 2, 418—438.
13. Maxwell J. C. On Faraday's Lines of Force. «Trans. of the Cambridge Phil. Soc.», 10, part 1; repr. in Papers, 1, 155—229.
14. Maxwell J. C. On Physical Lines of Force. «Phil. Mag.», 21 (1861) and 23 (1862); repr. in Papers, 1, 451—513.

15. Maxwell J. C. On the Proof of the Equations of Motion of a Connected System. «Proc. of the Cambr. Phil. Soc.», 2, 1876; repr. in Papers, 2, 308—309.
16. Maxwell J. C. Tait's «Thermodynamics». «Nature», 17 (Nov. 1877—April 1878); repr. in Papers, 2, 660—671.
17. Maxwell J. C. Thomson and Tait's Natural Philosophy. «Nature», 20 (May 1879—Oct. 1879); repr. in Papers, 2, 776—785.
18. Maxwell J. C. Matter and Motion. N. Y.
19. Maxwell J. C. Theory of Heat. 8th ed. L., 1885.
20. Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. 3th ed. Oxford, 1892.
21. Maxwell J. C. Does the Progress of Physical Science tend to give any advantage to the opinion of Necessity (or Determinism) over that of the Contingency of Events and the Freedom of the Will? In: L. Campbell and W. Garnett «The Life of James Clark Maxwell», L., 1884, pp. 357—366.
22. Poincaré H. Electricité et Optique. 2th ed. P., 1901.
23. Poincaré H. The Foundations of Science. N. Y., 1921.
24. Rosenblueth A. and Wiener N. The Role of Models in Science. «Philosophy of Science», 12 (1945).
25. Schlick M. Philosophy of Nature. N. Y., 1949.
26. Thomson J. J. Recent Researches in Electricity and Magnetism. Oxford, 1893.
27. Turner J. Maxwell on the Method of Physical Analogy. «The British Journ. for the Philosophy of Sciences».
28. Wiener P. Cohen's Philosophical Interpretations of the History of Science. Glenco, 1951.

Теория поля со времени Максвелла*

Р. Э. Пайерлс

Я не уверен в том, что труд Максвелла по электромагнетизму является крупнейшим его вкладом в науку, потому что он сделал много вкладов, но этот труд является, конечно, тем, который мы прежде всего связываем с его именем. Если вы разбудите физика среди ночи и скажете «Максвелл», он, наверно, ответит: «электромагнитное поле».

Мне хотелось бы начать с того пути, на котором Максвелл осознал и ввел понятие поля. Я не буду пытаться обрисовать историческое развитие, имевшее место в прошедшие сто лет, но я попытаюсь взглянуть на некоторые понятия с нашей сегодняшней точки зрения, хотя, конечно, это в известной степени повлечет за собой обсуждение того развития, которое имело место.

Максвелл начал с основанного главным образом на интуиции ощущения того, что действие на расстоянии является неудовлетворительным в физике. Нельзя, например, поверить, что, когда магнит притягивает кусочек железа, то от него передается непосредственное действие без чего-либо промежуточного. Он сам указывал в своей первой статье по этому вопросу, как представление Фарадея о линиях сил поддерживало в нем это интуитивное чувство. Далее он отмечал что всякий, кто, подобно обучающемуся физике студенту, наблюдал картину линий сил, сделанную

* Из книги «Clerk Maxwell and modern Science». L., 1963, стр. 26 – 42.

видимой при помощи железных опилок, убеждался в том, что нечто должно происходить в промежуточном пространстве; однако он также указывал и на то, что поведение железных опилок можно легко объяснить на основании старого взгляда — действия на расстоянии, и здесь, конечно, не было противоречия. Я процитирую то место, где он пишет по этому поводу:

«Мы не удовлетворены объяснением, основанным на гипотезе притягательных и отталкивающих сил, направленных к магнитным полюсам, хотя бы мы и были удовлетворены тем, что это явление находится в строгом согласии с такой гипотезой, и мы не можем отделаться от мысли, что в каждой точке, где мы находим эти линии сил, должно существовать какое-то физическое состояние действия, обладающее достаточной энергией, чтобы вызвать такое явление»¹.

Это утверждение, я думаю, и сегодня имеет такую же силу, как тогда, когда Максвелл его написал.

Исходя из такого желания, он, далее, попытался ввести описание явления, в котором магнитный полюс или электрический заряд, или электрический ток возмущает только непосредственную окрестность среды, и это действие затем передается от точки к точке — в значительной степени подобно тому (это он цитирует в качестве иллюстрации), как передается действие, когда мы тянем проволоку звонка. Натяжение проволоки распространяется от точки к точке до тех пор, пока после малого промежутка времени оно достигает другого конца. Мы должны помнить, что во времена Максвелла было очень трудно представлять такую ситуацию чисто абстрактно. Тот взгляд, что в физике все может, в конечном счете, быть объяснено механически, получил существенную поддержку благодаря развитию статистической механики, в которой теплота оказывалась по существу механической. Естественно, поэтому, что Максвелл пытался объяснить распространение действия от точки к точке в механической среде.

Во второй из его знаменитых статей, опубликованной в 1864 г. и озаглавленной «Динамическая теория электромагнитного поля»², где, насколько я знаю, термин «элек-

¹ The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Cambridge, 1890, т. I, стр. 452.

² Там же, стр. 563.

ромагнитное поле» появляется впервые, Максвелл вновь делает интересные общие замечания. Он поступал очень хорошо, сопровождая свои статьи замечаниями, которые должны были объяснить цель статьи, и, я думаю, многие из нас значительно выиграли бы, следуя его примеру. Он рассматривает тип гипотез, образующих базу тех уравнений, которые он излагает, причем эти уравнения являются по существу уравнениями в той форме, в которой мы их знаем как «максвелловские уравнения».

Он замечает:

«Я попытался ранее описать специфический тип движения и специфический вид деформации, которые были бы так распределены, чтобы объяснять эти явления. В настоящей статье я избегаю подобных гипотез и, применяя такие термины, как «электрическое количество движения» и «электрическая упругость» в отношении известных явлений индукции токов и поляризации диэлектриков, я хочу просто направить внимание читателя на механические явления, которые помогут ему в понимании электрических явлений. Все подобные фразы в настоящей статье должны пониматься как иллюстративные, а не объясняющие».

Тем не менее он продолжает:

«Однако, говоря об энергии поля, я хочу, чтобы меня понимали буквально. Вся энергия есть то же, что и механическая энергия, независимо от того, существует ли она в форме движения или в форме упругости или в какой-либо другой форме. Энергия электромагнитных явлений есть механическая энергия».

Таким образом, в этом пункте Максвелл все еще не мог совершенно отделаться от того взгляда, что для объяснения необходимо все свести к механике. Если мы возьмем его утверждение, что вся энергия эквивалентна механической энергии, то, я думаю, мы согласимся с этим даже сегодня, но, конечно, в этом утверждении есть привкус того, что несколько устарело.

Для меня все еще остается тайной способ, которым Максвелл получил свои уравнения и убедился в их пригодности. Я сделаю определенные предположения относительно ответа на этот вопрос, однако, я не имею никаких доказательств того, что я прав. Для того чтобы обсудить этот вопрос, я напому вам эти хорошо известные уравнения, но не в тех обозначениях, в которых Максвелл запи-

сал их в своей знаменитой статье, а в тех, в которых они пишутся в настоящее время. В гауссовых единицах эти уравнения имеют вид

$$\operatorname{div} D = 4\pi\rho, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} B = 0, \quad (2)$$

$$\operatorname{curl} E + \frac{1}{c} \dot{B} = 0, \quad (3)$$

и (для момента)

$$\operatorname{curl} H = \frac{4\pi}{c} j. \quad (4)$$

Эта неполная форма уравнений суммирует то, что было тогда известно. Уравнение (1) утверждает, что можно использовать линии сил для описания электрического поля и что эти линии сил всегда начинаются и кончаются на положительном и отрицательном зарядах, как это показано Фарадеем. Затем, рассматривая электрическое поле, мы видим, что уравнение (3) утверждает, что в статическом поле существует электрический потенциал, так что до тех пор, пока мы рассматриваем только статические поля, энергия движущейся частицы сохраняется. Добавочный член в уравнении (3) представляет закон индукции. Как вы знаете, эти дифференциальные уравнения, как можно показать, полностью эквивалентны интегральной форме некоторых законов, а именно закону Кулона и закону индукции Фарадея, в том виде, в каком они были известны тогда.

В уравнении (2) мы имеем утверждение о том, что существуют также линии сил для магнитного поля, но они нигде не начинаются и нигде не кончаются, так как не существует свободных магнитных полюсов. Наконец уравнение (4) объясняет, по крайней мере для статического случая, что вблизи тока создается магнитное поле, т. е. это уравнение эквивалентно закону Био и Савара.

Если кто-нибудь охватит все те сведения об электромагнитных полях, которые были во времена Максвелла, и если он примет тот взгляд, что действие на расстоянии не является основой этих явлений и что должны быть местные законы, выраженные в дифференциальных уравнениях, а не в интегралах, то, я думаю, он придет к уравнениям, которые я написал. Мы в настоящее время учим студентов тому, что эти уравнения сами по себе противоречивы, если

считать, что они сохраняют силу даже при тех обстоятельствах, когда заряды и токи изменяются во времени. Беря дивергенцию от уравнения (4) и воспользовавшись тождеством $\operatorname{div} \operatorname{curl} \mathbf{H} = 0$, (5), мы получаем из правой части условие, что $\operatorname{div} \mathbf{j}$ должно быть равно нулю. Однако это вообще не имеет места; вместо этого, как мы знаем, дивергенция плотности тока должна удовлетворять уравнению непрерывности

$$\operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

выражающему сохранение заряда. Легко видеть, что мы можем исправить это противоречие, добавляя дополнительный член $-\frac{1}{c} \dot{\mathbf{D}}$ в (4) и получая таким образом правильное уравнение

$$\operatorname{curl} \mathbf{H} - \frac{1}{c} \dot{\mathbf{D}} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}. \quad (7)$$

Тогда из (1) и (7) имеем

$$4\pi \dot{\rho} = \operatorname{div} \dot{\mathbf{D}} = -4\pi \operatorname{div} \mathbf{j}, \quad (8)$$

что согласуется с (6).

Нет необходимости рассматривать этот аргумент как доказательство, потому что это, вероятно, единственный способ устранить противоречия в уравнениях. Нет сомнения, что можно было бы изменить уравнения другими способами, чтобы сделать их непротиворечивыми; фактически, если бы мы во что бы то ни стало захотели сохранить закон действия на расстоянии, то мы сказали бы: «когда ток меняется, вывод уравнений без дополнительного члена не действителен, — в этом случае нужно изменить уравнение (4)». Таким образом, мы не считаем это строгим доказательством, а просто аргументом, который превращает максвелловскую форму уравнений в более приемлемую для начинающего. Конечно, мы знаем также и другие доводы, имеющие дело с релятивистской инвариантностью, в силу которых эти уравнения должны принимать эту специфическую форму, но мы не будем рассматривать этого здесь.

Однако в статьях Максвелла не имеется никаких доказательств того, что именно таков был путь, который привел его к этим результатам или что такие аргументы играли какую-нибудь роль в его рассуждениях. Максвелл пришел к добавочному члену, пользуясь такой картиной, которую мы сегодня не приемлем. Сегодня мы знаем, что если наложить электрическое поле на конденсатор, в котором промежуточная среда имеет очень большую диэлектрическую постоянную, то большая часть электрической индукции D фактически будет затрачена на разделение зарядов в диэлектрике от одной стороны к другой. Вполне естественно ожидать, что движение этих зарядов будет сопровождаться током — током смещения. Но мы не станем постулировать какое-либо движение такого рода зарядов в вакууме. Однако Максвелл, действительно называвший D электрическим смещением, имел в виду именно такую картину. Он считал, что весь ток смещения представляет движение какого-то заряда в среде, в эфире, который переносит поле. Эта картина являлась частью механической модели, помогавшей ему построить понятие о том, каковы должны быть правильные уравнения.

Максвелл нигде не рассматривает вопроса, являются ли все дифференциальные уравнения, которые он окончательно написал, совместными друг с другом. Однако я ни минуты не сомневаюсь, что он был убежден в совместности этих уравнений. И действительно, он написал много решений этих уравнений, и если бы его механическая картина ввела его в заблуждение так, что он выписал бы уравнение (7) с другим членом (так что уравнения не были бы совместными), я уверен, что он не был бы удовлетворен и продолжал бы работу, пока не нашел бы надлежащим образом действующую схему. Таким образом, хотя я и не могу доказать этого, я вполне убежден, что та аргументация, которую мы обычно применяем сегодня, составляла фактически, явно или не явно, часть его рассуждений.

Но коль скоро вы написали уравнения в этой форме, мгновенное действие на расстоянии безвозвратно исчезло. Теперь неверно, что существует непосредственное действие на расстоянии, так как действие всегда зависит от того, что происходит в среде. Мне не нужно рассказывать вам о том, как на основании этого аргумента Максвелл пришел к убеждению, что возмущения поля распространя-

ются со скоростью света — точнее со скоростью, которая обнаруживается в уравнениях как отношение между электростатической и электромагнитной единицами и которая в экспериментах оказывалась настолько близкой к измеренной скорости света, насколько можно было этого желать.

Можно задать вопрос, что же случилось с попыткой построить механические модели, будь то упругая среда или жидкость? (обе эти модели Максвелл пытался построить в разное время, и эти усилия были поддержаны другими учеными, включая Дж. Дж. Томсона). Я думаю, что, обращаясь назад, мы можем констатировать две вещи.

Во-первых, идея в действительности оказалась не конструктивной в том смысле, что из нее ничего не следовало такого, чего нельзя было бы получить другими путями (если не засчитывать в пользу этой идеи того способа, которым пользовался Максвелл, применяя эти модели для получения своих результатов; но это скорее аргументы общего порядка, а не специфические).

Во-вторых, и это гораздо более важно, мы совершенно потеряли желание строить подобные модели, так как мы уже не придерживаемся веры XIX столетия в то, что механика, и в частности механика непрерывной среды, более фундаментальна, чем, например, электромагнетизм. Конечно, мы теперь знаем, что знакомые нам дифференциальные уравнения упругости и гидродинамики не являются такими законами априори, которые мы могли бы постулировать, если бы никогда не видели упругих сред или жидкости. Скорее они являются законами, выводимыми в конечном счете из свойств атомов и молекул, составляющих эти вещества, и из сил, действующих между ними. Далее, мы теперь также знаем, как понимать строение и свойства атомов, выраженные через составляющие их части, ядра и электроны, удерживаемые главным образом электрическими и в некоторой степени магнитными силами. Следовательно, если бы мы преуспели в сведении электромагнитной теории к гидродинамическим или упругим моделям, то мы бы полностью завершили круг! Мы бы объяснили электричество через механику непрерывной среды; мы бы объяснили непрерывную среду через атомы; и мы бы объяснили атомы через электричество и магнетизм. В конце концов мы бы ничего и ни через что не объяснили!

Разумеется, такое развитие составляло часть нашего признания, что в физике мы можем описывать, но не можем объяснять, потому что объяснение всегда означает сведение законов к чему-то знакомому. В повседневной жизни это означает сведение законов к вещам, известным нам из повседневного опыта. Но если мы хотим проникнуть за пределы этого практического опыта, то где те фундаментальные черты, на которых мы могли бы основать наши объяснения? Таким образом мы привыкаем к мысли (и дело здесь в значительной степени в приобретении привычки), что электромагнитное поле является существенной частью физики, которую нельзя свести к чему-либо другому. Утверждение, что существует электрическое или магнитное поле с определенной интенсивностью в определенном направлении в каждой точке пространства стало для нас таким же приемлемым, как и утверждение, что существует в какой-то точке частица, движущаяся с определенной скоростью и подверженная действию определенной силы. Другими словами, природа оказалась богаче, чем можно было этому поверить, — в том смысле, что в природе существует гораздо больше понятий, включая и понятия электромагнитного поля, которые не могут быть сведены к каким-нибудь другим основным понятиям. Иной вопрос — какие отношения существуют между различными величинами; и это тот вопрос, к которому я возвращаюсь.

Хорошо, что после усвоения идей Максвелла физики привыкли к восприятию, в качестве основного физического факта утверждения, что существует некоторое поле определенного рода в определенной точке пространства, так как уже давно нельзя было ограничиваться электромагнитным полем. Много других полей появилось в физике и, конечно, мы не желаем и не ожидаем объяснения их через модели разного типа.

Исторически следующим появившимся полем было гравитационное поле. Гравитационные силы не были новыми, но мысль о том, что они также должны управляться местными дифференциальными уравнениями, предписывающими то, как одна часть гравитационного поля действует на прилегающую часть, являлась новостью в нашем столетии; разработкой этой идеи мы, в частности, обязаны трудам Эйнштейна. Такой принцип влечет за собой в качестве следствия то, что гравитационные действия, подоб-

но электромагнитным действиям, распространяются с конечной скоростью и не могут распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Теория относительности учит нас, что никакой сигнал не может этого сделать, а отсюда немедленно следует признание, что быстрое возмущение гравитационного поля порождает распространение волн таким же самым образом, как быстрое распространение возмущения электромагнитного поля также распространяется в виде волн.

Утверждение, которое я только что сделал, вызвало продолжительные споры между специалистами, споры о том, существуют ли гравитационные волны или нет, но я думаю (хотя я и не являюсь специалистом), что теперь все они согласились с очевидным ответом. Не требуется никакой тонкой аргументации, по крайней мере для ответа в том смысле, что были бы гравитационные волны, которые мы могли бы изучать, если бы мы могли придумать достаточно мощное приспособление для того, чтобы производить быстрые возмущения, которые были бы измеримы на расстоянии.

Очевидно теория гравитационного поля, как и теория электромагнитного поля, выражается через величины, которые определены в определенных точках пространства и для которых было бы невозможно создать механические модели. На этом, однако, история не кончается; появились новые поля, и в наше время они, кажется, размножаются в изобилии. Первое из них — это волновое поле, связанное с движением частицы. В принципе такое поле существует для каждой частицы, но на практике оно наиболее резко выражено для легких частиц — таких как электрон. С электроном нужно связывать величину, волновую функцию, которая опять-таки определена в каждой точке пространства, если только мы имеем достаточно сведений о состоянии электрона. Бросая взгляд на все это, мы понимаем, что встретились с новыми теоретическими затруднениями, и мы должны быть довольны что развитие, начатое трудом Максвелла, устранило некоторые теоретические затруднения с нашего пути.

Существует большая разница между полем волны, описывающей частицу, и электромагнитным полем, описывающим радиацию. Так, электромагнитное поле — это нечто измеримое в принципе, а во многих случаях — измеримое и на практике с большой степенью точности. В случае ра-

диовольны, приходящей от передатчика, можно не только спрашивать, о том, какова интенсивность волны, какова ее частота и поляризация, но можно также утверждать, и проверить это экспериментально, что в определенной точке в некоторый определенный момент направление электрического вектора вполне определено, а поле имеет определенную интенсивность. Этого нельзя сделать с волновым полем, изображающим электрон, по причинам, о которых я буду говорить ниже. Таким образом, появляются новые величины, которые можно назвать полями и которые возникают с развитием квантовой механики; они важны, так как для того чтобы делать некоторые предсказания о поведении электрона или какой-нибудь другой частицы, нам нужно изучать их свойства. Так, например, квадрат волновой функции говорит нам о вероятности нахождения частицы в определенной точке пространства, если мы будем искать ее там. Но я хочу подчеркнуть, что такие волновые поля не во всех отношениях подобны электромагнитному полю. Худшее ждет нас впереди, так как те изменения, которые должны быть сделаны в физической теории при применении ее к малым объектам или малым размерам, влияют также на само электромагнитное поле. Следует рассматривать величины электромагнитного поля как физические переменные, подчиняющиеся законам квантовой теории так же, как и любая другая физическая переменная. На самом деле, квантовая теория с самого начала, от гипотезы Планка о том, что энергия представляет собой пучок излучения, основана на том, что световые кванты являются неделимыми и что каждое количество энергии связано с частотой излучения, и это показывает, что простая картина непрерывного изменения интенсивности поля, как это выражается в максвелловых уравнениях, не полна. Она должна быть заменена квантовой теорией электромагнитного поля.

В своей простейшей форме квантовая электродинамика, которая по существу применяет к электромагнитизму основную гипотезу Планка, в количественной форме применяя формализм квантовой механики, была написана в конце 20-х и начале 30-х годов. Я думаю, что первым, кто рассматривал вещи таким образом, был Дирак¹, но он избежал некоторых осложнений, ставших очевидными позже.

¹ P. A. M. Dirac. «Proc. Roy. Soc.», A., 114, 243 и 710 (1927).

Первой попыткой изложения полной квантовой теории электромагнитного поля была статья Гейзенберга и Паули ¹. Эта работа выяснила многие вопросы, которые возникли тогда, но она внесла также определенные трудности, и хотя эти трудности значительно глубже понимаются в настоящее время, я не уверен, что мы можем претендовать на то, что мы их полностью преодолели.

Важной особенностью теории того типа, который был разработан Гейзенбергом и Паули, является то, что принцип неопределенности квантовой механики применяется к электромагнитным полям так же, как он применяется и в других случаях. Это означает, что как произведение $\delta r \delta x$ неопределенностей в определении момента частицы и ее координат положения должно превосходить некоторую величину порядка постоянной Планка h , так же и здесь существует предел точности, с которой можно измерять электромагнитное поле. Однако мы здесь должны быть несколько более точными, так как получается, что если мы намереваемся измерить электромагнитное поле в математически определенной точке пространства, то произведение $\delta E \delta H$ неопределенностей электрического и магнитного полей становится бесконечно большим. Нельзя измерить их с какой-либо точностью! Безусловно, ни один разумный экспериментатор не станет пытаться измерять непрерывную величину в точке. Лучшее, на что можно надеяться, — это измерить среднее по малой области, а затем, делая все большие и большие приближения, уменьшать размеры этой области. Если поступать так (опуская ради простоты подробности того, как определять среднее или форму области), то для области с линейными размерами L соотношение неопределенности для электромагнитного поля, оказывается, принимает вид

$$\delta E \delta H > \frac{ch}{L^4}. \quad (9)$$

Следовательно, мы обнаруживаем, что по мере того, как эта область становится все меньше и меньше, ошибки при совместном рассмотрении E и H становятся все больше и больше, подразумевая, что должны наблюдаться существенные флуктуации поля.

¹ W. Heisenberg, W. Pauli. «Zts. f. Phys.», 56, 1 (1929); 59, 168 (1929).

Это и не удивительно, потому что квантовая теория рассматривает каждый возможный тип колебаний электромагнитного поля, как осциллятор, а мы знаем, что квантово-механический осциллятор обладает нулевой энергией даже когда он находится в самом низшем состоянии. В нашем случае это означает, что если даже световые кванты или «фотоны» отсутствуют, все же остаются колебания поля. Далее, это применимо к каждому типу колебаний всякой возможной длины волны и всякого направления. Если теперь усреднить по определенной области, то типы колебаний очень коротких волн тоже усредняются; но чем меньше область, по которой проводится усреднение, тем большее число типов вносят свою долю, и поэтому ошибки увеличиваются. Таким образом, электромагнитное поле приобретает большую реальность. Хотя такое явление мы не можем объяснить механически, но оно имеет большую реальность, чем можно вообразить с классической точки зрения, и чем точнее мы будем стараться рассматривать явление, тем большие флуктуации будем в нем открывать.

Но принцип неопределенности (9) для электромагнитного поля относится, как и в механике частицы, к произведению *двух* величин, т. е. чем более точно измеряется электрическое поле, тем менее точно мы можем знать магнитное поле, и наоборот. Однако, согласно формализму квантовой механики, каждое поле в отдельности может быть измерено сколь угодно точно. Это сложный вопрос и такой, относительно которого сначала были некоторые разногласия. Ландау и я попытались доказать¹, что, хотя это и результат принципа неопределенности, но фактически невозможно на практике при помощи какого бы то ни было прибора измерить одно из полей само по себе сверх определенного предела точности. Испускаемое излучение интерферирует с полем пробных тел, которые должны применяться для наблюдения первоначальных полей.

Нильс Бор не согласился с такой точкой зрения и в ряде статей, написанных совместно с Розенфельдом², доказал, что наши заявления неправильны. Они доказали, что в принципе можно изобрести такие приборы, которые будут измерять одну компоненту поля, усредненную по ко-

¹ L. Landau and R. Peierls. «Zts. f. Phys.», 69, 56 (1931).

² N. Bohr and L. Rosenfeld. «Kgl. Danske Videnskab. Selskab., Mat. fys. Medd.», 12, 8 (1933).

нечному объему или конечному времени (что из них выбрать — несущественно) с любой степенью точности. Тем не менее любопытно отметить, что, когда мы рассматриваем детали тех ограничений, которые необходимо наложить на измерительный прибор, то результирующие операции выглядят совершенно непохожими на какие-либо измерения, которые экспериментатор стал бы проектировать. Одна из трудностей состоит в том, что для того, чтобы удерживать на низком уровне испускание излучения, которое, конечно, будет стремиться исказить измеряемое поле, пробные тела должны быть сделаны весьма тяжелыми. Это означает, что их движение и ускорение в поле будет только весьма малым, и поэтому смещение их должно быть измерено весьма точно. Кроме того, эти пробные тела должны полностью заполнять пространство в измеряемом поле, хотя они сами не должны создавать поля или, по крайней мере, заметного поля, потому что можно устроить так, чтобы было два таких испытательных тела и чтобы они перекрывались и заполняли то же самое пространство в то же самое время. Например, можно представить себе эти тела как налагающиеся решетки, несущие противоположные заряды, так что только небольшое относительное движение в противоположных направлениях в результате действия измеряемого поля приведет к разделению зарядов. Это вызовет только малое поле, которое можно удерживать в пределах границ.

Таким образом, если мы хотим быть точными в измерении поля, то мы должны измерять его своеобразными способами. Имеем ли мы право заявлять, что мы измеряем поле, которое имело бы в отсутствии этих пробных телец, довольно трудно судить. Нормально, когда мы измеряем что-нибудь, мы оставляем систему в неприкосновенности и быстро приносим измерительный прибор. Здесь мы не можем этого сделать, потому что поля электромагнитного излучения не остаются неизменными очень долго. Они распространяются со скоростью света, и поэтому, так как измеряющая аппаратура не может за ними угнаться она должна сохранить свое положение.

Аргументы Бора и Розенфельда основаны на фундаментальных законах квантовой теории электромагнитного поля вне зависимости от того, какого сорта малыми испытательными телами или частицами физик располагает на самом деле. Самые тяжелые отдельные частицы, которые

мы знаем в природе, имеют конечную массу, поэтому мы не можем получить систему испытательных тел, которая была бы сколь угодно тяжелой, как это необходимо для таких воображаемых экспериментов. Разумеется, мы можем построить большой предмет из атомов так, что он будет сколь угодно тяжелым, но он будет также протяженным в пространстве и иметь внутренние степени свободы. Тогда различные атомы смогут совершать колебания относительно друг друга и создавать нарушающие радиационные эффекты, вызывающие дальнейшие осложнения.

На самом деле, мы можем идти очень далеко при измерении электрических полей, применяя электроны, потому, что электроны, как оказывается, не сильно подвержены действию всяких других агентов. Еще лучшей частицей является μ -мезон, который в двести раз тяжелее электрона, и поэтому является лучшей пробной частицей. Насколько мы знаем, μ -мезон также не подвержен заметному действию чего либо другого, кроме электрических сил. Правда, он сам по себе живет только две микросекунды, но это достаточно долго для подобных экспериментов!

Если нам нужно что-нибудь потяжелее, то мы должны обратиться к таким частицам, как протоны, которые очень сильно подвержены иным типам взаимодействий, например взаимодействию с другими нуклонами. Конечно, если протон достаточно сильно возмущен, то он может испускать мезоны и всякого рода другие новые частицы, известные теперь в физике. Следовательно, я думаю, что для такого рода измерений, которые мы обсуждаем, протоны были бы совершенно бесполезными. Очевидно, на практике существуют пределы, до которых можно распространить понятие поля, даже усредненного по малой области. Это не противоречит работе Бора и Розенфельда, которые утверждают вполне определенно, что они просто исследуют то, что возможно в рамках квантовой электродинамики, не ограничиваясь возможностью существования (или чего-либо другого) различных частиц и других объектов.

На менее теоретическом уровне мы можем теперь отметить другой пункт по поводу сравнения, которое я раньше сделал между электромагнитным полем и волновым полем материи. Эта аналогия была исключительно полезна при разработке квантовой механики. Но она имеет свои ограничения, и она не так полна, как это часто принимают. Для электромагнитного поля существует классиче-

ский предел, внутри которого все измеримо и нет нужды беспокоиться относительно принципа неопределенности, как, например, это имеет место в случае радиоволн. Для того чтобы увидеть, какую форму этот предел принимает, мы можем написать амплитуду какой-нибудь волны — или волновой функции ψ , или электрического вектора E , скажем, в виде

$$E = a \cos(kx - \omega t - \gamma). \quad (10)$$

Затем, рассматривая такую волну, мы можем спросить, насколько точно мы можем надеяться измерить фазу γ , т. е. измерить, где находятся узлы и гребни волн в данный момент? Мы получаем такой результат, что если N — число фотонов, переносимых волной, пропорциональное a^2 , то неопределенности δN и $\delta \gamma$ в N и γ связаны соотношением

$$\delta N \delta \gamma \geq 2\pi. \quad (11)$$

Значит, если мы вообще интересуемся фазой, мы должны знать ее с точностью большей, чем 2π . Другими словами, мы должны иметь $\delta \gamma \ll 2\pi$, так что $SN \gg 1$. Это означает, что когда мы можем приписать волне классическое значение, мы должны иметь в значительной степени неопределенность относительно числа частиц, содержащихся в волне. Для света это всегда правильно, так как в основных процессах, при помощи которых свет взаимодействует с материей или с измеряющим прибором, фотоны всегда испускаются или поглощаются по одному. Поэтому если в окрестности имеется измеряющий прибор, число фотонов должно по необходимости быть неопределенным. Однако в случае электронов дело обстоит не так, потому что электроны несут заряд. Если бы присутствовали только электроны, то их число всегда было бы известно из полного заряда, который сохраняется. Мы можем создавать пару положительного и отрицательного электронов вместе, но тогда то, что мы измеряем, будет не фазой или волновой функцией *одного* из них, а фазой произведения двух волновых функций электрона и позитрона, а это — нечто совсем иное.

Следовательно, если частицы не могут быть поглощены или произведены сами по себе, у нас нет никакой надежды когда-либо приписать единственное значение фазе. С другой стороны, для того чтобы получить классическую ситуа-

цию, нам нужно, чтобы неопределенность в фазе γ была мала сравнительно с 2π и в то же время, чтобы неопределенность в числе N была малой сравнительно со значением самого этого числа N . Другими словами, нам нужно удовлетворить обоим условиям

$$\delta\gamma \ll 2\pi, \quad \delta N/N \ll 1. \quad (2)$$

Из этих условий ясно следует, что N должно быть велико по сравнению с единицей, так что должно быть в наличии множество частиц или фотонов. Точнее, соответствующее число фотонов — это не все фотоны лаборатории, а только те, которые находятся во вполне определенном типе движения, например в специфической радиоволне, испускаемой передатчиком. В случае радиоволн затруднений не встречается; число фотонов всегда очень велико, поскольку энергия каждого из них на радиочастотах исключительно низка. С электронами, однако, этому условию нельзя удовлетворить, потому что электроны подчиняются принципу исключения, который требует, чтобы в каждом из возможных типов движения находилась только одна частица. Следовательно, нельзя иметь произвольно большое число частиц, переносимых волной материи, и нельзя получить классического описания таких волн.

Конечно, не следует считать простой случайностью то, что мы рассматриваем электромагнитное поле и фотоны, как волны, в то время, как электроны и другие тела мы считаем частицами. Существует область, в которой электромагнитное поле имеет идеально точное классическое значение и может быть представлено классическими уравнениями, символы которых соответствуют вполне определенным числам, которые могут быть записаны. Этого нельзя сделать с полем материи. Нельзя также получить описание в виде частиц для фотонов в области, где было бы справедливо классическое описание, так как там существует трудность в локализации фотонов. В то время, как можно спрашивать, где находится частица (фактически волновая функция и была придумана для того, чтобы позволить нам предсказывать возможные результаты экспериментов, запроектированных для локализации частицы), нельзя спрашивать, где находится фотон, кроме как в рамках геометрической оптики. Если ограничить все электромагнитное поле малой областью, то можно предположить,

что правильно считать, что фотоны находятся где-то там, но нельзя более точно локализовать их, как это можно сделать в эксперименте с электронами. Это является следствием того факта, что фотоны имеют нулевую массу покоя и распространяются со скоростью света.

Такого же рода трудности возникают, когда электроны или другие частицы отыскиваются в релятивистской области. Если проектируется эксперимент, имеющий целью попытку локализовать их более точно, то принцип неопределенности требует такого мощного действия сил на них, что не только их момент изменяется на величину, указываемую принципом неопределенности, но кроме того, создаются пары новых частиц, и к тому времени, когда эксперимент заканчивается, уже не ясно, что мы искали.

Эти осложнения с понятием поля, которые являются следствиями квантовой теории, уже достаточно плохо выглядят, но вдобавок к ним мы узнали, что существует много предсказаний, которые мы хотели бы сделать относительно электромагнитного поля, но которые приводят к бесконечным ответам. Одно из них я уже упоминал. Поскольку существует нулевое колебание для каждого типа колебаний электромагнитного поля, и поскольку существует бесконечное число таких типов (так как нет нижнего предела для возможной длины волны и, следовательно, нет верхнего предела для момента протона), средняя энергия этого флуктуирующего поля, вычисленная обычным путем, оказывается бесконечно большой. Это тесно связано с растущей интенсивностью флуктуаций по мере того, как рассматриваются все меньшие и меньшие области. Поэтому нам следует объяснить, о чем мы говорим, когда утверждаем, что то, что мы действительно наблюдаем как энергию, есть только энергия поля минус энергия, которая существовала бы там нормально в вакууме. Таким способом мы выключаем себя из бесконечной энергии вакуума. Пожалуй, это можно было бы сделать несколько более приемлемым благодаря тому факту, что в вакууме существуют бесконечности, одни из которых являются положительными, а другие отрицательными. При достаточном благоразумии можно убедить себя, что эти бесконечности могут взаимно уничтожаться или, по крайней мере, в том, что ответ двусмыслен и необходимо принять разумную точку зрения, состоящую в таком описании, при котором вакууму не приписывают никакой энергии.

Эти бесконечности умножаются, когда рассматривается взаимодействие частиц с полями или друг с другом. Так, если мы описываем электрон как точечный заряд, тогда энергия поля, им создаваемая (даже энергия статического поля), бесконечно велика. Это было известно Лоренцу, который попытался ввести такую схему, в которой электрон был не математической точкой, а имел конечные размеры.

Сначала была надежда, что квантовая теория устранил это затруднение так же, как она практически устранила все затруднения до-квантовой физики. Однако в действительности это затруднение осталось. Энергия точечного заряда все еще бесконечна, даже если привлечь все квантовые законы. Мы научились справляться с этим потому, что не знаем энергии покоя электрона самого по себе. Мы не можем сказать, какая энергия покоя была бы у него, если бы был устранен весь заряд, так как мы никогда не видели электрона без заряда. То, что мы наблюдаем, есть полная масса или полная энергия покоя частицы со всеми связанными с ней полями. Поэтому все вычисления должны производиться так, будто только эта наблюдаемая величина входит в них. Развитие квантовой теории поля в послевоенные годы научило нас, что если мы будем следовать такой процедуре, то вещи будут выглядеть лучше. Конечно, это включает фикцию, состоящую в том, что частица обладает бесконечной отрицательной механической энергией или массой — такой же фикцией, как и бесконечная положительная энергия электромагнитного поля с частицей, находящейся в середине его. Если мы примем, что эти частицы взаимно уничтожаются, — не произвольно, как это может показаться, но в силу определенных процессов, которые были последовательно развиты, тогда все физически наблюдаемые результаты, могут быть выражены через другие наблюдаемые результаты, и все получается конечным.

Должны ли мы уплатить какую-то цену за эту в основном непоследовательную картину? означает ли это, что если мы проведем расчеты за пределы точности, практически достижимой в настоящее время, то мы встретимся с трудностями (как полагают многие) или же мы сумеем выразить все непосредственно только через физические величины, не прибегая к двум отдельным понятиям — энергии поля и механической энергии, которая тогда исчезнет из физики, как исчезли механические модели Максвелла за уравнениями, которые он написал, — судить еще рано.

Развитие кинетической теории газов (Максвелл)*

С. Дж. Бруш

Существенным свойством газа является случайное движение составляющих его частиц: фактически слово «газ» означает само по себе хаос [1]. Вначале теоретики кинетической теории [2] стремились игнорировать это свойство. Они основывали свои математические доказательства на допущении, что все молекулы движутся с одной и той же скоростью, а иногда вдобавок к этому предполагали, что все молекулы расположены правильными рядами в пространстве, а затем предлагали приемлемые аргументы для доказательства, что результаты были бы теми же самыми, если бы молекулы двигались случайным образом. Именно Максвеллу мы обязаны введением статистического подхода в кинетическую теорию.

Основная гипотеза Максвелла состояла в том, что многочисленные столкновения между молекулами газа, вместо того, чтобы привести к выравниванию скоростей молекул, как предполагали некоторые ученые [3], на деле приводят к статистическому распределению скоростей, в котором могут встречаться любые скорости с известной вероятностью. Существование единственного равновесного распределения, к которому будут стремиться другие распределения, долгое время не было строго доказано и оставалось предметом разногласий в течение многих лет. Однако успех мощных методов статистической механики,

* Из журнала «Annals of Science», 1958, 14, № 4, стр. 243—255.

которая использует максвелловское распределение в качестве основы для расчета макроскопических свойств физических систем, а также и более непосредственные эксперименты доказывали, что эта гипотеза в основном правильна [4].

Первая статья Максвелла по кинетической теории была доложена на собрании Британской ассоциации в 1859 г. [5]. Он начал с указания на то, что при столкновении двух упругих шаров все направления отдачи являются равноправными [6]. По-видимому, он считал, что этот факт обеспечивает не только то, что все направления движения являются равновероятными в газе, но также и то, что вероятность распределения для каждого компонента скорости не зависит от значений других компонентов. Первое доказательство его закона распределения основывалось на этих двух допущениях. Максвелл позже понял, что справедливость второго предложения не очевидна, и потому попытался дать другое доказательство [7], в котором это свойство выводилось, а не являлось допущением.

Оригинальный вывод закона распределения таков:

«Найти среднее число частиц, скорости которых после большого числа столкновений между большим числом равных частиц лежат между заданными пределами.

Пусть N — целое число частиц. Пусть x, y, z — компоненты скорости каждой частицы в трех взаимно перпендикулярных направлениях, и пусть число частиц, для которых x лежит между x и $x + dx$, будет $Nf(x)dx$, где $f(x)$ функция от x , которая должна быть определена.

Число частиц, для которых y лежит между y и $y + dy$, будет $Nf(y)dy$; а число частиц, для которых z лежит между z и $z + dz$, будет $Nf(z)dz$, где под f всегда подразумевается одна и та же функция.

Наличие скорости x никак не влияет на скорости y или z , потому что все слагающие направлены под прямыми углами друг к другу и не зависят друг от друга, так, что число частиц, скорости которых лежат между x и $x + dx$ и также между y и $y + dy$ и между z и $z + dz$, равно

$$Nf(x)f(y)f(z)dx dy dz.$$

Если предположить, что эти N частиц начинают движение из начала координат в тот же момент, то это число

означает число частиц в элементе объема ($dx dy dz$) через единицу времени, а число, отнесенное к единице объема, будет

$$Nf(x)f(y)f(z).$$

Но направления координат вполне произвольны, и поэтому это число должно зависеть только от расстояния от начала, т. е.

$$f(x)f(y)f(z) = \varphi(x^2 + y^2 + z^2).$$

Разрешая это функциональное уравнение, находим

$$f(x) = Ce^{Ax^2}, \quad \varphi(r^2) = C^3e^{Ar^2}.$$

Если считать A положительным, то это число частиц будет возрастать со скоростью, и мы найдем, что полное число частиц бесконечно. Поэтому допустим, что A отрицательно и равно $-1/\alpha^2$, так что число частиц, заключенных между x и $x + dx$, равно

$$NCe^{-x^2/\alpha^2} dx.$$

Интегрируя от $x = -\infty$ до $x = +\infty$, находим полное число частиц

$$NC \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2/\alpha^2} dx = N, \quad \text{откуда } C = \frac{1}{\alpha \sqrt{\pi}},$$

а поэтому $f(x)$ равно

$$\frac{1}{\alpha \sqrt{\pi}} e^{-x^2/\alpha^2}.$$

Отсюда мы можем вывести следующие заключения:

1) Число частиц, скорость которых после разложения по определенному направлению лежит между x и $x + dx$, есть

$$N \frac{1}{\alpha \sqrt{\pi}} e^{-x^2/\alpha^2} dx.$$

2) Число частиц, фактическая скорость которых лежит между v и $v + dv$, равно

$$N \frac{4}{\alpha^3 \sqrt{\pi}} v^2 e^{-v^2/\alpha^2} dv.$$

3) Чтобы найти среднее значение v , необходимо сложить скорости всех частиц и разделить на число частиц. В результате получим: средняя скорость $v = \frac{2x}{\sqrt{\pi}}$.

4) Для того чтобы найти среднее значение v^2 , нужно сложить все значения вместе и разделить на N среднее значение $v^2 = \frac{3}{2} \alpha^2$. Это больше, чем квадрат средней скорости, как и должно быть» [8].

Обобщение на случай, когда молекулы подвержены действию внешней силы, было выполнено в 1873 г. [9]. Обозначая через (ξ, η, ζ) компоненты скорости, можно записать распределение скоростей в данном месте в виде

$$dN = C e^{AM(\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2)} d\xi d\eta d\zeta dx dy dz,$$

где C функция положения [10]. Максвелл считал, что внешняя сила не влияет на скорости в течение очень короткого времени соударений, так что зависимость от скорости будет все еще сохранять вышеприведенную форму, хотя постоянная A может в принципе зависеть от положения. Если сила выводится из потенциала ψ , то «изменения x, y, z , вызванные движением молекул за время δt , суть

$$\delta x = \xi \delta t, \quad \delta y = \eta \delta t, \quad \delta z = \zeta \delta t,$$

а изменения ξ, η, ζ за тот же промежуток времени вследствие действия силы

$$\delta \xi = \frac{d\psi}{dx} \delta t, \quad \delta \eta = \frac{d\psi}{dy} \delta t, \quad \delta \zeta = - \frac{d\psi}{dz} \delta t.$$

Положим

$$c = \log C \log \frac{dN}{d\xi d\eta d\zeta dx dy dz} = c + AM(\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2).$$

Изменение этой величины вследствие изменений $\delta x, \delta y, \delta z, \delta \xi, \delta \eta, \delta \zeta$ равно

$$\begin{aligned} & \left(\xi \frac{dc}{dx} + \eta \frac{dc}{dy} + \zeta \frac{dc}{dz} \right) \delta t - \\ & - 2AM \left(\xi \frac{d\psi}{dx} + \eta \frac{d\psi}{dy} + \zeta \frac{d\psi}{dz} \right) \delta t + M(\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2) \cdot \\ & \cdot \left(\xi \frac{dA}{dx} + \eta \frac{dA}{dy} + \zeta \frac{dA}{dz} \right) \delta t. \end{aligned}$$

Так как число молекул не меняется за время их движения, то эта величина равна нулю, каковы бы ни были значения ξ , η , ζ . И, в силу последнего члена,

$$\frac{dA}{dx} = 0, \quad \frac{dA}{dy} = 0, \quad \frac{dA}{dz} = 0$$

или A постоянно во всей области пересекаемой движением молекул.

Теперь, сравнивая первый и второй члены, находим:

$$c = AM(2\psi + B)«. \quad [11]$$

Постоянные A и B могут быть определены, как обычно, через полное число молекул и полную энергию. Когда присутствуют молекулы разных сортов, получается закон распределения такого же вида, в котором A — то же самое для каждого вида молекул (и следовательно, средняя кинетическая энергия для каждого вида одна и та же), но B может быть различным.

Этот закон более строго выведен Больцманом [12] и известен под названием закона распределения Максвелла — Больцмана. В современных обозначениях можно записать его, определив полную энергию (кинетическую плюс потенциальную), молекулы следующим образом:

$$E = \frac{1}{2} M (\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2) + \psi.$$

Этот закон тогда означает, что относительная вероятность нахождения молекулы с энергией E есть

$$e^{-E/kT},$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. В таком виде эта формула является фундаментальным постулатом статистической механики, если считать, что энергия может включать также энергию внутриаомных и внутримолекулярных сил.

Другой вклад Максвелла в кинетическую теорию — это его работа о свойствах переноса и, в частности, вязкости. Первый важный результат, полученный им, заключается в том, что для газа, состоящего из жестких шариков, коэффициент вязкости должен быть независим от плотности. Для того чтобы получить этот результат, он воспользовался методом среднего свободного пробега Клаузиуса.

«Пусть система будет разделена на слои параллельные плоскости xy , пусть переносное движение каждого слоя в направлении x есть u , и пусть $u = A + Bz$. Мы должны рассмотреть взаимодействие между слоями с положительной и отрицательной сторон плоскости xy . Сначала определим взаимодействие между двумя слоями dz и dz' , расположенными на расстояниях z и $-z'$ с противоположных сторон плоскости, площадь каждого из которых единична. Число частиц в единицу времени, начинающих движение от dz и достигающих расстояния между nl и $(n + dn)l$, равно

$$N \frac{v}{l} e^{-n} dz dn.$$

Число частиц, заканчивающих пробег в слое dz' , равно

$$N \frac{v}{2nl^2} e^{-n} dz dz' dn.$$

Средняя скорость в направлении x , которую имела каждая из частиц до столкновения, равна $A + Bz$, а после столкновения $A + Bz'$. Средняя масса слоя равна M , так что среднее количество движения, сообщаемое каждой частицей, равно $MB(z - z')$. Полное действие этих столкновений выражается поэтому следующим образом:

$$NMB \frac{v}{2nl^2} (z - z') e^{-n} dz dz' dn.$$

Сначала нужно интегрировать по z' между $z' = 0$ и $z' = z - nl$. Это дает

$$\frac{1}{2} NMB \frac{v}{2nl^2} (n^2 l^2 - z^2) e^{-n} dz dn$$

для действия между слоем dz и всеми слоями ниже плоскости xy . Затем, интегрируя от $z = 0$ до $z = nl$, получим

$$\frac{1}{6} MNBlvn^2 e^{-n} dn.$$

Интегрируя от $n = 0$ до $n = \infty$, находим полное трение между единицей площади над и под плоскостью:

$$F = \frac{1}{3} MNlvB = \frac{1}{3} \rho lv \frac{du}{dz} = \mu \frac{du}{dz},$$

где μ — обычный коэффициент внутреннего трения:

$$\mu = \frac{1}{3} \rho lv = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Mv}{s^2},$$

где ρ — плотность, l — средняя длина свободного пробега частицы, v — средняя скорость... [13] (s — расстояние между центрами)».

Предположение, что вязкость не зависит от плотности, допускало ясную экспериментальную проверку справедливости кинетической теории, так как другая, статическая теория заведомо приводила бы к тому, что следовало бы ожидать, что вязкость будет увеличиваться с плотностью (как это действительно имеет место в жидкости). В то время точных экспериментов по вязкости газов еще не было, и Максвелл спроектировал и выполнил сам собственный эксперимент. Он обнаружил, что вязкость воздуха при данной температуре оставалась постоянной при изменении расстояния между половиной дюйма и тридцатью дюймами [14]. Этот результат, независимо подтвержденный Мейером [15], вероятно, обратил внимание ученых, которые еще не признавали кинетической теории.

Приведенная выше формула подразумевает также, что вязкость должна быть пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры, если считать молекулы упругими шариками. Однако эксперименты, по-видимому, доказывали, что вязкость просто пропорциональна температуре [16]. Тогда Максвелл разработал значительно более общую и детальную теорию переноса свойств в газах, основанную на допущении, что молекулы отталкиваются с силой, обратно пропорциональной n -й степени расстояния между их центрами [17]. Его метод состоял в определении среднего значения различных функций скоростей молекул, которые могут быть записаны в виде интегралов по динамическим переменным, описывающим соударение молекул. Затем он мог отождествить макроскопические свойства, например диффузию, теплопроводность, давление и вязкость с соответствующими средними значениями. В общем этот подход приводит к выражениям типа

$$\iiint Q V^{\frac{n-5}{n-1}} f(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta,$$

где Q — некоторая функция компонентов скорости (ξ, η, ζ), зависящая от рассматриваемого свойства, а V — относительная скорость двух соударяющихся молекул [18]. В частном случае ($n = 5$) V выпадает, и это выражение приводится к среднему значению Q ; тогда можно, например, доказать, что вязкость пропорциональна абсолютной температуре независимо от характера функции f [19]. Так как Максвелл полагал, что это действительно имеет

место, то в дальнейших своих вычислениях он и принял функцию силы пятой степени. (Молекулы с взаимодействием этого типа теперь называют «максвелловскими».) Позже было показано экспериментально, что зависимость вязкости от температуры более сложна, чем допускал Максвелл, и полное теоретическое объяснение потребовало определения функции распределения скоростей f для неоднородного газа, где максвелловское распределение справедливо только приближенно. За дальнейшей историей этого вопроса мы отсылаем читателя к монографии Чепмена и Коулинга [20].

Проследив в основных чертах развитие теории до того момента, когда она была радикально пересмотрена Максвеллом и Больцманом, мы перейдем теперь к реакции других ученых на эту теорию. Хотя отождествление теплоты с молекулярным движением было достаточно широко принято после 1850 г., по вопросу о строении молекул и их взаимодействиях были значительные разногласия. Вихревая теория атома, разработанная Ранкиным [21] и Гельмгольцем [22], была весьма популярна в этот период. Томсон (лорд Кельвин) допускал, что математическое развитие свойств этих атомов может доказать, что гельмгольцевы кольца являются истинными атомами.

«Вероятно, изящные исследования Д. Бернулли, Герапата, Джоуля, Кренига, Клаузиуса и Максвелла относительно различных термодинамических свойств газов могут содержать все те положительные допущения, которые они были вынуждены сделать относительно сил взаимодействия между двумя атомами и кинетической энергии, приобретаемой отдельными атомами или молекулами, которым удовлетворяют вихревые кольца, не требуя никаких дополнительных свойств от вещества, движения которого составляет их, кроме инерции и несжимаемости в занимаемом ими пространстве. Полное математическое исследование взаимодействия между двумя вихревыми кольцами данных величин и скоростей, проходящих одно через другое по любым двум линиям, направленным так, что они никогда не сближаются более, чем на большое кратное число диаметров каждого, есть вполне разрешимая математическая задача; а новизна приводящих обстоятельств представляет трудности возбуждающего характера. Решение этой задачи будет основой предположенной повой кинетической теории газа» [23].

Таким образом, точка зрения Томсона являлась не столько оппозиционной к кинетической теории, сколько желанием, чтобы эта теория была разработана с иной точки зрения. Максвелл также поддерживал вихревую теорию, потому что она казалась обнадеживающей в отношении вывода закона внутриатомных сил из основных принципов.

«Если будет построена теория такого рода после преодоления огромных математических трудностей в этом вопросе, теория, которая будет представлять в какой-то степени действительные свойства молекул, то она будет занимать совершенно иное научное положение, чем те теории молекулярного действия, которые построены на том, что молекула наделяется произвольной системой центральных сил, придуманных исключительно для того, чтобы учесть наблюдаемые явления.

В вихревой теории нет ничего произвольного: ни центральных сил, ни таинственных свойств какого-либо другого рода. Мы не имеем ничего, кроме материи и движения, и вихрь, однажды приведенный в движение, обладает теми свойствами, которые были определены начальным импульсом, и никакие дополнительные предположения здесь невозможны.

Даже при современном неразработанном состоянии теории утверждение индивидуальности и неразрушимости кольцевого вихря в идеальной жидкости должно разрушить общепринятое мнение, что молекула должна представлять очень жесткое тело для сохранения постоянства» [24].

Затем Максвелл рассматривает спектроскопическое доказательство того, что молекула может быть приведена в состояние внутреннего колебания и предсказывает:

«Тогда, если мы желаем получить эталоны длины, времени и массы, которые бы были абсолютно неизменными, мы должны искать их не в размерах или в движении или в массе нашей планеты, но в длине волн и периоде колебаний и в абсолютной массе неуничтожаемых и неизменных, идеально подобных молекул» [25].

Вихревой атом пользовался значительной популярностью в течение многих лет, как способ визуализации атома, но математические исследования, предложенные Томсоном, никогда не были осуществлены. С другой стороны, надежды Томсона и Максвелла на вывод внутриатомных

сил из более фундаментальной гипотезы относительно строения атомов были осуществлены в современной теории квантов.

Другая теория строения атомов была описана Цейнером:

«Наиболее широко распространен тот взгляд на строение тел, который рассматривает тело, как составленное из неизменных частиц, «атомов», расстояния которых друг от друга относительно велики... Эти атомы притягивают друг друга... Относительно большие промежутки между молекулами заполнены эфиром... Эфир окружает молекулы и атомы в виде атмосферы. Эти атмосферы, плотность которых уменьшается изнутри наружу, составляют вместе с ядром атома индивидуальное целое. Атом со своей оболочкой из эфира Редтенбахер называет «динамитом»... Только в одном пункте эти взгляды расходятся, а именно в вопросе о том, является ли причиной так называемого теплового движения движение атомов, т. е. материальных частиц тела, или движение эфирных частиц собранных в теле... Редтенбахер считал, что тепловое движение состоит из радиального движения эфирных оболочек, окружающих атомы или молекулы тела. Эти оболочки расширяются и сжимаются... Клаузиус защищал другую точку зрения, с далеко идущими следствиями...» [26].

Цейнер также указывал на то, что ученые, которые пишут по теории света, обычно начинают со сложных гипотез, между тем как те, которые пишут труды о теплоте, «редко начинают с предположения о специфическом роде теплового движения... Вообще в математических разработках избегали определенных предположений относительно природы движения, которое мы называем теплотой» [27].

Тиндаль в лекции от 1862 г. указывал, что «...идея относительно газовых частичек, которая в настоящее время с успехом поддерживается, это — идея, что частицы летят по прямым линиям сквозь пространство» [28].

В сноске он ссылается на Джоуля, Кренига, Максвелла и Клаузиуса. Он рассматривает диффузию какого-либо благовония в комнате с точки зрения кинетической теории и производит эксперимент для иллюстрации поведения газов.

Но в 1863 г. в другой статье он, по-видимому, игнорирует кинетическую теорию: «...среда, таким образом, охва-

тывает наши атомы; внутри нашей атмосферы находится вторая, более тонкая атмосфера, в которой атомы кислорода и азота как бы подвешены в виде зерен... Мы не только должны представлять себе наши атомы, подвешенными в этой среде, но должны представлять себе их совершающими колебания в этой среде. В этом движении атомов и состоит то, что мы называем их теплотой. ...Мы должны представлять себе, что это движение сообщается среде, в которой атомы совершают колебания» [29].

Беркс в 1862 г. опубликовал книгу «О материи и эфире или тайна законов физического изменения». Рецензент «Philosophical Magazine» цитирует из этой книги следующий абзац:

«Теплота представляет собой просто атомную или молекулярную живую силу. Ощущаемая теплота зависит от колебаний твердых атомов, переносимых через отталкивания составляющего их или прилежащего эфира к соседним атомам... Теплота жидкости состоит из живой силы каждого атома при вращении его вокруг собственной оси с наибольшим моментом, причем полярность соседних атомов ослабляется или нарушается. Теплота парообразования состоит из живой силы, расходуемой или поглощаемой на отталкивание химических атомов на большее среднее расстояние за пределы максимальной силы сцепления».

Несмотря на подобие кинетической теории и других атомных теорий, которые были рассмотрены на страницах «Philosophical Magazine» прежде, рецензент говорит:

«Конечно, все эти многочисленные утверждения могут рассматриваться только как выражение личных представлений, соответствие которых физическим реальностям не доказано ни непосредственными объяснениями явлений, ни объяснениями, полученными путем математических рассуждений» [30].

Но в 1863 г. еще два ученых поддержали кинетическую теорию. В Англии Томас Грехэм, указывая, как кинетическая теория объяснила его эксперименты по диффузии, писал:

«В соответствии с общепринятой теперь физической гипотезой газ состоит из твердых и идеально упругих сферических частичек или атомов, которые движутся во всех направлениях и наделены различными степенями скорости в различных газах» [31].

В Германии Стефан применил кинетическую теорию к вычислению скорости звука, решив, что как теплота, так и звук, передаются в газе с одинаковой скоростью, но что количество тепла, переносимое путем теплопроводности, относительно мало потому, что, как он думал, в каждом соударении скорости молекул усредняются. Таким образом, только половина разности температур переносится от одного слоя следующему [32].

Кинетическая теория также рано получила признание в Америке; так, в 1861 г. Ньюком докладывал на собраниях Американской академии искусств и наук в Бостоне:

«Одна из наиболее изящных гипотез, когда-либо предложенных в физике, это гипотеза, которая позже была известна под названием «динамической теории газов» [33].

Он ссылается на статьи Максвелла и упоминает о разногласиях по вопросу об удельных теплотах, заключая:

«Учитывая количество и разнообразие явлений в газах, которые объясняются этой теорией, и, в частности, точность, с которой она объясняет необъяснимые до сих пор явления диффузии, можно считать, что эта теория имеет значительную вероятность в ее пользу. Небольшие разногласия между наблюдаемым и рассчитанным отношением удельных теплот (1,42 и 1,33), возможно, объясняются некоторым свойством частиц, не принятым во внимание в математическом анализе» [34].

Другой американец, Леконт, рассматривал различные теории скорости звука в статье, написанной в 1861 г. и опубликованной в «Philosophical Magazine» в 1864 г. Он ссылался на формулу Гершпата для скорости звука, которая, «по-видимому, являлась выводом из замысловатых спекуляций по молекулярной физике, основу которых составляют атомные соображения». Он также говорил, «что тот факт, что развитие динамической теории теплоты пролило столько света на теорию распространения звуковых волн в атмосфере, служит, наряду со многими другими, иллюстрацией связи между отдельными разделами физической науки» [35].

Поттер, отвечая на эту статью, не соглашался с такой оценкой динамической теории:

«Что касается взаимной поддержки, которую оказывают друг другу теория звука и механическая теория теплоты, как утверждает доктор Леконт, то чем меньше будет об этом сказано, тем лучше» [36].

Леконт и Поттер не сумели принять во внимание кинетическую теорию Клаузиуса и Максвелла.

Густав Фехнер также игнорировал кинетическую теорию. Он писал: «Со времени появления предыдущего издания настоящего труда (1855) положение физической атомистики не изменилось существенно, она только развивалась дальше и дальше и тем самым все крепче укоренялась — подобно дереву, которое по мере того, как оно выпускает больше ветвей, крепче укореняется» [37].

В 1864 г. Кролль критиковал теорию излучения Тиндаля, основанную на «движениях» атома попереk центров равновесия, внешних по отношению к нему. Он утверждал, что «... атом сам по себе по *существованию* упруг. В самом деле, если тепловые колебания не состоят из движений атома, тогда теплота должна состоять из попеременных расширений и сжатий самого атома. Это, в свою очередь, противоречит обычному представлению о том, что атом по *существованию* тверд и непроницаем. Но это благоприятствует современному представлению о том, что материя состоит из силы сопротивления, действующей из некоторого центра» [38].

Нортон, американец, предлагает подобную же теорию атома, в котором теплота зависит от молекулярного притяжения и отталкивания [39]. Ни Кролль, ни Нортон не ссылаются на кинетическую теорию, хотя Кролль в позднейшей статье разработал свои взгляды на атом:

«Общее понятие материи, однако, начинает отрицаться многими ведущими физиками и химиками, а именно то, что материя состоит из атомов, по *существованию* твердых, неделимых и непроницаемых и бесконечно жестких. Излишне, пожалуй, говорить, что это представление полностью гипотетично... Все, что следует по необходимости подразумевать в материи, поскольку это касается свойства, которое называется жесткостью или твердостью, это — то, что это свойство либо является *силой* сопротивления в пространстве, либо *веществом*, которое проявляет сопротивление, как свойство... Наиболее философским способом выражения будет — утверждать вместе с Фарадеем («Phil. Mag.», февраль 1844 и май 1846 г.), что атом есть просто центр силы...» [40].

Следующей из многих атомных теорий была теория Чаллиса, которая основывалась на гидродинамических исследованиях. Чаллис говорит о своей теории:

«Я предполагаю, что упругая жидкость состоит из инертных сферических атомов постоянной величины, каждый из которых, благодаря отражению эфирных колебаний от его поверхности, становится центром отталкивательной силы, причем колебания по необходимости таковы, что их динамическое действие удерживает атомы на расстоянии друг от друга» [41].

В другой статье в 1865 г. он рассматривает математически возможность того, что колебательные движения эфира создают «перманентные трансляционные движения атомов» и намекает на то, что силы теплоты, агрегации и гравитации объясняются этим явлением [42]. Однако он нигде не ссылается на кинетическую теорию.

Но в 1865 г. Гирдельстон писал:

«То, что газы суть тела, частицы которых движутся по прямым линиям, теперь является не гипотезой, а фактом, основанным на физических доказательствах, полученных из явлений диффузии, теплоты и т. д. [43].

Бальфур Стюарт в своем учебнике теплоты (1866) также считал, что эта теория была установлена, и ссылался на эксперименты Максвелла по вязкости [44].

В 1867 г. Науман использовал кинетическую теорию для оценки размеров и скоростей молекул [45] и рассуждал о состоянии теории.

«Непрерывное развитие механической теории теплоты дало постоянно усиливающееся основание для поддержки точки зрения Клаузиуса, что тепловое содержание идеального газа... представляется движением молекул и движением атомов, составляющих молекулы. В частности, принцип Клаузиуса, согласно которому живая сила этого движения молекул для всех газов пропорциональна абсолютной температуре... получил изящное экспериментальное подтверждение в новейших исследованиях О. Э. Мейера по внутреннему трению в газах...» [46].

Науман также ссылался в качестве доказательства в пользу кинетической теории на «новейшие микроскопические наблюдения (Fick, «Die Naturkräfte in ihrer Wechselbeziehung») того, что мельчайшие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в воздухе, обладают вибрационным движением...» [47].

Артур Рансом в 1867 г. указывал на то, что теории молекулярного строения тел основывались на форме и

размерах составляющих их частиц (Дальтон), на наличии у них одной или более полярных осей (Гирдельстон) и на их колебаниях в различных орбитах. Явления теплоты, света, электричества и т. д. использовались как указание на обладание материальными частицами невесомых атмосфер с различными свойствами (Нортон, цит. соч. и электромагнитная теория Максвелла). Но Рансом не признавал ни одной из этих теорий; он полагался на молекулярные силы, которые представляли собой обратную функцию расстояния в какой-то большой степени [48].

В 1868 г. Стоней писал:

«Динамическая теория молекулярного строения газов, которая, если я не ошибаюсь, должна быть поставлена в один ряд как по значению, так и по вероятности с волновой теорией света, по-видимому, еще не встречает того всеобщего внимания и признания, которых она, кажется, заслуживает» [49].

А. Казин указывал на то, что калорическая теория теперь оставлена, но он колебался в признании кинетической теории, потому что эта теория настолько спекулятивна, что единственный противоречащий ей эксперимент может ее опровергнуть [50]. Но Казин теперь был в меньшинстве, так как большинство ученых к 1870 г., по-видимому, признавали кинетическую теорию (по крайней мере, молчаливо). Позднейшие нападки на эту теорию исходили не от приверженцев тепловой теории, а от тех, которые, подобно Маху и Оствальду, отказывались вообще верить в существование атомов, или от тех, которые, подобно лорду Кельвину, Лопшмидту и Цермело, выдвигали математические возражения против утверждения о том, что атомные соударения должны приводить к перманентному состоянию равновесия. Эти возражения привели к дальнейшим уточнениям теории, какими были открытие квантовой природы материи и энергии; но гипотеза о том, что давление газа в основном объясняется атомным движением, выстояла. В качестве заключительного примера цитируем выдержку из статьи Пелля:

«Динамическая теория газов, обязанная главным образом трудам Клаузиуса и Максвелла, помогает нам в некоторой степени. Эту теорию можно считать установленной и являющейся важнейшим добавлением к нашему познанию законов неорганической материи, которое было сделано нашим поколением» [51].

Примечания

1. См. «Oxford English Dictionary».
2. S. G. Brush. «Annals of Science», 1957, **13**, 177, 273.
3. Например, Jochmann «Zts. f. Math. u. Phys.», 1860, **5**, 128.
4. Ornstein v. Wyk. «Zts. Phys.», 1932, **78**, 734; Estermann, Simpson and Stern. «Phys. Rev.» 1947, **71**, 238; Kofsky and Levinstein. «Phys. Rev.», 1948, **74**, 500.
5. Maxwell. «Phil. Mag» (4th ser.), 1860, **19**, 19; «The Scientific Papers of James Clerk Maxwell», N. Y., 1952, т. **1**, стр. 377.
6. Maxwell. «Phil. Mag.» 1860, **19**, 21; Papers, I, 379.
7. Maxwell. «Phil. Trans.», 1867, **157**, 62; «Phil. Mag.», 1868, **35**, 185; Papers, II, стр. 43.
8. Maxwell. «Phil. Mag.» 1860, **19**, 22—23; Papers, I, 380—381.
9. Maxwell. «Nature», 1873, **8**, 537; Papers, II, стр. 351.
10. Maxwell. «Nature», 1873, **8**, 537; Papers, II, стр. 353.
11. Maxwell. «Nature», 1873, **8**, 537; Papers, II, стр. 354.
12. Boltzmann. «Sitzber. K. Akad. Wiss.», Vienna, 1875, **72**, 427.
13. Maxwell. «Phil. Mag.», 1860, **19**, 31; Papers, I, стр. 390—391.
14. Maxwell. «Phil. Trans.», 1866, **156**, 256; Papers, II, стр. 10.
15. Meyer. «Pogg. Annal.», 1861, **113**, 55, 193, 383. См. также: «Die Kinetische Theorie der Gase», Breslau, 1877.
16. Maxwell. «Phil. Trans.», 1866, **156**, 256, 265, 266; Papers, II, стр. 10, 21, 23.
17. Maxwell. «Phil. Trans.», 1867, **157**, 49; «Phil. Mag.», 1866, **32**, 393; 1868, **35**, 129, 185; Papers, II, стр. 26.
18. Maxwell. «Phil. Trans.», 1867, **157**, 62; «Phil. Mag.», 1868, **35**, 145; Papers, II, стр. 42.
19. Maxwell. «Phil. Trans.», 1867, **157**, 83; «Phil. Mag.», 1868, **35**, 211; Papers, II, стр. 70.
20. Chapman and Cowling. The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases. Cambridge, 1952.
21. Rankine. «Proc. Roy. Soc. Edin.», 1850, **2**, 275; «Phil. Mag.», 1864, **27**, 313; 1865, **30**, 241; 1870, **39**, 211.
22. Helmholtz. «J. f. reine u. ang. Math.», 1858, **55**, 25; «Phil. Mag.», 1867, **33**, 485.
23. Thomson. «Phil. Mag.», 1867, **34**, 15.
24. Maxwell. Address to the Mathematics and Physics section of the British Association. Liverpool, 1870; Papers, II, стр. 223.
25. Maxwell. Papers, II, 224.
26. Из введения ко второму изданию книги: Zeuner. Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie, Leipzig, 1866; цитировано на стр. 6—7 английского перевода «Technical Thermodynamics», L.; цитированные труды Редтенбахера: «Dynamidensystem» и «Grundzüge einer mechanischen Physik», Mannheim, 1857.
27. Zeuner. Technische Thermodynamik, стр. 9.
28. Tyndall. Heat Considered as a Mode of Motion. L., 1863, стр. 76.
29. Tyndall. «Phil. Mag.», 1863, **25**, 200.
30. «Phil. Mag.», 1863, **25**, 304. Цитированный абзац находится на стр. 109 книги Биркса.
31. «Graham. Phil. Mag.», 1863, **26**, 409.
32. «Stefan. Pogg. Ann.», 1863, **119**, 492; «Phil. Mag.», 1864, **27**, 75.
33. Newcomb. «Proc. Amer. Acad.», 1862, **5**, 112.

34. Там же, 113.
35. Le Conte. «Phil. Mag.», 1864, 27, 1.
36. Potter. «Phil. Mag.», 1864, 27, 107.
37. F e c h n e r. Введение ко второму изданию книги «Ueber die physikalische und philosophische Atomlehre», Lpz., 1864.
38. Croll. «Phil. Mag.», 1864, 27, 346; «Sillmann's J.», 1864, 38, 267.
39. Norton. «Sillmann's J.», 1864, 38, 61; «Phil. Mag.», 1865, 30, 95.
40. Croll. «Phil. Mag.», 1867, 34, 449.
41. Challis. «Phil. Mag.», 1864, 27, 92.
42. Challis. «Phil. Mag.», 1865, 30, 207.
43. Girdolstone. «Phil. Mag.», 1865, 29, 108.
44. Stewart. An Elementary Treatise on Heat. Oxford. 1866, стр. 367.
45. Naumann. «Ann. der Chemie und Pharm.», 1867, 142, 284; «Phil. Mag.», 1867, 34, 373; Naumann. «Liebig's Ann.», 1867, 5, 253; «Phil. Mag.», 1867, 34, 551.
46. Naumann. «Ann. der Chemie und Pharm.», 1867, 142, 265; «Phil. Mag.», 1867, 34, 205.
47. Naumann. «Ber. der deutsch. chem. Ges.», 1869, 2, 690; «Phil. Mag.», 1870, 39, 217.
48. Ransome. «Phil. Mag.», 1867, 33, 360.
49. Stoney. «Phil. Mag.», 1868, 36, 132.
50. Cazin. The Phenomena and Laws of Heat. L., 1868, стр. 29.
51. Pell. «Trans. Roy. Soc. New South Wales», 1871, 5, 27; «Phil. Mag.», 1872, 43, 161.

Максвелл, ток смещения и симметрия *

А. М. Борк

В физике XX столетия соображения математической симметрии и красоты стали играть существенную роль как в создании новых физических теорий, так и в изящном сочетании симметрии с законами сохранения. Иногда приписывают Джемсу Клерку Максвеллу то, что он одним из первых использовал такие соображения при развитии новой теории. Норман Кемпбелл ¹ говорит: «Предположим, вы нашли страницу со следующими знаками на ней — не важно, что они что-нибудь означают (уравнения Максвелла без токов смещения — в левой части и с токами смещения — в правой части). Я думаю, вы увидите, что совокупность символов в правой части «красивее» в некотором смысле, чем символы в левой части: они более симметричны. Оказывается, великий физик Джемс Клерк Максвелл около 1870 г. думал то же самое и, подставив символы правой части вместо символов левой части, основал современную физику и, среди прочих результатов, сделал возможным беспроволочный телеграф». Подобные же утверждения встречаются также и в более новых источниках ².

В аудитории мы привыкли подчеркивать симметрию уравнений Максвелла; мы можем даже позволить аудитории «открыть» ток смещения так, как, по мнению Кемп-

* Из журнала «American Journal of Physics», 1963, № 11, стр. 854—859.

белла, открыл его Максвелл. Но отражает ли этот педагогический полезный прием действительно историческое рассуждение, обосновавшее введение этого понятия? Хотя множество исторически точных событий и множество педагогически полезного материала, конечно, имеют не пустые пересекающиеся части, все же это не тождественные множества. В настоящее время физики и историки науки с горечью убедились в той легкости, с которой расцветают исторические легенды в науках. Наша цель здесь попытаться определить исторические события, лежащие в основе введения Максвеллом тока смещения. Сначала мы посмотрим, что мог Максвелл сказать относительно тока смещения, затем исследуем некоторые вторичные источники и, наконец, попытаемся сделать некоторые выводы.

Три главные статьи

Труды Максвелла по теории электромагнитного поля опубликованы в основном в трех главных статьях: I — «О линиях сил Фарадея» (1855—1856), II — «О физических линиях сил» (1861—1862) и III — «Динамическая теория электромагнитного поля» (1864). Эти статьи обнаруживают постепенное развитие мыслей Максвелла. Эта линия развития была рассмотрена Уиттекером³ и Джиллспай⁴, так что здесь достаточно будет только краткого резюме. Как показывает название, первая статья основана на труде Фарадея, в частности представляет его математическое обобщение. Вторая статья использует разработанную механическую модель вращающихся ячеек и содержит все существенные математические результаты в 20 уравнениях относительно 20 неизвестных. Третья статья окончательная — модель уже оставлена, уравнения собраны вместе (в части 3) и введен термин «электромагнитное поле».

Но мы хотим определить, что говорит каждая из этих статей о члене, содержащем ток смещения⁵. В I ток смещения не появляется. Уравнения с $\text{curl } H$ встречаются только с членом, выражающим ток проводимости в правой части этих трех уравнений (следует отметить, что это название употреблено здесь только ради удобства, Максвелл не пользуется этим обозначением в I, II или III). Непосредственно вслед за этими уравнениями он говорит: «Мы

можем отметить, что вышеуказанные уравнения по дифференцированию дают

$$da_z/dx + db_z/dy + dc_z/dz = 0,$$

что представляет собой уравнение непрерывности для замкнутых токов. Таким образом, наши исследования в настоящее время ограничиваются замкнутыми токами; и мы мало знаем относительно магнитных действий каких-либо не замкнутых токов»⁶. На этом он оставляет эту тему и переходит к другим вещам.

Ток смещения появляется в первый раз в II⁷. Максвелл указывает на смещение электричества в каждой молекуле вследствие электрического поля, наложенного на диэлектрик и измеряемого электрическим смещением. «Эффект этого действия на всю массу диэлектрика заключается в общем смещении электричества в определенном направлении. Это смещение не достигает степени тока, потому что, когда оно достигает известного значения, оно остается постоянным; но это — начало тока, и его изменения составляют токи в положительном или отрицательном направлении — в зависимости от того, увеличивается ли смещение или уменьшается». Несколькими страницами ниже он пользуется этим заключением в Предложении XIV, «чтобы внести поправку в уравнения электрических токов (9) на влияние упругости среды... изменение смещения эквивалентно току, причем этот ток должен быть учтен в уравнениях (9) и добавлен к [току проводимости]...» Затем он устанавливает уравнение непрерывности с членом, представляющим собой производную по времени.

Как уже сказано, III во многом является более отделанным и изящным вариантом II. Среди двадцати уравнений электромагнитного поля находятся такие, которые образуют «истинные» токи путем сложения токов смещения и токов проводимости. «Электрическое смещение состоит в противоположной электризации сторон молекулы или частицы тела, что может сопровождаться или не сопровождаться передачей сквозь тело... Изменения электрического смещения должны быть добавлены к токам P , q и r для того, чтобы получить полное движение электричества...»⁸ Уравнение непрерывности является также одним из двадцати уравнений, не выводимым здесь из

других. Стоит отметить, что в III уравнении с $\text{curl } H$ не появляются явно с производной по времени от смещения в этих уравнениях, потому что уравнения для истинных токов устанавливаются в качестве отдельных уравнений. Это противоречит II.

«Трактат по электричеству и магнетизму»

«Трактат» появлялся в трех изданиях — в 1873, 1881 и 1892 гг. В отношении тока смещения все издания почти тождественны. Максвелл пересмотрел только первую часть второго издания. В общем «Трактат» похож по тону на III; основные уравнения собраны вместе во втором томе почти так же, как в III. В первом томе Максвелл уже намекает на этот ток при рассмотрении электрического смещения⁹. «Когда в диэлектрике имеет место индукция, то имеет также место некоторое явление, эквивалентное смещению электричества в направлении этой индукции... Любое увеличение этого смещения эквивалентно, в продолжении времени увеличения, току положительного электричества изнутри наружу, и всякое уменьшение смещения эквивалентно току в противоположном направлении». Уиттекер¹⁰, по-видимому, просмотрел этот абзац.

Во втором томе появляется один новый элемент: Максвелл явно утверждает, что ток смещения — это новый вклад¹¹. «Одной из главных особенностей «Трактата» является положение, которое он утверждает, а именно, что истинный электрический ток C — тот, от которого зависят электромагнитные явления, — не то же самое, что R — ток проводимости, но что производная по времени от D — электрическое смещение — должно быть принято во внимание при оценке полного движения электричества, так что мы должны писать $C = R + \dot{D}$ (Уравнение Истинных Токов)...» Непосредственно перед этим¹² он выписывает уравнение для $\text{curl } H$ с током в нем; он указывает, что это предполагает нулевую дивергенцию для тока и, таким образом, замкнутые цепи. «Это уравнение истинно только, если мы примем u , v и w в качестве компонентов того электрического тока, который создается изменением электрического смещения так же, как истинной проводимостью». Он продолжает: «Мы имеем очень мало экспериментальных доказательств, относящихся к непосредствен-

ному электромагнитному действию токов, вызванному изменением электрического смещения в диэлектриках, но исключительная трудность согласования законов электромагнетизма с существованием незамкнутых — электрических токов — одна из причин среди многих, почему мы должны допустить существование переходных токов, создаваемых изменением смещения. Важность их будет ясна, когда мы перейдем к электромагнитной теории света».

Другие статьи и письма Максвелла

Во второй части краткой статьи «Метод для прямого сравнения между электростатической и электромагнитной силой; с заметкой об электромагнитной теории света» Максвелл пересматривает электромагнитную теорию света с тем, чтобы отличить свой подход от подходов Римана, Вебера и Лоренца¹³. После формулирования трех теорем он говорит: «Если диэлектрик подвергается действию электродвижущей силы, то он испытывает то, что мы можем называть электрической поляризацией. Если направление электродвижущей силы мы назовем положительным и если мы предположим, что диэлектрик ограничен двумя проводниками, A — с отрицательной и B — с положительной стороны, то поверхность проводника A электризуется положительно, а поверхность B — отрицательно...» Тогда «(теорема D) — если электрическое смещение увеличивается или уменьшается, то эффект эквивалентен эффекту электрического тока в положительном или отрицательном направлении. Так, если в последнем случае мы соединим два указанных проводника проволокой, то по проволоке будет проходить ток от A к B ... Согласно этой точке зрения, ток, создаваемый при разряде конденсатора, это полный ток, и он может быть прослежен внутри самого диэлектрика соответственно сконструированным гальванометром. Я не убежден, что это было сделано, так что эта часть теории хотя она и является естественным следствием первой, не была проверена прямым экспериментом. Такой эксперимент, конечно, был бы очень деликатным и трудным». Вслед за тем Максвелл из этих допущений выводит плоские электромагнитные волны не выписывая уравнений поля в общей форме.

Мы должны напомнить и о другой работе: «Обращение

к математической и физической секциям Британской ассоциации», представленной 15 сентября 1870 г. Здесь, наконец, мы обнаруживаем, что Максвелл затрагивает вопросы математической симметрии. Вследствие важности этого для настоящего исследования и вследствие общего интереса к этой теме мы цитируем часть этого обращения¹⁴ полностью.

«Учащийся, который хочет овладеть какой-нибудь наукой, должен подробно ознакомиться с различного рода величинами, относящимися к этой науке. Когда он понимает все соотношения, существующие между этими величинами, он рассматривает их, как образующие связную систему и классифицирует всю систему величин вместе, как принадлежащую данной специальной науке. Эта классификация является наиболее естественной с физической точки зрения, и по времени она обычно является первой.

Но когда учащийся ознакомился с несколькими различными науками, он находит, что математические процессы и линии рассуждения в одной науке напоминают эти процессы и рассуждения в другой настолько сильно, что его знание одной науки может оказать весьма полезную помощь при изучении другой.

Когда он исследует причины этого, то он находит, что в обеих науках он имел дело с системами величин, в которых математические формы соотношений величин оказываются одинаковыми в обеих системах, хотя физическая природа величин может быть очень различна.

Таким образом, он приходит к признанию классификации величин на новом принципе, согласно которому физическая природа величины подчинена ее математической форме. Это — та точка зрения, которая характерна для математика: но она является вторичной по времени для физического аспекта, потому что для освоения различного рода величин человеческий мозг сначала должен иметь их представленными в природе».

Но здесь нет явной ссылки на ток смещения, и Максвелл только цитирует примеры из других работ. Примеры, которые приходят на ум из чтения предыдущего утверждения, суть: 1) аналогия между теплопроводностью и статическим электричеством, указанная В. Томсоном, и 2) общая аналогия между гидродинамикой и электромагнитным полем, упомянутая Максвеллом в начале I.

По-видимому, нет систематического собрания писем Максвелла. Некоторые письма приводятся в биографии Кемпбелла и Гарнета¹⁵. Важные письма к В. Томсону были напечатаны в отдельном томе¹⁶. Часто цитируемое письмо к Томсону описывает статью 1861 г., но не упоминает по названию ток смещения. В нем сказано: «Таким образом, будет иметь место смещение частиц, пропорциональное электродвижущей силе, и когда эта сила будет устранена, частицы восстановят свое положение». Опубликованные письма к Г. Стоксу¹⁷ и П. Тэту¹⁸ ничего не добавляют к описанию тока смещения. Наконец, и стихи¹⁹ Максвелла тоже не содержат никаких ссылок.

Вторичные источники

Труд Максвелла по электромагнитной теории, так же как и труд Ньютона по механике, не был сразу признан даже в Англии. Три главные статьи, по-видимому, обратили на себя мало внимания, и только после «Трактата» теория нашла сторонников. Большинство близких друзей Максвелла не смогли оценить ее. В. Томсон на протяжении всей жизни сохранял отрицательное отношение к теории, особенно к токам смещения. Известный физик П. Тэт, написал как рецензию (без подписи) на «Трактат», так и статью, уже после смерти Максвелла, с оценкой всех его работ^{20, 21}. Статья написана в весьма одобрительном тоне, в ней Максвелл сравнивается с Ньютоном. Но, перечисляя девять пунктов, особенно заслуживающих внимания (включая и упоминание о кватернионах!), Тэт опускает упоминание о токе смещения. Этот пропуск вместе с такой оценкой заставляет думать, что Тэт не понял новую теорию полностью. Рецензии в «Quarterley Journal of Science» и «American Journal of Science and Arts» также не упоминают о токе смещения. Как и следовало ожидать, английские ученые, которые приняли теорию Максвелла, находились под сильным влиянием его трактовки. Уотсон и Барбери²² приводят те же самые аргументы относительно поляризации диэлектрической среды, какие мы видели в оригинальном тексте.

Насколько известно пишущему эти строки, Оливер Хевисайд был первым физиком, явно отметившим симметрию уравнений Максвелла. В прекрасном предисловии к «Электромагнитной теории»²³ он упоминает о своем изложении

«электромагнитной теории с точки зрения Фарадея — Максвелла с некоторыми незначительными изменениями и обобщениями уравнений Максвелла». Он предлагает три изменения: во-первых, он пользуется рационализированными единицами; во-вторых, он пользуется векторным обозначением, похожим на современное обозначение, с символами curl и div и жирным шрифтом, и, в-третьих, он обращается к двойной форме, которая была введена им в 1885 г., «причем электрическая и магнитная стороны электромагнетизма симметрично представлены и связаны...». Ясно, что он рассматривает «двойную форму» как существенное нововведение, не имеющееся в статьях и книгах Максвелла. Как в своей более ранней статье «Электромагнитная индукция и ее распространение»²⁴, так и в «Электромагнитной теории» он пользуется этой симметрией. Например, в первой статье он пишет два вихревых уравнения одно за другим, замечая: «Мы должны заменить магнитную силу на электрическую силу, взятую отрицательно, а электрический ток на магнитный ток», причем ток применяется в максвелловском смысле, включая члены, производные по времени. Предполагается²⁵, что ток смещения делает такую форму возможной: «Электрический ток в непроводнике был той самой вещью, которая была необходима для координации электростатики и электрокинетики и для того, чтобы последовательно согласовать уравнения электромагнетизма». Хевисайд даже пользуется этой симметрией для обобщения уравнений Максвелла: он явно вводит член с магнитным током проводимости, чтобы уравновесить член с электрической проводимостью и таким образом сделать уравнения полностью симметричными, за исключением знаков, несмотря на признание, что «вероятно, не существует такой вещи, как магнитный ток проводимости с диссипацией энергии»²⁶. Такое добавление, хотя оно и никогда не получало общего признания, было сделано физиками текущего столетия по различным соображениям. В другом месте²⁷ мы увидим, что он рассматривает эту симметрию как вспомогательное средство при расчетах, основанных на уравнениях Максвелла; «этот метод трактовки электромагнитной схемы Максвелла, употребляемый в тексте (впервые введенный в статье «Электромагнитная индукция и ее распространение» в «The Electrician» от 3 января 1885 г. и позже) может, пожалуй, быть назван «дуплекс-методом», так как он характеризуется выявлени-

ем электрических, магнитных и электромагнитных соотношений в двойной форме, симметричной относительно электрической и магнитной сторон. Но это не просто метод выявления скрытых ранее соотношений путем введения вектор-потенциала и паразитных формул, а представляет собой также и рабочий метод».

Вебстер [28] ссылается скорее на Хевисайда, чем на Максвелла, когда он говорит: «Эти уравнения с $[\text{curl } \mathbf{B}]$ теперь полностью аналогичны уравнениям (5) с $[\text{curl } \mathbf{E}]$ за исключением только различия знака в левой части...» Джордж Френсис Фицджеральд, другой «последователь» Максвелла, в очень благоприятной рецензии²⁹ на «Electrical Papers» Хевисайда также упоминает об этом аспекте: «Дуализм электричества и магнетизма является старым и известным фактом. Закон обратных квадратов применим к обоим. Каждая задача в одном имеет соответственного двойника в другом. Хевисайд распространил это на весь электромагнетизм. Допущением возможности магнитной проводимости он сделал все уравнения симметричными. Каждый математик может оценить значение и изящество этого». Герц³⁰ не ссылается прямо на симметрическую сторону уравнений Максвелла, но он пишет уравнения современным способом (без векторного обозначения), а затем замечает: «Оливер Хевисайд работал в том же самом направлении, начиная с 1885 г. Из уравнений Максвелла он устраняет те же символы, что и я; и та простейшая форма, которую эти уравнения приобретают при этом, по существу та же самая, к которой и я прихожу».

Пожалуй, мы не отойдем слишком далеко в сторону, если отметим основное влияние Хевисайда на распространение идей Максвелла. По-видимому, он был первым исследовавшим следствия, которые вытекают в различных направлениях из этой теории. Мы уже отметили его интерес к основной формулировке теории. Он открыл соотношение энергии для электромагнитного поля независимо от Пойнтинга; он проводил обширные исследования по различным типам электромагнитных волн и изучал то излучение, которого следует ожидать от движущегося заряда, более тщательно, чем это делал Дж. Дж. Томсон; таким образом, ему обязано происхождением понятие электромагнитной массы, которое было позже развито Лоренцем и Абрагамом. Любое тщательное рассмотрение истории электромагнитной теории должно уделить значительное

внимание Хевисайду. Нужно согласиться с отзывом, сопровождавшим получение им почетной степени из Геттингена в 1905 г.: «...среди пропагандистов максвелловской науки он был скорее всего первым».

Дюгем³¹ ссылается на ток смещения в его неудачном сравнении английских и континентальных физиков. Он сожалеет, что Максвелл внезапно вводит это недостаточно подготовленное понятие, в противоположность тому, что можно было бы ожидать от французского или немецкого физика. Он утверждает: «Этот ток смещения был введен Максвеллом для того, чтобы дополнить определение свойств диэлектрика *ad hoc*... [он] имеет некоторые близкие аналогии с током проводимости...»

Возвращаясь к нашей исходной точке зрения, мы находим, что сам Кемпбелл непоследователен во взгляде на эту проблему. В противоречие с абзацем в его книге «Что такое наука», он говорит в книге «Элементы физики»³²: «Введение [тока смещения]... было вызвано теорией электростатического поля Фарадея...» В другом рассуждении о токе смещения³³ эстетические соображения не упоминаются.

Выводы

На основе только что представленных доказательств можно считать, по-видимому, обоснованными следующие выводы.

1) Максвелл последовательно приводит два родственных фактора, когда он применяет ток смещения. Во-первых, уравнения с $\text{curl } \mathbf{H}$ без такого члена будут подразумевать, что токи проводимости должны протекать только в замкнутых цепях,— неприемлемое положение, если иметь в виду ток проводимости. Мы замечаем этот вывод в I до того, как там появляется хоть какой-нибудь намек на дополнительный ток. Но «истинный ток» действительно течет только в замкнутых цепях. И уравнение непрерывности для тока сгруппировано с уравнениями поля в следующих двух статьях. Во-вторых, ток смещения есть физический ток в диэлектрической среде, он такой же «реальный», как и ток проводимости. «Уравнения истинных токов» это подчеркивают. Максвелл даже обсуждает трудности, связанные с попытками измерить этот ток.

Следует помнить, что вакуум в смысле электромагнитной теории есть понятие чуждое Максвеллу, так что диэлектрик включает и тот случай, который мы бы описали как пустое пространство. Как говорит Хевисайд, «эфир — диэлектрик». Аргумент об изменении смещений заряда (измеряемым электрическим смещением) в молекулах среды, рассматриваемом, как ток, встречается снова и снова в несколько измененной форме.

2) Нет прямого доказательства того, что Максвелл ввел член с током смещения для того, чтобы улучшить симметрию уравнений электромагнитного поля. Ни в трех его статьях, ни в «Трактате» нет утверждения, которое могло бы быть так истолковано; фактически встречаются только иные доводы для его введения (перечисленные в первом пункте выше). Наиболее близкий подход к вопросу о симметрии появляется в рассуждении о симметрии в «Обращении» через девять лет после первого введения тока смещения. Но, как отмечено, нужно читать действительно между строк, чтобы увидеть рассуждения, относящиеся к току смещения. Тот факт, что две группы из трех симметричных уравнений приводятся в III, как три группы уравнений (таким образом, как группы, лишённые свойств симметрии), свидетельствует против Кемпбелла; но II более благоприятно к нему в этом отношении.

Другое объяснение Кемпбелла сделанного изменения также должно быть обращено против него. Далее, можно отметить, что в книге «Что такое наука» он приписывает дату «около 1870 года». Это на десять лет позже, чем то время, когда Максвелл начал пользоваться током смещения; любопытно, однако, что эта дата соответствует «Обращению». Происхождение утверждения Кемпбелла, связанного с этим соображением, нужно рассматривать как спекулятивное. Более вероятно, что этот аргумент Кемпбелла является приукрашением двойной формы Хевисайда, хотя Хевисайд не применяет ее для оправдания существования тока смещения. Как мы видели, сам Хевисайд приписывает параллель между электричеством и магнетизмом самому себе, а Вебстер и Фицджеральд согласны с ним.

Этот отрицательный вывод, как всякий нулевой результат, нуждается в обычных оговорках. Во-первых, более тщательное знакомство с источниками, пока не известными, может вновь подвести базу под аргумент симметрии. Письма Максвелла и статьи его в Кавендишской лабора-

тории могут также кое-что добавить к этим соображениям. Во-вторых, если даже в идеальном случае, когда все возможные источники будут известны и изучены, не найдется поддержки этому предположению, его все же нельзя будет считать невозможным. Всегда имеется разрыв (даже у гениев, подобных Кеплеру) между человеком творящим и человеком пишущим, между процессом мышления, скрытым за открытием, и позднейшим описанием этого открытия в книгах и статьях. Это то, что делает изучение «научного метода», чем ученые фактически занимаются, столь трудным.

Примечания

- ¹ N. R. Campbell. What is science? L., 1921, стр. 155—156.
- ² E. Rogers. Physics for the Inquiring Mind. Princeton, New Jersey, 1960, стр. 471.
- ³ E. T. Whittaker. A history of the theories of Aether and Electricity. L., 1910.
- ⁴ C. C. Gillispie. The edge of Objectivity. Princeton, New Jersey, 1960.
- ⁵ Ради краткости, эти статьи обозначены римскими цифрами I, II и III. Указания страниц этих статей относятся к изданию «The Scientific Papers of James Clerk Maxwell». Cambridge, 1890, т.т. 1—2.
- ⁶ Цит. соч., стр. 194.
- ⁷ Цит. соч., стр. 491.
- ⁸ Цит. соч., стр. 554.
- ⁹ J. C. Maxwell. A treatise on electricity and magnetism. Oxford, v. I, 1-е изд. 1873, стр. 132; 2-е изд. 1881, стр. 154; 3-е изд. 1892, стр. 166. Во втором и в третьем изданиях применяется несколько иная терминология.
- ¹⁰ E. T. Whittaker, цит. соч., стр. 300.
- ¹¹ J. C. Maxwell (см. примеч. 9), II, 1-е изд., стр. 232; 2-е изд., стр. 234.
- ¹² Maxwell (см. примеч. 9), II, 1-е изд., стр. 231; 2-е изд. 233.
- ¹³ См. примеч. 5, II, стр. 139. Первоначально было опубликовано в «Phil. Trans. Royal. Soc.», L., 1868, 158.
- ¹⁴ См. примеч. 5, стр. 218.
- ¹⁵ L. Campbell and W. Garnett. The life of James Clark Maxwell. L., 1882.
- ¹⁶ [J. Larmor.] Origins of Clark Maxwell's electric ideas as described in Familiar Letters to William Thomson, ed. by J. Larmor. Cambridge, 1937.
- ¹⁷ [J. Larmor.] Memoir and Scientific Correspondence of the late Sir George Gabriel Stokes, ed. by J. Larmor. Cambridge, 1907, стр. 11.
- ¹⁸ C. G. Knott. Life and Scientific Work of Peter Guthrie Fair. Cambridge, 1911.
- ¹⁹ См. примеч. 15.

- ²⁰ P. G. Tait. Clerk Maxwell's Electricity and Magnetism. «Nature», 1873, 7, 478.
- ²¹ P. G. Tait. Clerk Maxwell's Scientific Work. «Nature». 1880, 21, 327.
- ²² H. W. Watson and S. H. Burbury. Mathematical Theory of Electricity and Magnetism. Oxford, 1885.
- ²³ O. Heaviside. Electromagnetic Theory. L., 1893, стр. 1.
- ²⁴ O. Heaviside. Electrical Papers. L., 1892, т. I. (Перепечатано из «Electrician» от 3 января 1885 г.).
- ²⁵ O. Heaviside (см. примеч. 23) стр. 67. (Перепечатано из «Electrician» от 29 мая 1891 г.).
- ²⁶ O. Heaviside (см. примеч. 24) стр. 441.
- ²⁷ O. Heaviside. On the Forces, Stresses and Fluxes of Energy in the Electro-magnetic Field. «Phil. Trans. Roy. Soc. Ind.», 1893, 183A, 423—480.
- ²⁸ A. G. Webster. The Theory of Electricity and Magnetism. L., 1897, стр. 507.
- ²⁹ G. F. Fitz-Gerald. Heaviside's Electrical Papers. «The Electrician», 1893, 11; опубликовано в кн.: J. Larmor. The Scientific Writings of the late George Francis Fitz-Gerald. Dublin, 1902, стр. 292—300.
- ³⁰ H. Hertz. Electric Waves. L., 1900, стр. 196. (Первоначально опубликовано в «Göttingen Nachr.», 19 марта 1890 г.).
- ³¹ P. Duhem. The Aim and Structure of Physical Theory. Princeton, New Jersey. 1954, гл. IV (Есть русский перевод).
- ³² N. R. Campbell. Physics. The Elements. Cambridge, 1919; перепечатано под названием «Foundations of Science», N. Y., 1957.
- ³³ N. R. Campbell. Modern Electrical Theory. Cambridge, 1913.

Цветная фотография Максвелла ¹

Р. М. Эване

Сто лет назад великий физик получил полноцветную фотографию. Как это было сделано, представлялось загадочным. Чудо удалось понять, повторив его эксперимент.

В 1861 г. великий английский физик Джеймс Клерк Максвелл ² продемонстрировал первую в мире трехцвет-

¹ В связи со 100-летием со дня первой демонстрации цветной фотографии 16—18 мая 1961 г. в Лондоне состоялась научная конференция, посвященная этой дате. Был зачитан ряд докладов по тем вопросам, изучением которых занимался Максвелл (по физиологии цветового зрения, по проблемам цветной печати, современной колориметрии, цветной фотографии), в том числе — доклад Р. М. Эванса «Цветная фотография Максвелла». Материалы этой конференции см. в «Journal of Photographic Science», т. 9, № 2, 4, 1961.

Осенью того же года состоялась III международная выставка фотографии, кино и оптики в Париже. Ее девизом было: «показать триумф цвета в фотографии». На ней впервые были продемонстрированы фотографии, снятые на цветной пленке, общая чувствительность которых сравнивалась с чувствительностью лучших черно-белых пленок. Выставка наглядно показала, каких больших успехов достигла цветная фотография за сто лет.

² К тому времени, когда состоялась эта лекция, Максвелл уже опубликовал пять работ, относящихся к учению о цветах. В них он рассматривал вопросы, связанные с физиологической теорией цвета, исследовал ощущения, вызываемые различными цветами, у людей с нормальным зрением и у слепых к цвету. Основное внимание он уделял количественным методам исследования всевозможных комбинаций цветов и различению смеси цветов.

Стоит указать еще, что за работы по смешению цветов и оптике Королевское общество в 1860 г. присудило ему премию Румфорда.

ную фотографию во время лекции в Королевском институте в Лондоне. Используя различные проекторы, он наложил три изображения, полученные при фотографировании цветной ленты отдельно через красный, зеленый и синий фильтры. Каждое изображение проектировалось в том свете, в каком снималось¹. Видимо, Максвелл использовал фотографию для демонстрации того, что полный спектр цветов может быть получен со светом именно трех цветов², а это подкрепляло трехкомпонентную теорию цветового зрения, выдвинутую Томасом Юнгом около 1800 г. Представляется также, что он хотел доказать, что для такой демонстрации подходят красный, синий и зеленый цвета, а не красный, синий и желтый (как считали некоторые исследователи). Максвелл предполагал, что изображения на его фотографиях представляли «красную, зеленую и синюю части [цветной ленты] отдельно, так, как их воспринимала бы, согласно Юнгу, каждая из трех систем нервов».

В том, что показывал Максвелл, одно вызывает удивление: у него ничего не должно было получиться. Вполне точно, что фотографические эмульсии, имевшиеся в распоряжении Максвелла в 1861 г., были чувствительны только к крайнему синему концу спектра и вообще не чувствительны к зеленой, желтой и красной частям спектра. Но тогда могли ли Максвелл получить «зеленое» и «красное» изображения раздельно (фактически черно-белые диапозитивы), чтобы вставить их в проекторы?

¹ В демонстрации Максвелла цвета трех изображений складывались, давая красочную картину объекта. На этом, аддитивном, принципе смешения цветов основаны теперь все системы цветного телевидения и многие методы визуальных цветовых измерений.

В современных цветной фотографии и кино используется субтрактивное смешение цветов — оно получается при последовательном прохождении света через ряд цветных светофильтров. Пленки для цветной фотографии и кино многослойные; они состоят из трех эмульсионных слоев, каждый из которых чувствителен соответственно к сине-фиолетовой, зелено-желтой и оранжево-красной частям спектра. Дополнительно в слои вводится цветообразующее вещество, присутствие которого необходимо для последующего образования красочного изображения.

² Мысль продемонстрировать трехкомпонентную теорию средствами фотографии возникла у Максвелла задолго до ее осуществления — в 1855 г. См.: Maxwell. Scientific Papers. P., т. I, стр. 126.

Несомненно, демонстрация Максвелла была достаточно успешной, чтобы убедить и произвести впечатление на аудиторию. Вывод самого Максвелла, поддержанный и другими, состоит в том, что «когда эти [разные проектируемые позитивы] налагались, то было видно цветное изображение, которое в том случае, когда красное и зеленое изображения получились так же хорошо, как синее, было действительно цветным изображением ленты». Таким образом, Максвелл признавал, что красное и зеленое изображения имели какой-то недостаток, но последующее поколение специалистов по фотографии оставалось в полном недоумении, как он мог вообще получить какие-либо красные и зеленые изображения. Недавно мои сотрудники и я в отделе технологии цветной фотографии фирмы Истмен Кодак повторили опыт Максвелла в соответствии с отчетами того времени и мы полагаем, что можем утверждать принципиальную невозможность получить такие изображения.

Фотографические детали опыта записаны не Максвеллом, а Томасом Саттоном, учителем и лектором по фотографии, к которому Максвелл обратился за технической помощью в подготовке лекции. Саттон был некоторое время редактором интересного издания — оно называлось «Заметки по фотографии», а позднее конструировал широкоугольные линзы, что для того времени было замечательно.

Объектом Саттона был «бант, повязанный из разноцветной ленты», который он поместил на фоне черного бархата и сфотографировал при ярком солнечном свете. Фотографическая эмульсия, использованная Саттоном, представляла собой влажный коллодий со светочувствительным материалом — иодистым серебром. Иодистое серебро чувствительно только к излучению с длинами волн короче 430 $m\mu$. А эта длина волны приходится на крайнюю синюю область видимого спектра. Обычно глаз чувствителен к излучению от 400 до 700 $m\mu$. Цвет (правильнее — окраску) мы определяем как зеленый приблизительно между 480 и 560 $m\mu$, как желтый — между 560 и 590 $m\mu$, как оранжевый — от 590 до 630, и как красный — свыше 630 $m\mu$. Ко всем этим длинам волн иодистое серебро нечувствительно.

В качестве красного, зеленого и синего фильтров Саттон использовал стеклянные кюветы с окрашенными растворами металлических солей; для желтого фильтра он

взял кусок «стекла лимонного цвета». Мы не можем точно подобрать желтое стекло, но это и не так существенно для опыта. Вот описание самого Саттона фильтров и экспозиций:

«Первое. Вначале непосредственно перед линзой помещалась ванночка из зеркального стекла, содержащая аммиачный раствор сульфата меди. Эту соль химики используют для получения того синего раствора, который в бутылках выставляют между оконными рамами. При экспозиции 6 секунд был получен отличный негатив. Эта экспозиция примерно в два раза превышала ту, которая требовалась при отсутствии окрашенного раствора.

Второе. В подобной ванночке содержался зеленый раствор хлорида меди. Негатив не был получен и при экспозиции 12 минут, хотя изображение было хорошо видно на матовом стекле. Поэтому сочли целесообразным значительно разбавить раствор; таким образом, сделали зеленую окраску воды намного слабее и в конце концов получили удовлетворительный негатив при экспозиции 12 минут.

Третье. Затем поместили перед линзой пластинку из стекла лимонного цвета и при двухминутной экспозиции получили хороший негатив.

Четвертое. Был получен хороший негатив при экспозиции 2 минуты, когда использовали такую же, как и ранее, ванночку, из зеркального стекла, содержащую красный раствор тиоцианата железа.

Толщина жидкости, через которую должен был пройти свет, составляла около $\frac{3}{4}$ дюйма.

Негативы, полученные описанным выше способом, были отпечатаны на стекле, используя таннин, и показаны как диапозитивы. Изображение, полученное при фототравлении через красный фильтр, на лекции освещалось красным светом, через синий — синим, через желтый — желтым, через зеленый — зеленым; и когда эти различно окрашенные изображения налагались, на экране возникала фотография полосатой ленты естественной окраски».

Из других источников достаточно ясно, что на лекции Максвелл не использовал позитив в желтом свете, хотя Саттон утверждает обратное. Фактически он использовал при одной демонстрации свет разных цветов, чтобы показать, как красный и зеленый в комбинации дают желтый.

В 1940 г. Дуглас А. Спенсер из Кодак Лимитед сообщил, что оригиналы позитивов, использованных Максвеллом, еще находятся в Кембриджском университете в лаборатории Кавендиша. Спенсер взял на время эти позитивы и опубликовал цветную репродукцию, которая показывает, каким могло казаться проектируемое изображение слушателям лекции Максвелла. На этой репродукции можно видеть красные, зеленые, синие и фиолетовые цвета, а фон зеленый.

Для того чтобы продолжить обсуждение данного вопроса, мы смогли благодаря любезности Спенсера, лаборатории Кавендиша и Кодак Лимитед достать другой комплект позитивов. Если считать, что использованные эмульсии были чувствительны только к синему, то достаточно курьезно, что на изображении синий не представлен весьма значительно. Так как цвета ленты неизвестны, то невозможно сказать, соответствует ли это действительности или нет.

Казалось, лучший путь разрешения загадки красного и зеленого изображений — попытаться повторить работу Саттона. Чтобы это сделать, было желательно (хотя и не существенно) иметь фотоматериал той же чувствительности, что и у него. Материал, чувствительный от 430 *mμ* и ниже, был специально подготовлен для этого опыта моим коллегой Бертом Х. Кэрролом из исследовательской лаборатории Кодак.

Новая эмульсия была, конечно, более «быстрой» (*faster*) чем та, которой пользовался Саттон, но это само по себе не создавало трудности. Важно было воссоздать в надлежащей концентрации растворы, которые Саттон использовал как фильтры. В его отчете нет указания на их концентрации. Тем не менее он делает одно существенное замечание, когда говорит, что с синим жидкостным фильтром экспозиция в два раза больше, чем вообще без фильтра: шесть секунд по сравнению с тремя секундами.

Соответственно мы приготовили растворы тех же металлических солей, что у Саттона, и подбирали их концентрации до тех пор, пока экспозиции для красного, зеленого и синего не оказались в том же отношении, что и у Саттона. Для получения «синего» изображения концентрация аммонизированного сульфата меди («аммиачного раствора сульфата меди») была так подобрана, что картичка, снятая через кювету в $\frac{3}{4}$ дюйма, с раствором

дала «совершенный» негатив при экспозиции, вдвое превышающий ту, которая применялась при съемке без фильтра. Для получения зеленого изображения концентрация хлорида меди была понижена, пока «в конце концов, не был получен подходящий негатив» при экспозиции в 120 раз больше, чем с синим фильтром. Разбавление было столь значительным, что раствор более не казался глубокого зеленого цвета, а стал сине-зеленым. Химики давно знают, что цвет хлорида меди изменяется при разбавлении раствора. И, наконец, мы приготовили красный фильтр из роданистого железа («тиоцианат меди») и с ним хороший негатив получили при экспозиции, в 80 раз превышающей экспозицию с синим фильтром. Когда мы использовали эти фильтры, чтобы сфотографировать натюрморт, изображающий различные ткани, и затем спроектировали отдельные черно-белые позитивы, освещая их через цветные фильтры, как делал Максвелл, то полученная картина оказалась удивительно красочной репродукцией оригинала. Правда некоторые окраски были значительно сдвинуты по свойству; тем не менее мы смогли получить синий, зеленый, желтый, красный и фиолетовый. При желании отдельные негативы (или позитивы) могут быть отпечатаны на стандартной цветной пленке для получения цветного диапозитива. В этом случае негативы были получены с интерференционными фильтрами, которые по своему действию соответствовали жидкостным фильтрам Саттона.

А теперь — объяснение. Ясно, что наша пленка, как у Саттона, чувствительна только к крайнему синему и ультрафиолету. Тот факт, что изображения были получены не только с синим, но также с зеленым и красным фильтрами, указывает на то, что все растворы пропускают свет с длиной волны короче, чем 430 $m\mu$. Другими словами, единственным излучением, действовавшим на эмульсию, был свет крайнего синего конца видимого спектра и еще более короткое невидимое излучение в ультрафиолете. Наша линза, которая во многом подобна линзе Саттона, пропускала ультрафиолет до 325 $m\mu$. Длины волн, пропущенных линзой и тремя растворами (разбавленными), показаны на спектрофотометрических кривых (рис. 1).

Сразу же ясно, что три фильтра достаточно четко делят синюю и ультрафиолетовую области спектра на три

отдельные области, хотя зеленая содержится внутри синей. Совершенно случайно оказалось, что фильтры, выбранные Саттоном для разделения видимого спектра, действуют аналогичным образом в относительно узком

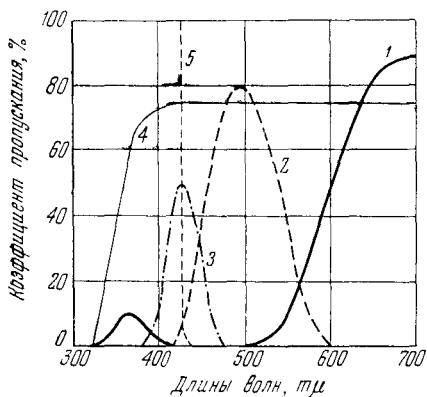


Рис. 1. Спектральная чувствительность фотопластин

1 — красный фильтр; 2 — зеленый фильтр; 3 — голубой фильтр; 4 — стеклянная отсечка; 5 — плечесная отсечка

участке света с малой длиной волны. Глядя на эти кривые, следует помнить, что при зеленом фильтре экспозиция была в 120 раз, а при красном — в 80 раз больше, чем при синем. При построении кривых эти коэффициенты не учитывались.

Теперь можно понять, как синий может быть отделен от других цветов и как настоящий зеленый может быть отделен от синего. Но тотчас могло бы показаться, что все, окрашенное в красный, вовсе неразлично. Оказывается, многие красные краски отражают не только свет, который мы видим как красный, но также много и ультрафиолета (рис. 2). Поэтому красный предмет может дать четкое изображение на «красной» пластинке не потому, что он красный, а потому, что он более ультрафиолетовый, чем те предметы, которые воспринимаются нами как зеленые и синие. Мы не знаем, конечно, в какие красные тона была окрашена лента, сфотографированная Саттоном. Более того, нет вообще описания ее цвета, значит, мы не можем быть уверены в том, что участки ленты, которые получились более яркими у Саттона на красной пластинке, были действительно красного, а не какого-либо другого цвета с высокой отражаемостью в ультрафиолете. Кажется невероятным, однако, чтобы

Максвелл показывал фотографию, если бы красные пятна не были на своих местах. Если это так, то они были созданы ультрафиолетовой — красной окраской ленты, — счастливый случай, который ни Максвелл, ни Саттон не могли предвидеть.

Из рассмотрения позитивов Максвелла можно заключить, что в дополнение к тому, что фильтры произвели разделение по длинам волн, действовал и ряд других факторов, которые дополнили окраску проектируемой им картины. Во-первых, «подходящий» зеленый негатив был сильно недоэкспонирован. Во-вторых, область контраста на трех негативах очень различна. Только эти технические дефекты должны были бы добавить цвета, которых не было у оригинала. Например, черный бархатный фон, видимо, казался зеленым на картинке, которую проектировал Максвелл.

Кроме того, позитивы Максвелла из Кавендишской лаборатории совершенно желтые. Если они были желтыми ко времени лекции 1861 г., то необходимо еще рассмотреть дополнительные изменения контрастности, а значит, и цвета. Мы не можем точно узнать, что за источники света были «волшебные фонари» Максвелла, но

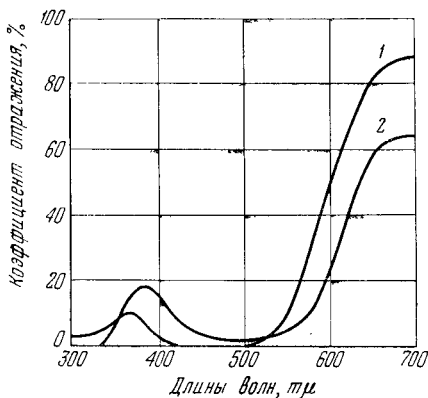


Рис. 2. Спектральный анализ красной ткани

1 — красный фильтр; 2 — красная материя

типичным волшебным фонарем того времени был известный друммондов свет, в котором брусок углекислого кальция нагревался до белого каления в пламени окиси водорода. Такие лампы дают значительно более синий

свет, чем газокалильные, используемые сейчас в домашних проекторах. Возможно также, что проекторы Максвелла включали дугу с угольными электродами, которые давали свет более горячий и синий, чем друммондов. В любом случае желтый цвет позитивов должен был придавать изображению, которое проектировалось через синий фильтр, большую контрастность, чем изображению, проектируемому через красный фильтр. Изображение, проектируемое через зеленый фильтр, должно было по контрастности занимать промежуточное положение.

Однако не все обнаруженные эффекты были вызваны различием в контрастности и плотности. То, что цвета действительно разделялись между красной, зеленой и синей картинками, может быть продемонстрировано наложением одного негатива, скажем красного, на зеленый или синий позитив. При использовании негативов, различных по контрастности, было бы возможно «вычистить» (blank out) позитив, если негатив и позитив действительно подобны. Но никакая комбинация негативов, полученных по позитивам Максвелла, не приводит к такому результату. Существует меньшее, чем мы могли ожидать, отличие между зеленым и синим, нежели между синим и красным. Если вспомнить главный тезис Максвелла, кажется несколько проническим то, что желтый негатив по существу такой же, как и зеленый, и, вероятно, мог бы быть заменен им при незначительном изменении результата.

Хотя наша интерпретация эксперимента Максвелла представляется правдоподобной, все-таки остается некоторое сомнение. Возможно ли, что коллодиевые пластинки Саттона в какой-то мере обладали чувствительностью к красному и зеленому цвету? Теперь известно, что при определенных, не совсем обычных обстоятельствах такая чувствительность может иметь место даже без применения сенсibiliзирующих красителей, которые не были открыты до 1874 г.

Эти сомнения были, к счастью, рассеяны открытием, которое мы сделали однажды, изучая диапозитивы Максвелла. При фотографировании Саттон использовал «портретную линзу с полной апертурой». Это могла быть только линза Петцваля, а она не покрывала всей пластины; значит, изображение было ограничено кругом меньшей площади, чем пластина. Мы отмечали, что не все

диаметры этих кругов одинаковы. Синий позитив имеет наименьший диаметр, зеленый — больший диаметр, а красный — самый большой. Очевидно, Саттон для каждого цвета света производил перефокусировку, и для красного света линза была наиболее удалена от пластины.

Сразу же объясняется то, что прежде ставило в тупик: красное изображение было значительно менее четким из всех трех. Саттон сфокусировал свою камеру для видимого красного света, а фотографировал в невидимом ультрафиолете.

Удивительно, таким образом, что все вместе хорошо подошло. Но мы все еще не освободились от мистификации в главном. Кажется странным, что Максвелл, один из главных авторитетов по цвету в свое время, мог не представлять того, что влажные коллодийные пластины не чувствительны к зеленому и красному. Тем не менее мы вынуждены поверить, что это так. Он едва ли предполагал, что демонстрация будет такой, как он ее себе представлял. Саттон тоже не знал точно об отсутствии чувствительности к зеленому. Действительно он рассматривал это как важное открытие, вытекающее из эксперимента. Он писал: «Теперь мы знаем, почему так трудно воспроизвести на фотографии детали зеленых предметов в тени... Следовательно, фотограф, который снимает плохо освещенную листву, не должен быть разочарован, если вместо многих прекрасных деталей он обнаружит на негативе отвратительные пятна чистого стекла».

Коллодийные эмульсии были открыты только лет за 10—12 до того и обладали настолько большей чувствительностью, чем прежние фотоматериалы, что, возможно, заключили, что они обладают некоторой чувствительностью ко всем длинам волн, хотя и значительно меньшей к длинным волнам, чем к коротким. Безусловно, спектрофотометрия еще не была развита настолько, чтобы Максвелл и Саттон имели возможность угадать правильное объяснение своих результатов.

Как бы то ни было, но принцип, изобретенный Максвеллом и осуществленный на практике Саттоном, был правильным для получения цветной фотографии. И вследствие счастливого стечения обстоятельств, о которых мы говорили, эксперимент удался, позволив Максвеллу открыть трехцветную фотографию почти на 15 лет раньше, чем были найдены светочувствительные красители, которые смогли сделать его опыт «возможным».

Уравнения Максвелла как свойство вихревой губки¹

Э. Келли

I. Из истории вопроса

Вихревая губка была введена Иоганном Бернулли в 1736 г. при попытке объяснить распространение света. Он предположил, что пространство заполнено несжимаемой жидкостью, содержащей бесчисленные малые водовороты, ориентированные во всех возможных направлениях; взаимодействии этих водоворотов наделяло среду способностью распространять гидродинамические возмущения, что, по представлению Бернулли, могло считаться эквивалентным распространению света. Эта среда содержала также твердые частички, которые передвигались вместе с жидкостью, но не отходили далеко от своих первоначальных положений.

Вихри рассматривались и во многих более поздних попытках найти связь между механикой и электромагнетизмом. Сюда относятся такие модели, как вихревая модель Максвелла (1861), которая, хотя и была аннулирована позже, оказала существенную помощь в выводе вихревых уравнений, а также вихревая губка в варианте, принятом Кельвином в 1880 г. и Фицджеральдом в 1885 г.² В 1887 г. Кельвин предложил аналогию между распространением света в пространстве и распространением ламипарных возмущений в вихревой губке. Согласно Уиттекеру, это ознаменовало собой большой успех в разработке таких моделей.

Другое представление, интересующее нас здесь, это вращательная упругая среда Мак-Келлога³. Предполагая, что потенциальная энергия этой среды пропорциональна квадрату вихря смещения,

¹ Из журнала «American Journal of Physics», 1963, 31, № 10, стр. 785—791.

² Уиттекер «История теорий эфира и электричества», т. I, стр. 95—96 и 295—303. См. также труды Кельвина и Фицджеральда.

³ Уиттекер, стр. 142—145.

Мак-Келлог сумел построить теорию, о которой Уиттекер говорит: «Не может быть сомнения, что Мак-Келлог действительно решил задачу построения среды, колебания которой, рассчитанные в согласии с правильными законами динамики, должны обладать теми же самыми свойствами, что и колебания света».

В то время (1839) было неприемлемо допущение вращательной упругости, так что модель Мак-Келлога не вызвала большого энтузиазма. Модель Максвелла, частично принятая для того, чтобы получить поперечность колебаний, обладала аналогичным недостатком, так как в ней допускались холостые колесики и упругие элементы. Мы покажем ниже, что как свойство поперечности волн Максвелла, так и вращательные свойства модели Мак-Келлога естественно возникают из свойств вихревой губки, и что уравнения для крупномасштабных движений вихревой губки тождественны по форме с уравнениями Максвелла для свободного пространства.

II. Крупномасштабные свойства вихревой губки

Описание модели. Среда, которую мы здесь рассмотрим, опуская только твердые частицы, это среда Бернулли, т. е. бесструктурная, несжимаемая, не вязкая жидкость, в которой не действуют никакие силы за исключением сил, возникающих от гидравлического давления и переноса количества движения. Пьютоновы законы полагаются справедливыми. Эта жидкость переплетается с очень тонкими дискретными вихревыми трубками, ориентированными во всевозможных направлениях. Для целей нашей статьи мы будем рассматривать эти трубки либо как классические вихревые нити, либо как пустотелые вихревые сердечники. Предполагается, что кратчайшее расстояние между трубками велико по сравнению с размерами сечения трубки.

В качестве удобного способа сделать видимым элемент объема этой среды, вообразим ящик, пронизанный насквозь во всех направлениях иголками так, что ни одна из них не слишком близка к другой. Если теперь наполнить ящик вязкой жидкостью и заставить все иголки вращаться вокруг собственных осей, то вокруг каждой иголки возникнет вихревое движение. Это движение, раз начавшись, будет сохраняться и при уничтожении вязкости. Дальше можно представить себе, что все эти иголки либо убираются, либо превращаются в жидкость. В первом случае среда обладает пустотелыми вихрями с сердечниками, а во втором — она имеет классические вихревые трубки. Жидкость, находящаяся вне вихревых сердечников или трубок, находится в циклическом невращательном движении. Теперь трубки оказываются гибкими, и так как для них невозможно оставаться прямолинейными в таком окружении без внутренней опоры, то они приобретают вращательное движение, которое и сохраняется, как свойство среды. В невозмущенном состоянии среда не обладает никакими преимущественными направлениями. Это состояние, которое предполагается устойчивым, называется нейтральным.

В качестве завершающего этапа процесса визуализации представим себе, что число трубок, пронизывающих ящик, увеличивается, а диаметры трубок уменьшаются так, чтобы сохранялось малое

отношение диаметров трубок к расстояниям между трубками до тех пор, пока индивидуальные трубки станут неразличимыми. Теперь эта система выглядит, как континуум, в котором неразличимы вариации скорости, ускорения и давления от трубки к трубке. Эта среда, в которой отдельные эффекты законов гидродинамики теряются в осредняющих эффектах большого числа трубок, и есть вихревая губка в форме, задуманной Кельвином и Фипджеральдом.

Упругость и дрейф. Основное свойство вихревой губки Бернулли, как механической модели распространения света, это то, что каждый вихрь давит на соседние, так что возмущение, например изменение положения вихря, распространяется сквозь среду. Можно убедиться, что упругость этой среды более похожа на упругость обычных тел, чем могло показаться с первого взгляда.

Рассмотрим изменение из нейтрального состояния, в котором ящик и жидкость удлинены в одном направлении x и сокращены вдоль y и z для того, чтобы сохранить объем, причем концы трубок, как предполагается, следуют движению стенок. Стенки, перпендикулярные x , содержат больше концов трубок на единицу площади, чем в нейтральном состоянии; а так как давление близ сердечников низко, то среднее давление на эти стенки менее, чем раньше — состояние, которое можно рассматривать, как растяжение по сравнению с нейтральным состоянием. Наоборот, остальные четыре стенки находятся под давлением.

Наличие сдвигающих напряжений можно вывести из этого примера на основании соображений равновесия, но полезно рассмотреть сдвиг, исходя из первичных принципов. Рассмотрим единичную трубку, которая пересекает поверхность S , ограничивающую объем V , под углом, отличным от 90° . Перенос количества движения через эту поверхность в объем V имеет и нормальную и касательную к S составляющие, так что существуют нормальная и касательная силы, действующие на S . Из соображений симметрии легко показать, что направление касательной силы совпадает с проекцией части трубки, внешней по отношению к V , на S . Эта сила имеет то же самое происхождение, что и вихревая вязкость в теории турбулентности, но отличается от нее, потому что отсутствие вязкости позволяет касательной силе существовать неопределенно долго. Таким образом, истинная прочность на сдвиг является результатом вихревого движения.

В нейтральном состоянии сдвигающие усилия, действующие на поверхность от многих трубок, взаимно уничтожаются, но в напряженных состояниях это не всегда так. На рис. 1 представлены несколько трубок в элементе объема: а) в нейтральном состоянии, б) в состоянии растяжения нормального к поверхности и в) при растяжении вращением.

Очевидно, что в случае в) имеется результирующая сдвигающая сила вправо, действующая на среду ниже S . Для такого действия необходима как деформация, так и вращение от нормального положения; в случае а) вращение не произведет сдвига вследствие изотропии.

Деформации, которые мы здесь рассмотрим, достаточно малы, так что при разложении в ряд функций напряжения нам понадобятся только первые члены деформации, и мы считаем справедливым закон Гука. Ради простоты, мы пренебрегаем изменениями массовой плотности, которые могут быть результатом растяжения

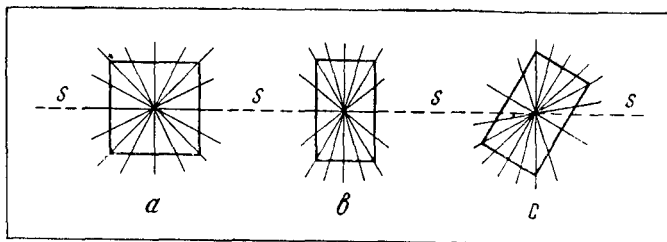


Рис. 1. Элемент объема, показанный символически:

а — в нейтральном состоянии; б — деформированный при растяжении, нормальном к поверхности и с — деформированный при растяжении и повернутый

пустотелых вихревых сердечников и изменениями плотности трубок (длины трубки на единицу объема). Эти условия требуют, чтобы расходимость смещений среды была равна нулю.

Наличие обычных соотношений напряжений — деформация позволяет воспользоваться некоторыми результатами теории упругости. Для упругой среды со смещением D , для которого расходимость $\text{div } D$ равна нулю,

$$G \text{curl curl } D + \rho \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = 0, \quad (4)$$

где G и ρ , соответственно¹, — модуль сдвига и плотность.

Равновесие имеет место, когда $\text{curl } D$ невращателен. Примером может служить цилиндрическое смещение:

$$D_x = (y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}, \quad D_y = D_z = 0.$$

Так как $\text{curl curl } D$ равно нулю, это — одно из состояний равновесия. Интересным в этом примере является то, что при таком смещении трубки искривляются.

Изолированная изогнутая трубка не остается стационарной, потому что кривизна приводит к тому, что скорость на вогнутой стороне трубки оказывается большей, чем на выпуклой, а потому она создает соответственно пониженное давление на вогнутой стороне. Эта скорость сначала ускоряет первоначально стационарную трубку по направлению к вогнутой стороне, но как только трубка приобретает скорость, возникает подъемная сила, которая ускоряет трубку в боковом направлении в сторону движения жидкости на вогнутой стороне. Эта подъемная сила оказывается достаточно большой, чтобы преодолеть градиент давления поперек трубки. В результате получится боковое смещение в положении трубки. Это движение имеет трансляционный компонент и налагающийся

¹ S. Timoshenko and J. N. Goodier. Theory of Elasticity. N. Y., 2nd ed., p. 452.

на него вращательный компонент¹. Последний не создает направляющего эффекта в среднем, и мы его игнорируем. Трансляционный компонент этого движения называется дрейфом. Для малых искривлений дрейф пропорционален кривизне (см. приложение 2).

В цилиндрическом смещении жидкость находится в равновесии, так что трубки также должны быть в равновесии. Кривизна трубок, которая приводила бы к дрейфу, если бы трубки были изолированными, должна поэтому компенсироваться структурными изменениями. Форма трубок в деформированном состоянии создает микроскопические течения и градиенты давления, которые и нейтрализуют действие кривизны. Это имеет место для любого смещения, для которого как $\operatorname{div} D$, так и $\operatorname{curl} \operatorname{curl} D$ равны нулю.

Кривизна трубки, которая не сопровождается структурными изменениями и, следовательно, остается некомпенсированной, создает дрейф. Некомпенсированная кривизна вызывается только дифференциальными вращениями, так как только в случаях движений твердого тела получается кривизна, не сопровождаемая структурными изменениями. До тех пор, пока трубки следуют движению жидкости, поведение среды является упругим в классическом смысле; но когда трубки дрейфуют относительно жидкости, уравнение (1) неполно, так как в нем нет учета дрейфа.

III. Уравнения Максвелла

Теперь мы можем сделать наш описательный анализ среды более определенным. Обозначим прочность на вращение каждой трубки через κ , где $2\kappa i$ — циркуляция вокруг трубки. Для указания направления циркуляции введем вектор κ и выберем это направление так, чтобы оно совпадало с пальцами правой руки, охватывающей трубку, а большой палец был бы направлен по κ . Величина κ предполагается одинаковой для всех трубок. Дрейф трубки пропорционален ее кривизне; коэффициент пропорциональности (коэффициент дрейфа) обозначим через α . Трубка в нейтральной среде занимает среднее положение; боковое смещение от этого положения обозначим через ξ . Тогда дрейф можно записать в виде $d\xi/dt$. Единица длины дрейфующей трубки оказывает на жидкость тягу $2\kappa i \rho \xi$, причем эта величина является также подъемной силой. Плотность трубки обозначим через L . В приложении I показано, что для некоторых целей трубки можно разлагать как векторы; этим упрощением мы теперь и воспользуемся.

Когда трубки разлагаются на их векторные компоненты, то плотность трубки вдоль каждого направления есть $1/2 L$, так как среднее значение направляющегося косинуса для сферически симметричного распределения равно $1/2$. На рис. 2 элемент среды, первоначально прямолинейный, изогнут смещением D . Вращения элементов 1 и 2, определенные в этих местах, равны $1/2 \operatorname{curl} D$, как показано стрелками.

Кривизна элемента вдоль прямой, перпендикулярной к оси вращения, есть разность во вращениях элементов 1 и 2, деленная

¹ L. M. Milne-Thomson. Theoretical Hydrodynamics. N. Y., 1951, 2nd ed., p. 230.

на расстояние между ними и, следовательно, она имеет величину $\frac{1}{2} \text{curl curl } D$. Трубка, лежащая внутри куска, с таким вращением, как на рис. 2, смещается в плоскость рисунка и вправо со скоростью $\dot{\xi}$, превышающей кривизну в α раз. Дрейфующая трубка единичной длины оказывает на жидкость тягу $2\pi r \dot{\xi}$ в направлении

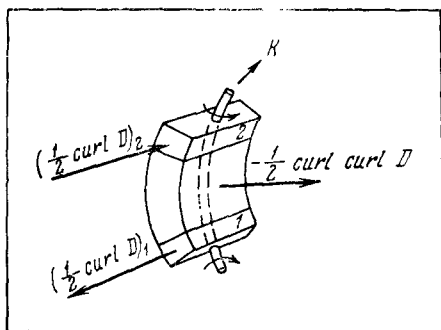


Рис. 2. Элемент объема, искривленный при дифференциальном вращении

$d\xi/dt \times \kappa$, так что эту тягу можно выразить как $2\pi r d\xi/dt \times \kappa$ на единицу длины. Если разложить трубки вдоль $\text{curl } DD$, curl curl и нормально к этим направлениям, то только последняя часть приобретет некомпенсированную кривизну. Их плотность равна $\frac{1}{2} L$ на единицу объема. Тяга на единицу объема, создаваемая дрейфом, равна

$$\begin{aligned} F &= -2\pi r \left(\alpha \frac{1}{2} \text{curl curl } D \right) \left(\frac{1}{2} L \right) = \\ &= -\frac{1}{2} \pi r \alpha L \text{curl curl } D. \end{aligned} \quad (2)$$

Знак минус получается от того, что $\text{curl curl } D$ противоположно кривизне по направлению. Сравнение с (1) дает соотношение $F = \frac{1}{2} \pi r \alpha L$. Так как тяга на единицу длины трубки равна $2\pi r d\xi/dt \times \kappa$, то тягу на единицу объема F можно записать в виде

$$F = 2\pi (d\xi/dt \times \kappa) \left(\frac{1}{2} L \right) = \pi r L d\xi/dt \times \kappa. \quad (3)$$

Подставляя это выражение для F в (2), получим

$$d\xi/dt \times \kappa = -\frac{1}{2} \alpha \text{curl curl } D. \quad (4)$$

Теперь рассмотрим криволинейный интеграл от F по замкнутой плоской кривой C (рис. 3). Трубки, перпендикулярные к плоскости

рисунка, показаны в сечении кривыми стрелками для обозначения направления циркуляции, причем за положительное направление принято направление против часовой стрелки. Из предыдущих рассуждений ясно, что если некомпенсированная кривизна такова, что трубка 1 дрейфует в C , то трубка 2 имея противоположную циркуляцию, будет дрейфовать из C . Подъемная сила на каждую трубку направлена вдоль $-F$, а тяга на жидкость направлена вдоль F .

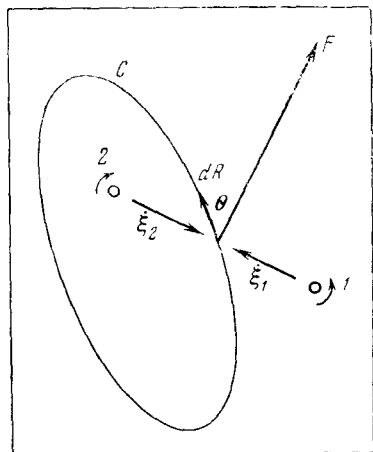


Рис. 3. Трубки, дрейфующие через кривую C .

Из рис. 3 ясно, что если F должно сохранять преобладающее направление против часовой стрелки, то трубки с положительной циркуляцией будут дрейфовать внутрь C , а трубки с отрицательной циркуляцией будут покидать C , увеличивая таким образом результирующую положительную трубок. Следовательно, криволинейный интеграл F вокруг C связан со скоростью изменения результирующей циркуляции вокруг C . На рис. 3 элемент длины дуги dr обозначен через r и представлена плоскость (плоскость рисунка), по отношению к которой дрейфующие трубки имеют нормальные составляющие. Число положительных трубок, пересекающих dr влево в единицу времени, в $\xi_1 dr \cos \theta$ раз больше числа положительных трубок на единицу площади. Число отрицательных трубок, покидающих C , такое же самое. Отрицательная трубка, покидающая C , есть та же самая в отношении циркуляции C , что и положительная входящая трубка. Компоненты трубки в плоскости рисунка не вносят никакой доли в циркуляцию C . Каждая трубка внутри C вносит 2ли единиц циркуляции в C , а так как плотность разлагаемых трубок в направлении, нормальном к рисунку, есть $1/2 L$, то скорость изменения циркуляции вокруг C

равна

$$\partial/\partial t (\text{circ } C) = \oint 2\pi\kappa \left(\frac{1}{2}L\right) (\xi dr \cos \theta).$$

На основании (3), учитывая, что $d\xi/dt$ нормально к κ , можно записать

$$\mathbf{F} d\mathbf{r} = \pi\kappa L \xi dr \cos \theta,$$

так что

$$\partial/\partial t (\text{circ } C) = 1/\rho \oint \mathbf{F} d\mathbf{r}.$$

По мере того как размеры контура C становятся малыми (однако недостаточно малыми, для того чтобы были различимы индивидуальные трубки), эти члены, разделенные на площадь, охватываемую C , приближаются к компоненту, нормальному плоскости рисунка

$$\partial/\partial t (\text{curl } \mathbf{q}) = 1/\rho \text{curl } \mathbf{F}, \quad (5)$$

где \mathbf{q} — макроскопическая скорость среды (в отличие от микроскопической скорости жидкости).

Теперь напишем \mathbf{q} в виде $d\mathbf{D}/dt$ и перегруппируем члены в (5). Принимая во внимание (2), получаем

$$\begin{aligned} \text{curl } \mathbf{F} &= \rho \text{curl } \partial^2 \mathbf{D}/\partial t^2, \\ \mathbf{F} &= -G \text{curl curl } \mathbf{D}. \end{aligned} \quad (6)$$

За исключением некоторых деталей, относящихся к дрейфу, эти уравнения представляют расчлененную форму (1). Теперь определим два новых вектора для того, чтобы ввести дрейф явным образом (выбор символов предусматривает возможность аналогии с электромагнитными полями, как это следует из дальнейшего); пусть из уравнения (3)

$$\partial \mathbf{E}/\partial t = k_1 (\pi\rho L d\xi/dt \times \kappa) = k_1 \mathbf{F}$$

и $\mathbf{B} = k_2 \text{curl } \mathbf{D}$, где k_1 и k_2 — произвольные постоянные. Теперь уравнения (6) принимают вид

$$\begin{aligned} \text{curl } \partial \mathbf{E}/\partial t &= -(k_1\rho/k_2) \partial^2 \mathbf{B}/\partial t^2, \\ \text{curl } \mathbf{B} &= (k_2/k_1 G) \partial \mathbf{E}/\partial t. \end{aligned}$$

Если предположить, что установившиеся поля отсутствуют, то интегрирование по времени первого из этих уравнений и приравнение к нулю даст аналог вихревых уравнений Максвелла для свободного пространства

$$\begin{aligned} \text{curl } \mathbf{E} &= -(k_1\rho/k_2) \partial \mathbf{B}/\partial t, \\ \text{curl } \mathbf{B} &= (k_2/k_1 G) \partial \mathbf{E}/\partial t \end{aligned} \quad (7)$$

Так как k_2 и k_1 произвольны, то можно выбрать $k_2 = \rho k_1$, и тогда получим

$$\begin{aligned} \operatorname{curl} \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t, \\ \operatorname{curl} \mathbf{B} &= (1/c^2) \partial \mathbf{E} / \partial t, \end{aligned} \quad (8)$$

где $c^2 = G/\rho$ — квадрат волновой скорости.

Из этого факта, что \mathbf{B} есть вихрь вектора, получаем

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (8a)$$

На основании (4) получаем $\operatorname{div} d\mathbf{E}/dt = 0$ или $\operatorname{div} \mathbf{E}$ не зависит от времени. Так как мы предположили, установившиеся поля отсутствуют, то для рассматриваемых частных случаев должно быть

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0. \quad (9)$$

Если выбрать k_1 безразмерным, то $d\mathbf{E}/dt$ будет иметь размерность силы на единицу объема, а \mathbf{E} — размерность импульса на единицу объема. Так как $\operatorname{curl} \mathbf{D}$ безразмерен, то \mathbf{B} имеет размерности k_2 , которые при специальном выборе, сделанном для получения уравнения (8), представляют размерность массовой плотности. Волновая скорость должна быть независимой от выбора k_1 и k_2 — факт, который подтверждается уравнениями (7).

IV. Заключение

Было показано, что поперечное движение трубок относительно жидкости получается как результат смещений, индуцирующих некомпенсированную кривизну. Это исключает необходимость в «холостых колесах» и «упругих ячейках» максвелловской модели¹. Вместе с тем поляризация, вращения и дифференциальные вращения получаются естественным путем, заменяя гипотезу гидростатической устойчивости Мак-Келлога. Как было показано в настоящей статье, уравнения Максвелла также удовлетворяют модели Бернулли, свободной от большей части уродливых особенностей моделей Максвелла и Мак-Келлога.

Симметрию вихревых уравнений Максвелла в том виде, как они применяются к вихревой губке, легко истолковать физически. Первое из уравнений (8), аналог закона Фарадея, утверждает, что накопленная завихренность, создаваемая дрейфом, определяет скорость вращения среды; второе уравнение утверждает, что дифференциальное вращение определяет дрейф. Очевидно, дрейф и сопутствующие ему структурные изменения являются теми свойствами вихревой губки, которые резко отличают ее от упругих твердых тел. У последних члены, соответствующие $\mathbf{E} d\mathbf{E}/dt$, отсутствуют.

Так как эти представления не могут быть проверены наблюдением, то они не обладают физической реальностью. Цель па-

¹ E. Whittaker, см. сноску 4 на стр. 247.

стоящей статьи не в том, чтобы предположить, что Вселенная наполнена эфиром со свойствами, описанными в этой статье. Однако эта статья трактует об эфире и, следовательно, относится к истории развития физики.

Для того чтобы рассматривать задачи математической физики, часто необходимо и почти всегда полезно использовать модель, основное значение которой именно в том, что она полезна в рассматриваемом случае. В этом отношении рассматриваемые понятия относятся к теоретической физике. Следует упомянуть, что польза этой модели не исчерпывается выводом уравнений Максвелла.

Приложение 1.

Векторная природа трубок

Для некоторых целей можно разлагать длины трубок подобно векторам — метод, полезный для наглядности.

Длинный круговой цилиндр с циркуляцией $2\pi k$ и поперечной скоростью ξ в жидкости с плотностью ρ подвергается действию подъемной силы $2\pi k\rho\xi$ на единицу длины. И, наоборот, этот цилиндр развивает тягу в противоположном направлении такой же величины на жидкость. Рассмотрим трубку длиной l , где $\mathbf{l} = i l_x + j l_y + k l_z$, причем направление совпадает с направлением \mathbf{x} . Пусть $d\xi/dt$ — скорость дрейфа. Только компонента $d\xi/dt$, нормальная к \mathbf{l} , связана с тягой f , т. е. $f = 2\pi k\rho d\xi/dt \times \mathbf{l}$.

Рассмотрим теперь тягу, создаваемую трубкой длиной l_y вдоль оси y с вертикальным дрейфом ξ и другую трубку длиной l_z вдоль оси z с горизонтальным дрейфом. Комбинированная тяга параллельна оси x и по величине равна $2\pi k\rho(\xi_y l_z - \xi_z l_y)$, т. е. точно равна компоненте x силы f . Поэтому отрезки трубок можно разлагать подобно векторам для расчетов тяги, создаваемой дрейфом.

Индукцированная скорость в точке P , создаваемая элементом объема dV в Q с завихренностью ζ_Q , равна $d\mathbf{q}_P = (dV/4\pi r^3) \times \zeta \mathbf{r}$, где \mathbf{r} — вектор, направленный из Q в P . Для элемента длиной $d\mathbf{l}$ круговой вихревой трубки радиуса a и циркуляции $2\pi k$ произведение $\zeta_Q dV$ можно записать в другой форме, заметив, что угловая скорость трубки равна $1/2 \zeta_Q$, так что скорость на поверхности трубки равна $1/2 \zeta_Q a$. Но эта скорость равна также k/a , что учитывая, что $dV = \pi a^2 d\mathbf{l}$, дает

$$\zeta_Q = (2k/a^2), \quad \zeta_Q dV = (2k/a^2) \pi a^2 d\mathbf{l} = 2\pi k d\mathbf{l}.$$

Так как $d\mathbf{l}$ можно разложить, то отсюда следует, что скорость, индуцируемая элементом вихревой трубки, такая же самая, как и скорость, индуцируемая ее компонентами.

Когда все элементы трубки в единице объема разложены вдоль x , y , z , то длина разложенной трубки вдоль каждой координаты составляет половину полной длины трубки в этом объеме. Это следует из того факта, что для сферически симметричного распределения единичных векторов среднее значение каждого направляющего косинуса равно $1/2$.

Приложение 2.

Кинематика изогнутых трубок

Как было показано¹, изолированное вихревое кольцо кругового сечения с хорошим приближением перемещается со скоростью

$$v = \frac{1}{2} Kc \left[\ln(8/ac) - \frac{1}{4} \right],$$

где c — кривизна кольца, а a — радиус поперечного сечения в предположении, что этот радиус мал по сравнению с радиусом кольца. Направление v совпадает с направлением $\kappa \times c$, где c — векторная кривизна. Вторым членом в скобках можно пренебречь, так как и a , и c крайне малы по сравнению с единицей.

Рассмотрим теперь сечение трубки с кривизной c . Если c достаточно мало, то индуцированная скорость жидкости в этом сечении, происходящая от отдаленных частей трубки, будет оказывать пренебрежимо малое действие, так что скорость продвижения будет почти такой же, как и у кругового вихревого кольца той же кривизны. Ради простоты рассмотрим трубки, направленные вдоль оси y с малой кривизной c по отношению к положительной оси x . Эти трубки будут смещаться в направлении отрицательных z со скоростью v . Если добавить к c малое увеличение кривизны Δc также вдоль оси x , то скорость станет

$$v + \Delta v = \frac{1}{2} \kappa (c + \Delta c) \ln [8/a(c + \Delta c)].$$

Если Δc достаточно мало, то можно пренебречь степенями $\Delta c/c$ высшими, чем первая, и разложить правую часть в виде

$$\begin{aligned} v + \Delta v &= \frac{1}{2} \kappa c \ln(8/ac) + \left[\frac{1}{2} \kappa \ln(8/ac) \right] \Delta c = \\ &= v + \alpha' \Delta c, \text{ где } \alpha' = \frac{1}{2} \kappa \ln(8ac). \end{aligned}$$

В нейтральной среде v столь же часто отрицательна, как и положительна, так что макроскопические направляющие эффекты в среднем равны нулю. Кривизна c для различных трубок различна, а также различна для одного и того же элемента трубки в различные моменты времени, так что необходимо воспользоваться средним значением для α' , которое определяется как коэффициент дрейфа α . Если к каждой трубке добавляется кривизна Δc в том же самом направлении, то можно, после взаимного уничтожения членов v , написать

$$\Delta v = \alpha \Delta c.$$

Скорость Δv в направлении $-z$ определяется как дрейф. Поскольку тяга, создаваемая этой скоростью, одинаково направлена для всех трубок, она создает макроскопический направляющий эффект.

¹ H. Lamb. Hydrodynamics, 6th ed., p. 241 (обозначения несколько изменены).

Приложения

Джемс Клерк Максвелл

Наука захватывает нас только тогда, когда, заинтересовавшись жизнью великих исследователей, мы начинаем следить за историей развития их открытий.

Максвелл

Его отец, Джон Клерк, принявший фамилию Максвелл, принадлежал к знатному шотландскому роду Клерков из Пенникуика. Среди представителей этого рода были горнопромышленники, купцы, политические деятели, музыканты, поэты, судьи... Членом коллегии адвокатов числился и сэр Джон, по, по его словам, он «питал неприязнь к грязным адвокатским делишкам» и юриспруденцией не занимался. Молодость его прошла в Эдинбурге, бывшем тогда средоточием культурной жизни Шотландии, за что его несколько выспрепенне именовали «Северными Афинами». Сэр Джон любил путешествовать, вел дневники наблюдений, был отличным метальщиком ядра. С необычным для человека его круга интересом следил он за развитием промышленности, за техническими новшествами (особенно в области паровых машин) и даже сам ставил эксперименты. Так, он пытался сконструировать воздуходушные мехи, дающие постоянный ток воздуха. Он посещал заседания Эдинбургского Королевского общества и опубликовал несколько научных статей на темы прикладного характера. После смерти матери сэр Джон женился на дочери судьи шотландского адмиралтейства Кей, находившегося в дружеских отношениях с самим Вальтером Скоттом. Франсеза была старше мужа на шесть лет. Женщина хозяйственная, предприимчивая, решительная, она была близка ему и по духу. В частности, она разделяла его тягу к деревенской жизни. После того как умерла их маленькая дочь, они решили покинуть Эдинбург. В свое время сэр Джон унаследовал старое поместье Миддлби — на западном побережье, в двух днях езды от столицы. Оно состояло из фермы и вересковой пустоши, каменистую землю покрывали мхи, но Максвеллы верили, что создадут здесь райский уголок. Часть земли обменяли, прикупили новой. Построенный по проекту хозяина двухэтажный, из темно-серого камня дом стоял на возвышенности, около того места, где ручей, вытекавший из торфяника, впадал в Ор. На склоне, у ручья, разбили сад. Так Миддлби превратилось в Гленлэр — «берлога в узкой долине». Холмистые берега Ора были покрыты лесом; купы деревь-

ев защищали дом от ветров. Милых в восьмий находился Солуэй-Ферт — залив Ирландского моря.

13 июня 1831 г. у Максвеллов в Эдинбурге, родился сын Джеймс. И, хотя была готова только часть дома, семья переехала в Гленлэр. Через три года мать Джеймса, в присущей ей юмористической манере, писала сестре: «Мастер Джеймс — счастливейший человек, у него по горло работы с дверями, замками, ключами. Кроме того, он исследует изгороди, течение ручьев, путь воды из пруда в Ор, а затем в море, где плавают корабли... Что касается колокольчиков, то — можно не опасаться — они у нас не заржавеют!..» Льюис Кемпбелл, друг и биограф Максвелла, сообщает, что одним из самых первых воспоминаний Джеймса было такое: он лежит возле дома в траве и с изумлением рассматривает солнце. Однажды ему дали поиграть с новой оловянной тарелкой. Выбежав во двор, он торжествующе возвестил: «Это солнце, папа! Я поймал его в оловянную тарелку!» Многие подробности мы узнаем из записных книжек сэра Джона. Многие сцены запечатлены на рисунках Джеймса, старшей кузины Джеймса, способной художницы: вот они с отцом дрессируют собаку; вот он плышет, под присмотром взрослых, в бадье по пруду; вот он на деревенской вечеринке, но внимание его привлекают не танцующие, а смычок скрипача... Этот черноволосый и черноглазый мальчик был смел и ловок. Он лазал по деревьям, удил рыбу, бродил по окрестностям. В играх он отличался неистощимой изобретательностью. Практичный отец снабдил его особым шестом-ходулей. Мальчик научился владеть им виртуозно: прыгал через изгороди и ручьи, взбирался на обрывы и крыши. Он всегда был чем-нибудь занят. Он очень любил переделывать вещи, улучшать их, это его захватывало, подогревало его фантазию. В неделю он с кузенами и деревенскими ребятами мастерил игрушки, рисовал, плел из лозы корзинки. Джеймс даже научился выпивать и вязать, сам придумывал и рисовал узоры. У него был точный глаз и на редкость умелые руки. Так начинался будущий великий экспериментатор.

Мальчик любил мечтать, был наблюдателен. Природа всегда производила на него глубокое впечатление. «Как? почему? зачем?» — он осаждал всех своими вопросами. Он присматривался к цветам и оттенкам. («Этот камень синий, но откуда известно, что он — синий?») Он наблюдал за повадками животных, переносил с места на место осине гнезда, мог часами смотреть, как прыгают и плавают лягушки, любил их песни. Чтобы лучше расслышать «тихий голос» лягушат, он брал их в рот. Он испытывал какую-то особую нежность ко всему живому и пронес ее через всю жизнь. Так складывался будущий великий естествоиспытатель.

Вскоре он пристрастился к чтению. Они с матерью читали Библию, Мильтона, распевали псалмы и баллады. Так в нем пробуждался поэт.

Чем старше становился Джеймс, тем больше крепла его дружба с отцом. Сэр Джон с удовольствием и с практической основательностью хозяйничал в своем имении. Сельская жизнь родовитых шотландцев еще отличалась тогда клановой замкнутостью, но отцу Джеймса, человеку передовому и общительному, это было не по душе. Он был усерден в делах графства, принимал участие в политическом движении на стороне консерваторов и совершенно был чужд снобизма. Он не прочь был пофилософствовать, любил шутку

й острое словцо. Вещи, сделанные его руками, были грубоваты и долговечны. Его тупоносые башмаки шились деревенским сапожником по его указаниям и из куска кожи, выбранного им самим. Много внимания он уделял воспитанию сына. В летние дни Джемс на своем пони повсюду следовал за фаэтоном отца. Он наблюдал, как грузят на телегу снопы, как работают машины и механизмы. Навещая Пенникуик, принадлежавший старшему брату сэра Джона, они с отцом шли на соседнюю бумажную фабрику. Сэр Джон, случалось, говаривал: «Дико напрасная работа!» Так он осуждал то, что делалось необдуманно и бесцельно. Отцовскую «формулу» Джемс помнил потом всегда. Он говорил, что иметь мудрых и добрых родителей — величайшая удача в жизни.

Характеризуя Англию того времени, Энгельс писал: «60—80 лет тому назад Англия была страной, похожей на всякую другую, с маленькими городами, с незначительной и мало развитой промышленностью, с редким, преимущественно земледельческим населением. Теперь это — страна, непохожая ни на какую другую, со столицей в 2¹/₂ миллиона жителей, с огромными фабричными городами, с индустрией, снабжающей своими изделиями весь мир и производящей почти все при помощи чрезвычайно сложных машин, с трудолюбивым, интеллигентным, густым населением, две трети которого заняты в промышленности...»¹

С середины 30-х годов в Англии развернулось чартистское движение — первое массовое, политически оформленное революционное движение английского пролетариата, оказавшее большое влияние на общественное развитие страны.

В 1837 г. на престол взошла 18-летняя Виктория, внучка Георга III, которая царствовала, как некогда Людовик XIV, утомительно долго — до 1901 г. Эпоха «старушки Виктории» (так величали королеву историки) ознаменовалась упадком значения королевской власти, ростом могущества буржуазии, усилением эксплуатации трудовых людей и беспощадным ограблением колоний, прежде всего — Индии.

В декабре 1839 г. Джемс потерял мать. Она мужественно согласилась на тяжелую операцию, но не перенесла ее.

В университет его хотели готовить дома. Был приглашен юноша с хорошими рекомендациями, отсрочивший для этого свои занятия в колледже. Но осенью 1841 г. отец решил определить сына в Единбургскую академию — учебное заведение типа классической гимназии. В академию мальчика привели в гленлэрском платье из серого твида, которое сэр Джон считал чрезвычайно «гигиеничным»; на грубых башмаках с квадратными носами блестели медные пряжки. Это было удушение. Новичка, явившегося во второй класс на втором месяце занятий да еще в таком одеянии, сразу же вязали в оборот. Домой он вернулся в синяках, в изорванной одежде. Однако сладить с ним, видимо, было не просто, его сразу прозвали «бешеным». Постепенно он завоевал уважение своей отвагой, невероятной силой рук и необыкновенной, непонятной какой-то добротой.

Первые школьные годы были для Джемса мучительны. После сельского призыва все в академии было ему постыло. В младших классах сидело по шестьдесят сорванцов, справиться с которыми

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 2. М., 1955, стр. 256.

учителям едва удавалось. Для арифметики у Джемса, говорили, не хватало находчивости. Да и вообще он не мог похвалиться успехами, к занятиям относился скептически, а кроме того много болел. К пятому классу он выучил восемьсот неправильных греческих глаголов и научился сочинять латинские стихи. В письмах к отцу появились и его собственные стихотворные опыты, за которые он вскоре получил приз. Он с увлечением декламировал товарищам Бернса, он полюбил смотреть пьесы Шекспира. Жил он у тетки. Кузина Джемима, кончавшая художественную школу, давала ему уроки гравирования. Отцу Джемс сообщал не столько о своих учебных делах, сколько о развлечениях, об успехах в плавании, например. «Я плаваю, как наши гленлэрские лягушки!» По Гленлэру он очень скучал. «Как поживают травы, кустарники и деревья? коровы, овцы, лошади, собаки и люди?»

Интерес к учебе у него пробуждался медленно. Известный английский физик Питер Тэт, шедший классом ниже, вспоминал потом, что товарищи считали Максвелла застенчивым и тупым. В свободное время избегая шумных компаний, он читал старинные баллады, Дрейтона, Свифта, рисовал какие-то диаграммы и конструировал механические модели. В пятом классе стали проходить геометрию, и он вдруг увлекся. Он сообщал отцу: «Я сделал тетраэдр, додекаэдр и два других эдра, названия которых еще не знаю». Геометрия словно бы расковала силу его ума. Максвелл становится не просто первым, а самым блестящим учеником академии. Один из его товарищей рассказывает: «Я помню, ...наш учитель трижды заполнял черную доску решением одной сложной задачи по стереометрии; едва он успел закончить, как Максвелл задал вопрос: нельзя ли эту задачу решить геометрическим путем? И показал, как при помощи одной фигуры и нескольких линий немедленно получалось решение».

Скучая без сына, сэр Джон частенько наезжал в Эдинбург. 12 февраля 1842 г. они с Джемсом осматривали новинку — электромагнитную машину. Они бывали на строящейся железной дороге, в порту... Иногда отец брал сына на заседания Королевского общества. Там во время обсуждения доклада о форме этруссских погребальных урн ученые мужи однажды затронули вопрос — как построить совершенно правильный овал? Джемс заинтересовался задачей и остроумно решил ее. Попутно он придумал простое устройство для вычерчивания овальных кривых и эллипсов посредством куска связанной нити и двух воткнутых в картон (в точках фокусов) булавок; этот способ употребителен и поныне. Свое сочинение Джемс назвал «О черчении овалов и об овалах со многими фокусами». Подростка в курточке немислимо было выпустить на кафедру перед чопорным ученым собранием. Поэтому работу юного Максвелла представил профессор Форбс. Это произошло 16 апреля 1846 г. Сэр Джон записал в своей памятной книжке: «Он был выслушан с большим вниманием и одобрением». Работа была опубликована в «Трудах» общества.

В то время Максвелл уже всерьез интересовался наукой; особенно занимали его магнетизм и поляризация света. В последнем, пожалуй, повинен Уильям Николь, профессор Эдинбургского университета, изобретатель поляризационной призмы — «николя» (1828). Как-то дядя Джемса, Джон Кей, взял племянника и Кембелла в гости к Николу, который показал им несколько опытов

с поляризованным светом. После того Джемс сконструировал полярископ и занялся исследованием фигур, получающихся при просвечивании кусков неотожженного стекла и кристаллов. Наиболее интересные фигуры он нарисовал акварелью и послал Николю. Он был щедро вознагражден: ученый подарил ему пару призм собственноручного изготовления. Они Максвеллу долго потом служили.

Своего классического образования он не завершил: осенью 1847 г., по совету Николя, Форбса и других профессоров, он был отдан в Эдинбургский университет. В английских университетах еще жива была традиция предоставлять студентам большую свободу в организации своего обучения. Студенты имели возможность выбирать предметы, следуя собственным склонностям. Но свобода в деле обучения — это одно, второе и — главное — это желание и умение по-деловому ее использовать. Максвелл увлекается опытами по оптике, химии, магнетизму, штудирует книги по механике и физике, много времени проводит в математических размышлениях. Мисс Кей, его тетке, нередко за столом приходилось восклицать: «Джемси, ты опять погрузился в математику!» Видя непреодолимую тягу сына к науке, сэр Джон устроил в Гленлэре физико-химическую лабораторию. Теперь, приезжая на каникулы, Джемс не прерывал занятий. В марте 1850 г. он писал одному из друзей: «Я прочел «Лекции» Юнга, «Принципы механики» Уиллиса, «Технику и механику» Мозли, «Теплоту» Диксона, и «Оптику» («Répertoire d'optique») Муаньо.. У меня имеются кое-какие намерения относительно кручения проволок и стержней, но привести их в исполнение не удастся до каникул; с количественными результатами экспериментов по сжатию стекла, желатина и т. п. дело сделано; далее идут вопросы о связи между оптическими и механическими постоянными, о желательности их определения и т. д., затем висят мосты, ценные линии, упругие кривые». Максвелл основательно углубился в теорию упругости. В том же году он (на сей раз уже сам!) прочитал перед Королевским обществом своей доклад «О равновесии упругих тел». Он доказал важную в теории упругости и в строительной механике теорему (она стала называться «теоремой Максвелла») и занялся исследованием законов вращения твердого тела. Эту серьезную работу, включая сюда и оптический метод анализа напряжений в поляризованном свете, он выполнил на пороге своего 19-летия.

Летом 1850 г. Джемс отправился в Бирмингем навестить друга Вдгонку отец прислал письмо, содержавшее обширнейшую программу действий. «Ознакомься, если можешь,— писал отец,— с работой оружейников, производством пушек и с их испытаниями, с производством холодного оружия и его испытанием; с папье-маше и лакированием; с серебрением путем цементации и путем накатки; с серебрением электролитическим способом — на заводе Элкинтона; с плавкой и штампованием — на заводе Бразьера, с обточкой и изготовлением чайников из белого металла и т. п.; с производством пуговиц различных сортов, стальных перьев, иглок, булавок и всевозможных мелких предметов, которые очень интересно изготовляются путем разделения труда и при помощи остроумных инструментов; к местной промышленности относится и производство разных сортов стекла, а также и литейное дело всех видов, производство машин, инструментов и приборов (оптических и научных) как грубых, так и тонких». Это письмо свидетельствует не только

о том, что шотландский лендлорд всерьез и глубоко интересовался техническим прогрессом, но и о том, как высоко он ценил деловые качества сына. Нет сведений, сколь полно сын выполнил поручение отца, но известно, что начал он со стекольного производства и, видимо, не без лично своего к тому интереса...

Он уже бесспоротно решил посвятить себя науке, физике. Потом он скажет: «Мы всегда чувствуем себя увереннее, когда имеем дело с физикой». И даст ей такое определение: «Физика есть тот отдел познания, который изучает господствующий в природе порядок или, другими словами, правильную последовательность событий». Он отчетливо осознал, что принадлежит к тому сорту людей, для которых «момент, энергия, масса не являются просто абстрактным выражением результатов научного исследования. Эти слова имеют для них глубокое значение и волнуют их душу, как воспоминания детства».

Эдинбургский университет его уже не удовлетворял, хотелось вырваться в мир более широкий. Осенью 1850 г. он перевелся в Кембриджский университет, в знаменитый Тринити-колледж, откуда вышли многие английские физики, в том числе Ньютон, и который славился высоким уровнем преподавания математических дисциплин. Англия — страна традиций. В Тринити-колледже сохранился не только прежний дух, но и прежний уклад жизни. Физику старинке именовали натуральной философией, и как самостоятельная наука она не преподавалась. Оптика была частью математики, а некоторые главы теплоты входили в химию. На что тогда нацеливали студентов-натурфилософов? По свидетельству Артура Шустера, им сплошь да рядом внушалось, что, за исключением чисто теоретических работ, привести исследователю имя может только усовершенствование методов измерения; «что все главнейшие факты в природе уже известны, что шансы сделать большое экспериментальное открытие ничтожно малы и что поэтому задача экспериментатора состоит в разрешении споров между соперничающими теориями или в нахождении незначительных остаточных явлений, которые могут добавить более или менее важные подробности к теории». Максвелл к таким советам относился с презрением.

Питер Тэт, перешедший из Эдинбургского университета в Тринити-колледж двумя годами ранее, вспоминает, что в Кембридж Максвелл прибыл с огромным (даже безотносительно к его возрасту) запасом знаний, однако эти знания «находились в состоянии такого беспорядка, что это привело в ужас его руководителя-методиста» У. Гопкинса, пользовавшегося репутацией лучшего репетитора колледжа. Он готовил Максвелла к специальному экзамену по математике и быстро распознал таланты этого, несколько эксцентричного черноволосого шотландца с бледным девичьим лицом и с горячими черными глазами. «Это был самый экстраординарный человек, которого я когда-либо видел,— вспоминал Гопкинс.— Он органически был неспособен думать о физике неверно».

Помимо математики, Максвелл изучает механику, астрономию, физику. В учебных курсах, естественно, излагались господствовавшие тогда физические теории. Но Максвелл не оставляет без внимания и противоположные им учения, проявляя в этом большую самостоятельность. Так, он начал изучать «Экспериментальные исследования по электричеству» Фарадея и был покорен их глубиной и мощностью. «Я решил,— писал он,— не читать ни одного математи-

ческого труда из этой области, откуда не изучу вполне основательно «Экспериментальных исследований по электричеству». Учение Фарадея не только определило направление деятельности молодого Максвелла, но и привело его вскоре к величайшим открытиям столетия...

Кембридж славился и своей богатой библиотекой. Максвелл много и жадно читает. Читал он быстро, легко схватывая содержание и так же легко переключаясь с предмета на предмет; у него была прекрасная память. Монтень сказал: самые лучшие дарования губятся праздностью. Максвелл отличался прилежанием и работоспособностью. При незаурядном уме это сулило многое. Прочитанные им книги далеко выходят за рамки учебной программы. Немало тут и философских, и художественных произведений. Английская литература переживала тогда расцвет: только что вышла «Ярмарка тщеславия» Теккерея, Диккенс опубликовал «Домби и сына» и писал свой восьмой роман — «Давид Копперфильд». Максвелл близко сошелся с наиболее талантливым молодежью и с интересом участвовал в общественной жизни. Он оказался веселым и остроумным собеседником, неистощимым на выдумки, никогда не устававшим от проказ и шуток, проповедником разного рода теорий, подчас казавшихся странными. Необычен и его режим тех лет. Спал он в два приема. Первый сон — от пяти до половины десятого вечера. С десяти до двух ночи он занимался. Затем делал получасовую разминку — бегал (к неудовольствию тех, у кого чуткий сон) по коридорам и лестницам жилого корпуса. От половины третьего до семи снова спал.

В январе 1854 г. Максвелл держал экзамен, к которому его готовил Голкинс, и занял второе место, что было блестяще. Кончив университет и получив степень магистра, Максвелл был оставлен в качестве члена Тринити-колледжа для подготовки к профессорскому званию. Он читал лекции по гидравлике и оптике, а в свободное время завершал свои прежние эксперименты по теории цветов. Он выступал как продолжатель теории Юнга, его теория была близка к теории трех основных цветов Гельмгольца. Изучая смешение цветов, Максвелл применил особый волчок, диск которого был разделен на сектора, окрашенные в различные цвета («диск Максвелла»). При быстром вращении волчка создавалось впечатление, что цвета смешивались: если диск был закрашен так, как расположены цвета спектра, он казался белым; если одну половину его закрашивали красным, а другую желтым — он казался оранжевым; смешение синего и желтого создавало впечатление зеленого. Различные комбинации давали различные оттенки. Все было просто и убедительно. Несколько позже Максвелл с успехом демонстрировал этот прибор на своих лекциях в Королевском обществе.

В ту пору Максвелл разрабатывал свой метод исследований. Жизненность метода определяется тем, дает ли он возможность ученому находить новые пути в познании законов природы. Жизненность своего научного метода Максвелл подтвердил мемуаром «О фарадеевых силовых линиях» (1855—1856) — первой из его основных работ по электромагнетизму. Оказалось, что он не только владел оригинальным методом, но был уже вполне сложившимся исследователем — исследователем-философом. Замечательно введение к этой работе: в нем Максвелл изложил свою научную программу — глубоко продуманную, с далеким прицелом. Об этом



Д. К. Максвелл в молодости

введении Людвиг Больцман впоследствии писал: «Оно показывает, как мало обязан он был случайности в своих позднейших открытиях; более того, оно показывает, что он работал по хорошо обдуманному заранее плану. Подобный план грезился, может быть, и другим великим исследователям, но немногие из них сознавали его так ясно и имели достаточно искренности, чтобы заранее разъяснить его так просто».

В 1856 г. Максвелл принял назначение в Абердинский университет на кафедру натурфилософии Маришаль-колледжа. Абердин — шотландский порт на Северном море. Ни в одном университете Англии отдельной кафедры физики еще не было, но «в шотландских университетах, — как отмечал Столетов, — физика несколько ранее получила право гражданства». Кроме того, Максвеллу хотелось быть ближе к отцу, здоровье которого все ухудшалось. Но сэр Джон не дождал ни до переезда сына, ни до своего 60-летия. Это было самое сильное потрясение в жизни Максвелла.

Его лекционная нагрузка в Абердине была небольшой. Помимо чтения лекций, много времени отнимали заботы о доставшемся ему

в наследство Гленлэре. За преподавание Максвелл взялся горячо, однако нельзя сказать, что он преуспевал: ни в молодости, ни позже он не был блестящим лектором. Своему приятелю, читавшему проповеди у них в деревне, Максвелл советовал: «Почему бы тебе не дать им *этого* поменьше?» Но сам таким путем никогда не шел. Он был обаятельным человеком, его лекции были одобрены особым юмором, в котором была и эксцентричность, и гротеск, и непрямота, с намеками и игрой слов, манера выражать свои мысли. Но едва дело доходило до существа предмета, речь Максвелла становилась точной, ясной, совершенно простой и лишенной эмоций. Таким был и стиль его писаний. Однако в его лекциях содержалось столько сложных вещей и до таких глубин любил он докапываться, что многих этим отпугивал. А экзаменовал он строго. В общем, ему трудно было поддерживать мир с теми, кто не возвышался над средним уровнем. Зато для тех, кто любил трудности и не боялся работ мысли — лучшего учителя не было.

Весной 1857 г. Максвелл решил наконец заявить о себе Фарадею, своему кумиру. К статье «О фарадеевых силовых линиях», которую он направлял ему, было приложено почтительное письмо. Не избалованный вниманием, маститый ученый был глубоко тронут. «Я не благодарю Вас за то, что Вы сообщили о силовых линиях,— писал он,— ибо Вы это сделали в интересах философской правды и из любви к ней. Но... Ваша работа приятна мне и дает мне большую поддержку...» Фарадея поразила сила таланта 25-летнего своего последователя и то, какой силой была в его руках математика. С этого началась их переписка, так много давшая им обоим.

А следующей весной Максвелл сообщил своей тетке, мисс Кей, что собирается жениться. «Не бойтесь,— шутил он,— она не математик... Но она, разумеется, не станет и помехой для моей математики». Он не ошибся. Напротив того, Кетрин Мери Дьюар, дочь директора Марипаль-колледжа, ставшая вскоре миссис Максвелл, помогала ему в работе, пока позволяло здоровье. Мемуаристы отмечают, впрочем, что «миссис Максвелл была женщиной трудной»...

Когда Кембриджский университет объявил конкурс на работу об устойчивости колец Сатурна, Максвеллу захотелось попытаться счастья. К астрономии у него была давняя любовь. В Гленлэре сохранилась своеобразная и явно домашнего изготовления игрушка: карта звездного неба, разнимающаяся на созвездия. На месте звезд (в соответствии с их звездной величиной) были вырезаны разного диаметра отверстия. Если позади ставили свечу, игрушка оживала. Кроме того, Джеймс с отцом сделали солнечные часы, по которым (и это надолго стало обычаем) в доме регулировались все другие часы.

Работа об устойчивости колец Сатурна заняла у Максвелла почти два года (1857—1859). Кольца Сатурна были открыты Галилеем в начале XVII в. и представляли собой удивительную загадку природы: планета казалась окруженной тремя сплошными концентрическими кольцами. Лаплас доказал, что они не могут быть твердыми. «Не жидкие ли они?» — предположил Максвелл. Но в этом случае, как показал математический анализ, они разделились бы на капли. Следовательно, подобная структура может быть устойчивой только в том случае, если она состоит из роя несвязанных между собой метеоритов. Королевский астроном Эри назвал эссе

Максвелла, изложенное на 68 страницах, одним из замечательнейших приложений математики. (Теоретическое решение Максвелла было со временем подтверждено спектроскопическими исследованиями Белопольского и Килфа.) Молодой ученый, которому была присуждена премия Адамса, «становится лидером математических физиков».

В науке, как и в жизни, все взаимосвязанно. Исследование колец Сатурна пробудило интерес Максвелла к кинетической теории газов. В этой области переплетались такие важнейшие идеи века, как механическая теория теплоты, принцип сохранения энергии, атомистика. С момента своего возникновения кинетическая теория газов опиралась на представления о дискретном строении тел и о хаотическом движении дискретных частиц, составляющих газообразные тела. Углубление в высокую теорию не притупило живого интереса Максвелла к насущным проблемам техники. В промышленности тогда все шире применялся пар, росло число паровых машин, но неизвестно было, каким законам он подчиняется в их цилиндрах. А с этим, в частности, была связана проблема коэффициента полезного действия. Максвелл называет своих прямых предшественников в деле изучения газовых законов, это — Д. Бернулли, Джоуль, Крениг и Р. Клаузиус. Но до Максвелла, для упрощения математических выкладок, полагали, что частицы (молекулы) газа движутся равномерно, прямолинейно и что их скорости одинаковы. Это допущение Максвелл отверг, как нереальное. Столкновение молекул друг с другом придает им различную скорость. В случае газа, изолированного от воздействия внешних сил, его молекулы распределены по скоростям группами. Невозможно вычислить скорость отдельных молекул газа, но вполне возможно вычислить скорость группы молекул. Как это сделать? Он воспользовался методом теории вероятностей и ввел в кинетическую теорию статистический подход, который потом получил название — *распределение скоростей газовых молекул* («распределение Максвелла») и явился важным этапом в развитии кинетической теории газов. Однако тогда не имелось фактов, доказывающих правильность выводов Максвелла, да и сами представления о молекулах и законах их движения были весьма гипотетическими. Поэтому ученый обращается к своему излюбленному методу механических, или кинетических моделей. Одной из его первых кинетических моделей строения газа было представление о молекулах как об упругих телах конечных размеров (что не расходилось с общепринятыми тогда положениями). Затем Максвелл стал рассматривать молекулы как точечные центры, отталкивающиеся друг от друга пропорционально 5-й степени расстояния... Прочитав максвелловское «Объяснение динамической теории газов», Клаузиус сказал: «Вот как нужно писать по теории газов!» А Столетов позже констатировал: «В работах Клаузиуса и Максвелла кинетическая теория газов получила высокую степень развития». Впоследствии русский физик Н. Н. Пирогов, сын великого хирурга, распространил закон распределения скоростей на многоатомные газы.

Иногда о Максвелле говорят как об ученом, строившем свои теории при помощи карандаша и бумаги. Это неверно. Никого так не раздражали «холодные и пустые абстракции», как Максвелла. Его главная черта (что проявилось уже в первых работах) — органическое сочетание конкретного и абстрактного, умение мыслить наглядными образами при решении самой отвлеченной задачи,

и отсюда — его стремление к геометрическим методам и кинематическим схемам. В этом он — типичное дитя своего времени, когда одни конструкции быстро сменялись другими, когда конструктивно-кинематические модели находились в центре внимания инженеров и ученых, когда дух классической механики пронизывал не только технику, но и физику. И это не случайно: механика, всесторонне и фундаментально к тому времени разработанная, была в полном смысле слова *точной наукой*. Поэтому физики и стремились свести к ней все физические проблемы, полагая, что, в конечном счете, все может быть объяснено механически. Это хорошо выразил В. Томсон (будущий лорд Кельвин): «...подлинный смысл вопроса — понимаем ли мы данную физическую проблему, определяется тем, можем ли мы сконструировать соответствующую механическую модель?» Максвелл с детства любил механизмы и машины; ставши ученым, он увидел в них еще и механические модели, демонстрировавшие определенные принципы и законы. Естественным поэтому и обратное — его стремление представить вновь найденные принципы и законы в виде механических моделей и схем. Он никогда не ограничивался одной моделью, а давал их, щедро, легко и как бы импровизируя, по несколько, иногда — десятки: выбирайте, мол, ту, которая, по-вашему, наиболее близка к действительной сути явления. Они бывали и примитивны, бывали и грубоваты, но надо помнить, что модели Максвелла — это лишь варианты творческой мысли, наглядное ее отображение; они, предупреждает ученый, «должны пониматься как иллюстративные, а не объясняющие». И в этом — принципиально отличное от других физиков его отношение к механике: он искал в ней лишь внешнее сходство, аналогию, а не разгадку природы изучаемого явления. (Кстати сказать, метод моделей и аналогий получил широкое распространение и в современной науке.)

За четыре абердинских года Максвелл с наилучшей стороны рекомендовал себя в ученом мире, было самое время перебираться в столицу. В 1860 г. он простился с Абердином, чтобы занять место профессора натурфилософии в Лондонском университете, в Кингс-колледже. Кроме физики, он должен был читать и астрономии. Здесь он наконец встретился с Фарадеем, жившим в здании Королевского института. Фарадей был стар и болен. Он давно жаловался на катастрофическую потерю памяти: «Моя голова так слаба, что я не знаю, правильно ли я пишу слова». Это почти лишило его возможности работать. Однажды после лекции, заметив своего молодого друга в плотном кольце людей, Фарадей воскликнул: «Ха, Максвелл! Вы не можете выбраться?! Если кто и может пробраться сквозь толпу — так это вы, такой специалист по молекулярному движению!..» Фарадей полюбил Максвелла и с интересом следил за его работой. Максвелл завязал знакомства и с другими физиками. «Работа — хорошая вещь, и чтение — тоже, — говорил он, — но лучше всего — друзья!» Он умел распределять время таким образом, что знакомства, встречи, дружеские беседы и развлечения не мешали ему работать. Он говорил: «Человек, вкладывающий в работу всю свою душу, всегда успевает больше...» Он достиг такого состояния интеллекта, когда, по его словам, «даже случайные наши мысли начинают бежать по научному руслу». Работал он легко, как бы играя. И даже когда он действительно играл, развлекался, то и в такие минуты умел думать о вещах серьезных.

В лаборатории он был очень искусным, быстрым; экспериментируя, имел привычку негромко насвистывать.

Переезд в Лондон совпал еще с одним успехом Максвелла-ученого: за исследования по восприятию цветов и по оптике ему была присуждена Румфордская медаль Королевского общества. Максвеллу шел тридцатый год, талант его был в полном расцвете. В мае 1861 г. на лекции в Королевском институте он продемонстрировал первую в мире цветную фотографию — бант из разноцветных лент на фоне черного бархата. Правда, в современном смысле это еще не было цветной фотографией: цветное изображение давали, проецируясь на экран, три диапозитива (красный, зеленый, синий). Максвелл, признанный глава математической физики, становится «одним из главных авторитетов по цвету»; им опубликовано пять работ, относящихся к этой области (по физиологии цветового зрения, колориметрии, цветовой печати и цветной фотографии). Некоторые из них замечательны по тем экспериментальным приемам, которые в них использованы. Навестивший несколько позже Максвелла Гельмгольц писал жене в Гейдельберг: «Был темный, дождливый день, но я все-таки поехал в Кенсингтон (район Лондона) к профессору Максвеллу. Он показал мне прекрасные приборы, относящиеся к учению о цветах, — области, в которой я сам ранее работал... Он пригласил для меня коллегу, страдающего цветовой слепотой, профессора Поля, над которым мы делали опыты». Максвелл потом скажет: «Чтобы вполне правильно вести научную работу посредством систематических опытов и точных демонстраций, требуется стратегическое искусство...» Сам он, как, быть может, никто тогда, владел таким искусством. Лаборатории в его распоряжении, по существу, не было. Но он жил в окружении приборов, причем дома у него их было даже больше, чем в колледже; одни были изготовлены им самим, другие — по его указаниям. Приборы служили ему еще и чем-то вроде игрушек: он придумывал забавные опыты, развлекался сам и развлекал других. С мыльными пузырями он манипулировал как заправский фокусник. Изучая смешение цветов, он часами выстаивал у окна, заглядывая в отверстие цветowego ящика — соседи посчитали его за сумасшедшего. Работы по измерению вязкости газов он проводил в большой мансарде своего дома. Необходимо было поддерживать постоянную температуру; на плите, даже в жару, кипели чайники, из которых внутрь «лаборатории» непрерывно струился пар. Хрупкая миссис Максвелл действовала в качестве истопника.

Устойчивый интерес к практическим вопросам заставлял Максвелла продолжать работы по теории сооружений. Он, кроме того, деятельно участвовал, как член комиссии, в организации работ по определению единицы электрического сопротивления (эталоны сопротивления) и по проверке закона Ома. В качестве материала для эталона был выбран сплав серебра и платины. Эта единица была названа *омом*. Измерения Максвелл придавал огромное значение и даже в сугубо теоретических своих работах отводил большое место системам единиц, инструментам и методам измерений. Многие физики в точности измерений видели цель, конец работы, для Максвелла это было средство для достижения иной цели. «Я мог бы, — говорит он, — привести примеры из любой отрасли науки, показывающие, как работа над тщательными измерениями была воз-

награждена открытиями новых областей исследования и развитием новых научных идей».

Лондонский период был для него плодотворным. Одна за другой выходят его работы. Вырос круг друзей, но круг научных проблем остался, по сути, прежним. Он с явным удовольствием продолжал те исследования, которые начаты были в юности. В 1861—1864 гг. он публикует вторую и третью из своих основных работ по электромагнетизму — «О физических линиях сил» и «Динамическую теорию электромагнитного поля». В эти годы Максвелл пришел к основным идеям в молекулярно-кинетической теории и в области электромагнетизма. Эти проблемы не только двигали науку XIX столетия, но сохранили свое значение и поныне.

Работа в Кингс-колледже была более напряженной, чем в Абердине. Девять месяцев в году читались лекции. Кроме того, по вечерам Максвелл читал физику мастеровому люду. Лето он проводил у себя в поместье. В сентябре 1865 г. он перенес тяжелое рожистое воспаление головы; плохим было и здоровье жены. И вот — неожиданно — Максвелл, как некогда его отец, решает поменять столицу на Гленлэр. Он отказался от кафедры и, отращивая бороду, зажил как лэрд. Выполняя волю отца, он перестраивает дом, занимается хозяйством, благоустраивает поместье. Он навещает соседей, играет с их детьми (своих у него не было), ездит верхом, совершает длинные прогулки с собакой Тоби. Вечера обычно посвящались чтению вслух, причем предпочтение отдавалось старым авторам — Чосеру, Мильтону, Шекспиру. Но Максвелл отлично был знаком и с современной ему английской литературой, особенно с поэзией. У него был острый критический глаз, тонкое чувство прекрасного, он помнил множество стихов и прозаических отрывков, целые сцены из Шекспира. Его суждения об искусстве были столь же самобытны и глубоки, как и его научные статьи. Он вел большую переписку, изучал теологию, сочинял «каверзы» для конкурсных задач по математике, писал стихи. Весной он ездил в Лондон на ученые совещания и на экзамены в Кембридж; в таких случаях он ежедневно писал жене. Летом 1867 г. они совершили путешествие по Италии. Чтобы объясняться с итальянскими физиками, в частности с профессором Моссоти, Максвелл основательно изучил язык (из языков ему почему-то трудно давался только датский). Встретивший его в Италии Кемпбелл шипит, что Максвелл смотрел на собор св. Петра в Риме глазами «сочувствующего гения». В Гленлэре Максвелл львиную долю своего времени отдавал научному творчеству и написал несколько сочинений по математике и физике и две книги — «Теорию теплоты» и «Трактат по электричеству и магнетизму», в которых подытожил и завершил свои основные теоретические исследования.

Теория электромагнетизма имела большую историю и до Максвелла. «Постепенное разгадывание законов электромагнетизма в течение последних полутора веков, — писал У. Брэгг, — является одним из самых удивительных достижений науки во все времена. Путь был длинным и трудным, хотя сами по себе основные принципы не трудны».

Изучение электромагнетизма началось в XVIII в. Максвелл отмечает: «Кавендиш, Кулон и Пуассон — основатели точной науки об электричестве и магнетизме». (К ним следовало бы еще причислить и Вольту). В 1819 г. Эрстед открыл действие тока на магнит-

ную стрелку, показав таким образом, что электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. До этого не знали, что между электричеством и магнетизмом есть какая-то связь. Ампер установил, что провод с током обладает всеми свойствами магнита и «исследовал математические законы механического взаимодействия между электрическими токами» (Максвелл). Араго открыл способность тока намагничивать железо. Дэви объяснил, почему железные опилки, рассыпанные на листе картона, сквозь который, перпендикулярно к нему, проходит провод с током, располагаются вокруг провода по концентрическим кругам. Взаимодействие электричества и магнетизма тайло в себе нечто необыкновенное. Ученый мир был взбудоражен.

Увлечение опытами по электромагнетизму становится модой. Заинтересовался этими опытами и ассистент Дэви, Майкл Фарадей.

К своим опытам, составившим в науке эпоху, он приступил в 1821 г., но только через десять лет добился успеха — открыл электромагнитную индукцию.

Открытия Фарадея, Ленца, Ома обогатили науку. После изобретения телеграфа Роберт Оуэн писал: «Возможность передавать мысли людей на расстояние 200 тысяч миль в секунду представляет собой самое чудесное открытие в летописи всех народов». Но не было теории, в которой бы математически разрабатывались принципы электродинамики и удобной для практических целей, а жизнь ее требовала. В объяснении притяжения и отталкивания электрических зарядов и магнитных полюсов господствовал так называемый принцип *дальнего действия* (*actio in distans*). Взаимное притяжение тел, удаленных подчас на огромные расстояния да еще разделенных непроводящей средой, казалось чем-то нереальным. Чтобы как-то найти объяснение, пространство заполнили вещественной средой — эфиром. При этом считалось, что действие и всемирного тяготения, и магнитоэлектрических сил распространяется мгновенно и без участия промежуточной среды. Все тогдашние теории (например, теория Неймана, Вебера, Грассмана и др.) базировались на принципе дальнего действия.

И лишь один Фарадей, отрицавший этот принцип, шел против течения. В теории Фарадея главное внимание было обращено на пространство, которым разделены взаимодействующие заряды или магнитные массы. Молодой Максвелл напишет потом Фарадею: «Вы — первый человек, которому пришла в голову идея о действии тел на расстоянии через посредство окружающей среды». Дж. Дж. Томсон замечает: «Фарадей был глубоко убежден в аксиоме или, если хотите, в догме, что материя не может действовать там, где ее нет». Поэтому существование эфира — упругой, непроводящей среды — он принимал. Через нее-то (быстро, но не мгновенно) и распространяется электрическое действие — последовательно от точки к точке — так что имеет место *близкое действие*. Пространство, участвующее в передаче электрического действия, Фарадей назвал электрическим полем; оно пронизано потоками электрических и магнитных сил — силовых линий. Силовые линии окружают электрические заряды и магнитные полюсы. «Фарадей,— писал Максвелл,— своим умным глазом увидел силовые линии, пересекающие пространство...» Они сделали это пространство чем-то живым и вполне реальным. Фарадей считал, что понятие о силовых линиях

должно раскрыть загадку природы взаимодействия магнетизма и электричества.

Теория Фарадея, однако, не была проста. Гельмгольц, например, вспоминает, как он «часами просиживал, застрывши на описании силовых линий, их числа и напряжения...» Фарадей не владел математическим методом и не делал поэтому попыток им воспользоваться. Он считал, что самые сложные вопросы можно изложить просто, не прибегая к «языку иероглифов». (Эйнштейн потом скажет о нем: «ум, который никогда не погрязал в формулах»). И что же получилось? В то время как теории адептов дальнего действия были блестяще математически обоснованы, гениальные фарадеевы «Экспериментальные исследования по электричеству», изложенные на языке «житейской логики», казались чем-то прикладным и пребывали вне «высокой науки». Открытия Фарадея использовались на практике очень широко, но к ним, однако же, относились свысока, прониически сомневались — а можно ли вообще под его теорию подвести математическую базу? Роберт Милликэн писал: «Когда Фарадей подтвердил свои гениальные физические идеи гениальнейшими открытиями в области электромагнетизма, он этим не завоевал своим идеям даже минимального признания. Формалисты школы Ампера — Вебера, подобно современным формалистам школы Маха — Авенариуса, с тайным, а иногда и с явным презрением смотрели на «грубые материальные» силовые линии и трубки, порожденные плебейской фантазией переплетчика и лабораторного сторожа Фарадея». Вот почему молодой Максвелл имел все основания заявить: «Современное состояние учения об электричестве представляется особенно неблагоприятным для теоретической разработки».

В этот решающий момент Максвелл и начал сражение за теорию Фарадея. Что же он сделал? Образно Милликэн определил это так: «облек плебейски обнаженное тело фарадеевских представлений в аристократические одежды математики». Известный советский физик Т. П. Кравец это же самое выразил в других словах: «Если мы теперь освоились с системой воззрений Фарадея, если его *электромагнитное поле* стало одним из наших основных знаний, если его система превратилась в стройную теорию и получила адекватное математическое выражение, то это заслуга Максвелла и только Максвелла».

В искусных руках Максвелла математика оказалась могучим средством. Раньше других это понял Фарадей. Прочитав присланную ему статью «О фарадеевых силовых линиях», великий физик в марте 1857 г. писал Максвеллу: «Сначала я даже испугался, когда увидел такую математическую силу, примененную к вопросу, но потом изумился, видя, что вопрос выдерживает это столь хорошо». Для Максвелла математика никогда не была самоцелью, и не наслаждения он искал в математических тонкостях, а орудие познания. «Насколько возможно,— писал он,— я буду избегать вопросов, которые хотя и могут явиться предметом полезных упражнений для математиков, но не в состоянии распырить наших научных знаний». Вместе с тем Максвелл безоговорочно берет под защиту фарадеевский метод: «Может быть, для науки является счастливым обстоятельством то, что Фарадей не был собственно математиком, хотя он был в совершенстве знаком с понятиями пространства, времени и силы. Поэтому он не пытался углубляться в

интересные, но чисто математические исследования, которых требовали его открытия. Он был далек от того, чтобы облечь свои результаты в математические формулы, либо в те, которые одобрялись современными ему математиками, либо в те, которые могли дать основание новым начинаниям. Благодаря этому он получил досуг, который требовался ему для работы, соответствующей его духовному направлению, смог согласовать идеи с открытыми им фактами и создать если не технический, то естественный язык для выражения своих результатов.

Максвелл решительно опровергает версию о якобы «антиматематичности фарадеевского мышления». Он писал: «...по мере того, как я подвигался вперед» в изучении Фарадея, «я замечал, что его способ понимания явлений также был по своей природе математическим, хотя он и не был представлен в обычной математической форме. Я убедился, что его идеи могут быть выражены в виде обычных математических формул, и эти формулы вполне сравнимы с формулами профессиональных математиков...» Более того, говорит Максвелл: «Способ, который Фарадей использовал для своих силовых линий при координировании явлений электромагнитной индукции, показывает, что он был математиком высокого порядка и таким, у которого математики будущего смогут перенять ценные и плодотворные методы». Он, писал Максвелл, «сообщил этой концепции силовых линий такую ясность и точность, каковые математикам удалось сообщить своим формулам».

«Трактат об электричестве и магнетизме» («*Treatise on electricity and magnetism*») разделен Максвеллом на два тома, а каждый том — на две части; в первом томе — электростатика и электрический ток, во втором — магнетизм и электромагнетизм.

По характеру мышления Максвелл был геометром, поэтому ему была близка геометрическая модель Фарадея, который оперировал с электрическими и магнитными силовыми линиями. В работах В. Томсона и Гельмгольца получила завершение гидродинамическая модель трубок. Между этими двумя моделями Максвелл усматривал аналогию. Следуя, с другой стороны, по пути Ома, использовавшего гидродинамические образы при установлении законов тока, Максвелл перенес эти образы в свое учение об электромагнетизме.

Еще в «Динамической теории поля» он писал: «Теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией *электромагнитного поля*, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические или магнитные тела, и она может быть названа также *динамической теорией*, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления». Свою задачу Максвелл видит в том, чтобы объяснить электромагнитные явления «при помощи механического действия, передаваемого от одного тела к другому при посредстве среды, занимающей пространство между этими телами». Это был путь, указанный Фарадеем. Сосредоточив внимание на новом объекте — электромагнитном поле, Максвелл вывел электродинамику на единственно верный путь.

Еще в 20-х годах было известно, что магнитное поле возникает вокруг проводника, по которому проходит электрический ток («ток

проводимости», по терминологии Максвелла). В его гипотезе утверждалось, что магнитное поле возникает и при отсутствии тока проводимости, если электрическое поле меняется во времени. Тем самым Максвелл утверждал, что существует явление, обратное явлению электромагнитной индукции и названное им «магнито-электрической индукцией». Если электрическое поле меняется не в пустоте, а в некой диэлектрической среде, то изменение это вызывает смещение (т. е. движение) зарядов — появляется так называемый «ток смещения». Идея тока смещения — центральная идея электромагнитной теории Максвелла. Анри Пуанкаре отмечал потом с изумлением: «Все опыты того времени, казалось, противоречили этому, так как токи наблюдались исключительно в проводниках. Как мог Максвелл примирить свою смелую гипотезу с фактом так прочно установленным?». На это можно ответить словами репетитора Гопкинса: «Он органически был неспособен думать о физике неверно».

В мемуаре «Динамическая теория поля» (Джинс считал эту работу Максвелла «наиболее важной и имевшей наибольшее влияние... из всего им написанного») дана знаменитая электродинамическая система уравнений, в которой нашло отражение все то, что было тогда известно из теории электромагнетизма: 1-е уравнение выражает электромагнитную индукцию Фарадея; 2-е — магнито-электрическую индукцию, открытую Максвеллом и основанную на представлениях о токах смещения; 3-е — закон сохранения количества электричества, а 4-е — вихревой характер магнитного поля. (Это, в частности, дало повод Энгельсу заметить: «...вихри старого Декарта снова находят почетное место во всех новых областях знания»¹).

Свою роль в развитии учения Фарадея Максвелл оценивал чрезвычайно скромно: «Я только облек идеи Фарадея в математическую форму». Работы Максвелла развеяли миф о «нематематичности» теории Фарадея. Но возник другой миф — что теория Максвелла якобы не физическая теория, а исключительно математическая. Теперь вряд ли надо опровергать, что это не так, что теория Максвелла — глубоко физическая теория, как не требуется доказывать и то, что Максвелл не только «пересказал» идеи Фарадея на языке математики, не только объяснил все известные в ту пору электромагнитные процессы, но и открыл для науки электромагнитное поле, представление о котором вскоре вытеснило понятие об эфире и — под именем «теория поля» — стало одной из основ современной физики. Пуанкаре считал теорию Максвелла вершиной математической физики. «Самым увлекательным предметом во времена моего учения была теория Максвелла, — вспоминает Эйнштейн. — Переход от сил дальнего действия к полям, как основным величинам, делал эту теорию революционной».

Это не все. Анализируя свои уравнения, Максвелл установил, что должны существовать импульсы, или волны, которые распространяются в пространстве как свободные поля (это предполагал и Фарадей). Вычислив их скорость, Максвелл получил 186 тысяч миль в секунду, т. е. скорость этих волн равнялась скорости света. И Максвелл говорит: «...мы едва ли можем отказаться от вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, ко-

¹ Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1952, стр. 88.

торая суть причина электрических и магнитных явлений». К такому же выводу он пришел и с другой стороны — разрабатывая свою гипотезу о токе смещения. Все это позволило ему уверенно заявить: «...свет есть электромагнитное возмущение в непроводящей среде», т. е. свет — это разновидность электромагнитных волн. Это мы находим в той части второго тома «Трактата», которая озаглавлена «Электромагнитная теория света». Так, по меткому замечанию Луи де Бройля, Максвелл «сделал всю оптику частной главой электромагнетизма». Здесь же содержится и еще один замечательный вывод: «В среде, в которой распространяется волна, появляется в направлении ее распространения давящая сила, которая во всякой точке численно равна количеству находящейся там энергии, отнесенной к единице объема». И далее: «Плоское тело, подвергающееся действию солнечного света, будет испытывать это давление только на своей освещенной стороне и, следовательно, будет отталкиваться от той стороны, на которую падает свет». Максвелл подсчитывает и величину этого давления. П. Н. Лебедев писал потом: «Максвелл вычислил в 1873 г., что при ясном небе, в полдень давление солнечных лучей на поверхность в 4 м^2 едва достигает величины тысячной доли грамма». Как тут не вспомнить восклицание маленького мальчика Джемса Максвелла, которое стало, можно сказать, пророческим: «Это солнце, папа! Я поймал его в оловянную тарелку!».

Сын поэтической Шотландии, Максвелл в душе всегда был поэтом. Это сказалось не только в том, что он всю жизнь писал стихи; глубокой поэтичностью отличается и его научное творчество. Математика же окрыляла его мысль, полную «самобытной силы».

Гению удастся понять и четко сформулировать то, что ранее, подчас в течение долгих веков, лишь смутно угадывалось. О существовании светового давления говорил еще Кеплер. Ломоносов, поддерживавший волновую теорию света Гюйгенса, полагал, что между светом и электричеством имеется некая связь. Эйлер считал свет волнами в эфире. К началу XIX в. теория оптических явлений была уже основательно разработана. Но это была *механическая* теория, и тот общепризнанный факт, что световые волны являются волнами поперечными, поставил ее перед большими трудностями. Теория Максвелла, сведя теорию света к электромагнитным волнам, вывела ее тем самым из тушика. Это был замечательный синтез физики второй половины XIX столетия.

Мы помним: в своих исследованиях (в том числе и в исследованиях по электричеству) Максвелл отталкивался от механики. Он, например, писал: «Энергия электромагнитных явлений есть механическая энергия» (сегодня мы говорим «эквивалентна»). «То обстоятельство, — замечает Макс Планк, — что первоначально Максвелл вывел свои уравнения с помощью механических представлений, не изменяет существа дела». Больцман писал: «...этот цикл исследований, в котором Максвелл впервые пришел к своим уравнениям, принадлежит к наиболее интересному, что только знает история физики, и именно как раз по причине своей оригинальности, по причине отличия его метода от всех применявшихся ранее и позднее, а также вследствие той скромной простоты, с которой Максвелл показывает, с каким трудом он постепенно продвигался вперед и достиг наиболее абстрактной и наиболее свособразной

теории, которую только знает физика, пользуясь совершенно специальными и конкретными представлениями, связанными с тривиальными задачами обычной механики».

В «Эволюции физики» А. Эйнштейна и Л. Инфельда значение уравнений Максвелла определено так: «Их простая форма скрывает глубину, обнаруживаемую только при тщательном изучении. Формулировка этих уравнений является самым важным событием со времени Ньютона не только вследствие ценности их содержания, но и потому, что они дают образец нового типа законов».

Опираясь на механику, Максвелл пришел к тому, что глубже, чем законы механики, вскрывало взаимосвязь явлений природы, — к законам электромагнетизма, а это был уже новый метод познания. Проницательный Больцман не ошибся, утверждая, что Максвелл «был столь же крупным творцом в теории познания, как и в области теоретической физики». Дж. Бернал в книге «Наука и общество» отмечает, кроме того, что «уравнения Максвелла составили теоретическую базу будущего электромашиностроения, представлявшего собой сложную взаимозависимость теории и практики». Максвелл понимал значение разрабатываемой им области: «...мне представляется, — писал он, — что изучение электромагнетизма во всех его проявлениях как средства движения науки вперед сейчас приобрело первостепенную важность». Эти слова актуальны по сей день.

25 августа 1867 г. умер Фарадей. Начиная несколькими годами позже, в «Nature» с Фарадея серию «Портреты выдающихся ученых», Максвелл писал: «Мы... рассматриваем Фарадея как наиболее полезный и одновременно наиболее благородный тип ученого. Тот факт, что Фарадей существовал, делает более великой и сильной всю нацию, и нация была бы еще более великой и сильной, если бы среди нас было бы больше Фарадеев». Лучшим памятником Фарадею мог быть только «Трактат». И Максвелл работает над ним с еще большим рвением.

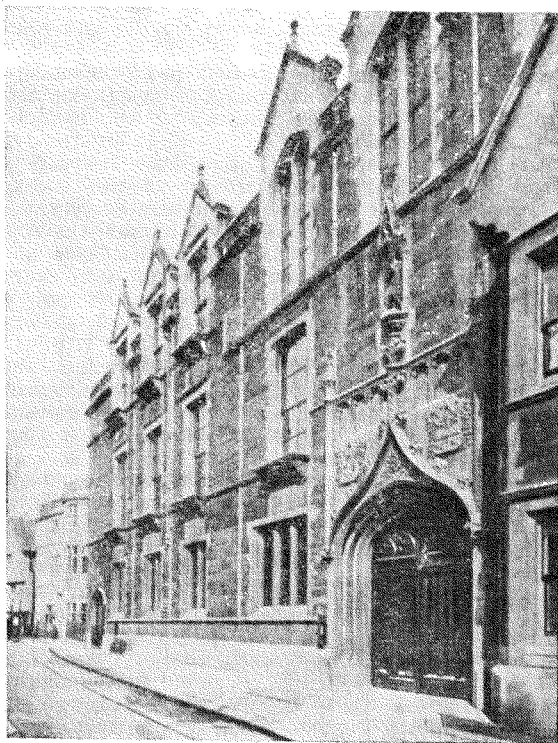
«Трактат» — это вершина его научного творчества и вместе с тем это настоящая энциклопедия электромагнетизма, где обобщены результаты труда нескольких поколений ученых. Электромагнитной теории Максвелл отдал половину жизни, а «Трактату» — около восьми лет. Он вышел в 1873 г. Максвелл кончал его уже в Кембридже, куда переехал в 1871 г. Старинный друг Максвелла профессор Форбс убеждал его стать директором колледжа университета в Сент-Эндрью, но Максвелл не хотел об этом и слушать. В это время в Кембридже была учреждена кафедра экспериментальной физики. В. Томсон, имевший кафедру в Глазго, отказался ее возглавить. Тогда предложили Максвеллу. По настоянию друзей-ученых он, не без колебаний, все-таки согласился. Вместе с кафедрой он принял и лабораторию, только начатую строительством. Формальное назначение состоялось 8 марта 1871 г., в октябре Максвелл прочел вступительную лекцию. Тогда ходила студенческая шутка, что Кембридж-де «утратил связь с большими научными движениями, проходившими... вне его стен». В своей лекции Максвелл говорил: «Кембриджский университет... он с большей или меньшей быстротой приспособляется к требованиям времени, недавно ввел курс экспериментальной физики. Курс этот, требуя поддержания способностей к вниманию и анализу, ...требует также упражнения наших чувств в наблюдении и наших рук в общении с приборами.

Привычные принадлежности — перо, чернила и бумага — не будут уже достаточны, и нам потребуется большее пространство, чем пространство кафедры, и большая площадь, чем поверхность доски.

Максвелл на собственном примере убедился, как трудно ученому без лаборатории. Будучи одним из самых дальновидных людей своего времени, он понимал, что основа дальнейшего развития физики, будущее физики — это эксперимент. Только сознание этого и вынудило его взять на себя бремя по организации новой лаборатории. В печати потом не упускали случая отметить, что лаборатория-де «обязана своим существованием щедрости герцога Девонширского, лорда-канцлера университета». Однако немало вложил в нее личных средств и Максвелл, не говоря уже о времени и нервах. Она строилась не только под его наблюдением, но и по его указаниям. Он вникал во все детали и все старался предусмотреть. Лаборатория была приспособлена как для научной работы, так и для лекционных демонстраций. Первоначально она называлась «Девонширской», потом была переименована в «Кавендишскую» — в честь замечательного английского ученого конца XVIII в. Генри Кавендиша, которому герцог, кстати сказать, доводился внучатым племянником.

Дж. Дж. Томсон, уже на склоне дней, вспоминал, что в Англии 60—70-х годов физических лабораторий как таковых не было. Джоуль, например, свои замечательные опыты проводил у себя дома в Манчестере. В. Томсону лабораторией служила клетушка по соседству с угольным подвалом. Стокс в Кембридже ставил оптические эксперименты в тех же условиях, что и Ньютон полтора столетия до него. Но к 70-м годам XIX в. обстановка менялась. А. Г. Столетов отмечает: «С тех пор, как открыт спектральный анализ и настало новое движение в электротехнике, на физику особенно не жалеют денег, как уже издавна не жалели на химию и астрономию». Физические открытия остро были нужны промышленности. Конкурентная борьба требовала от науки новых темпов развития, толкала на поиски новых форм организации труда ученых. Ученых-одиночек с их примитивными домашними лабораториями заменяли исследовательские институты и крупные, богато оснащенные лаборатории, во главе которых стояли лучшие физики. Все увеличивался поток «пожертвований», идущих на строительство лабораторий. Появлялись научные школы. В 1869 г. вышло руководство лабораторных работ Кольрауша. Лабораторные занятия начали вводиться во всех университетах. Крупные лаборатории возникают в Гейдельберге (1863), Вене, Париже (1867), Оксфорде, Страсбурге...

Открытие Кавендишской лаборатории состоялось 16 июня 1874 г. Через пять дней газета «Московские ведомости» напечатала статью молодого русского физика Столетова, очевидца этого события. «Сегодня великий день в классическом Кембридже. Люди, кебы, колокола — все в необычайном движении, — писал Столетов. — Праздновалось открытие одного из учреждений, еще редких в Европе, но разномножающихся с каждым годом». Далее говорилось: «Едва ли не самая роскошная и комфортабельная из существующих, кембриджская физическая лаборатория, вверенная одному из первоклассных физиков нашего времени, профессору Джемсу Клерку Максвеллу, без сомнения будет играть видную роль и в истории



Кавендишская лаборатория

физики, и в истории английских университетов». Столетов, мы знаем, не ошибся в своих предположениях.

Далее следует подробное описание новой лаборатории. «План дома представляет вид наугольника, т. е. двух удлиненных частей, смыкающихся под прямым углом. ...Нижний этаж лаборатории содержит в себе ряд комнат для работ, требующих полной неподвижности приборов, каковы измерения длины, времени и массы, а также некоторые измерения из области электричества, магнетизма и теплоты. Магнитная комната составляет северо-западный конец наугольника, и на значительное расстояние от нее... устранены железо и сталь. Комната для весов освещается двумя широкими окнами; смежная комната, назначенная для теплоты, сообщается с нею помощью подъемного окошка, позволяющего издали наблюдать в трубу термометры и другие приборы, которым мешало бы близкое присутствие наблюдателя. Обширная кладовая (store-room), мастерская и комната для большой гальванической батареи составляют остальную часть нижнего этажа.

«Второй этаж (first floor) содержит обширную аудиторию, комнату для приготовления лекционных опытов (preparation room), большое помещение для аппаратов, огромную рабочую комнату и комнату профессора. Лекционный стол, разделяющий аудиторию во всю ширину ее на две части, покоится на каменной стене, идущей от фундамента, и представляет совершенно неподвижное помещение, где можно пользоваться даже самыми чувствительными к малейшим сотрясениям снарядами. Все рабочие столы в доме почти в такой же мере удовлетворяют этому условию неподвижности, столь необходимому для многих физических снарядов. Столы покоятся не на полу, а на особых балках, независимых от пола и укрепленных в капитальных стенах здания. ...Другое важное удобство представляет обилие подъемных дверок (trap doors) во всех полах; с помощью их можно делать сообщение между всеми этажами дома, проводить из одного этажа в другой проволоки батарей, нити привеса маятников, акустические трубы и т. п. ...

«Верхний этаж вмещает комнаты для акустики, лучистой теплоты, оптики и электричества. Особая зала назначена для вычисления и графической редукции наблюдений; имеется также темная комната для фотографических работ. В комнате для электричества необходимая сухость воздуха будет искусственно восстанавливаться, по мысли Клерка, особым снарядом, состоящим из фланелевой простыни, нагреваемой с одной стороны и вращающейся наподобие телеграфной ленты. Электричество большой машины, помещенной в этой комнате, проводится системой проволок в аудиторию и рабочую залу.

«Наконец, электрическая комната, а равно и аудитория металлически сообщены с металлическим шестом, водруженным на крыше здания, — коллектором атмосферного электричества. Наблюдатель, помещенный в электрической комнате или в аудитории, может в любое время измерять напряжение (потенциал) атмосферного электричества.

«Здание отопляется горячей водой с помощью системы чугунных (в магнитном отделении — медных) труб. Нечего и говорить, что все комнаты обильно и удобно снабжены водой и газом. Аудитория освещена двумя газовыми люстрами, помещенными на самом верху комнаты; газ регулируется с лекционного стола и может быть мгновенно зажжен помощью небольшого гальванического снаряда. Окна аудитории закрываются черными ставнями посредством системы зубчаток, управляемой рукояткой. В одну минуту можно потушить аудиторию в абсолютную темноту, в одну секунду — осветить ее газом или электричеством».

Не только восхищение, но и зависть сквозит в этом описании. И не без умысла поместил Столетов статью в московской газете! Русские физики тоже мечтали о лабораториях. Столетов надеялся привлечь к этому внимание общественности и тем помочь делу. Однако мечты долго еще оставались мечтами. В 1883 г. Столетов напишет статью «Физические лаборатории у нас и за границей», где будет горько сетовать: «Нет во всей России ни одного здания, которое было бы построено собственно для физики...» И далее: «Вот главная причина почему физика «не может у нас идти быстро», — еще диво, если хоть как-нибудь идет».

Кавендишская лаборатория — питомник учеников и последователей Максвелла — со временем стала прославленным научным уч-

реждением Англии. Стоять во главе ее считалось и считается большой честью. После Максвелла ее возглавляли Рэлей, Дж. Дж. Томсон, Резерфорд, Брэгг-сын — ученые с мировым именем. Здесь, например, были заложены основы для развития атомной физики. Однако результаты первых лет деятельности лаборатории были незначительны, на что имелись свои причины. Построив такую лабораторию, как Кавендишская, надо было круто менять всю кембриджскую систему обучения, что в консервативной Англии совсем не просто. Упор делался на математику и на теоретическое изучение физики, а для овладения экспериментальным искусством оставалось мало времени. К тому же некоторые профессора стремились этому воспрепятствовать. Артур Шустер, обучавшийся в ту пору у Максвелла, рассказывает о таком анекдотическом случае. «Максвелл, имевший врожденное стремление видеть собственными глазами все, что можно видеть, был очень взволнован, когда ему удалось показать в вырезанной и отшлифованной им пластинке двоякопреломляющего кристалла коническую рефракцию. Этот опыт был труден, и обрадованный Максвелл, встретив одного из преподавателей математики, Тодгёнтера, спросил его: «Хотите видеть коническую рефракцию?» — «Нет, — отвечал профессор. — я ее преподавал всю свою жизнь и вовсе не хочу, чтобы все мои представления перевернулись, когда я ее увижу». Тодгёнтер был образованным человеком и талантливым математиком, но это не мешало ему неприязненно относиться даже к попыткам вводить лекционные демонстрации. Студент, говорил он, «должен доверять утверждениям своего учителя — вероятно, проповедника зрелых знаний, человека признанных способностей и безупречного характера...».

И все же влияние лаборатории и лично Максвелла на кембриджскую мысль постепенно росло. Росло и значение лаборатории. Но первые годы все держалось главным образом на энтузиазме сотрудников и на их вере, что положение должно измениться. Штат лаборатории состоял тогда из 5—6 человек. Шустер вспоминает: «Мы сами должны были заряжать наши батареи и подучиваться стеклодувному искусству и обыкновенным приемам работы в мастерской, так как ближе Лондона механика не было» (а это — около полусотни миль от Кембриджа).

Сотрудники лаборатории, как, впрочем, и все те, кто имел дело с Максвеллом, сохранили воспоминание об его «интеллектуальном внимании и обаятельности обхождения». Всегда он был абсолютно искренен; простота и мягкость сочетались в нем с большой принципиальностью, активностью — со спокойствием. Всякий мог его критиковать — он воспринимал это с благодарностью, поскольку не был ни обидчив, ни себялюбив и даже в молодости никогда не стремился к славе. Но он вовсе не был каким-то ангелом, и многие побаивались его утонченного сарказма.

Максвелл, рассказывает Шустер, если он был здоров, «ежедневно посещал лабораторию и обходил помещения, в которых производились работы. Он расспрашивал о ходе опытов, но обыкновенно больше говорил о том, что занимало в ту минуту его мысли, так как он всегда был до такой степени поглощен собственными идеями, что не мог сразу переключиться на новый предмет. Случалось, он ничего не отвечал на обращенный к нему вопрос, заставляя сомневаться, слышал ли он его, но на следующий день он обыкновенно начинал свой разговор так: «Кстати, вы вчера задали мне вопрос,

я подумал о нем...» Затем следовал глубоко обдуманый, побуждающий к исследованию ответ. Тем, кто вступал с Максвеллом в отношения, запомнились его тонкие и остроумные замечания, придававшие такую прелесть его беседе. В то время, насколько я помню, мысли его были особенно заняты тем, что теперь называется равномерным распределением энергии. Работы Больцмана были только что опубликованы, и Максвелл, казалось, с ними соглашался, хотя и с некоторым колебанием: он не видел, как далеко они могут завести...»

Одетый скорее удобно, чем элегантно, среднего роста, плотный, Максвелл напоминал сельского джентльмена с севера Англии. Его редко видели гуляющим без собаки, а то и двух — Тоби и Гуни. С Тоби он часто появлялся в лаборатории. Казалось, он зашел сюда случайно, посреди прогулки или что он создает видимость этой случайности. Но было не так: одно время Тоби активно участвовал в опытах. Он ориентировался в лаборатории, как у себя дома и был знаком с действием некоторых аппаратов. Электрические разряды, например, всегда вызывали у него беспокойство. Его то пугали кошачьей шкуркой, усадив на изолирующую подставку, то пропускали по нему ток от машины. При этом, сидя у ног хозяйина, он лишь тихонько рычал, словно это помогало ему сохранить «душевное равновесие». В конце концов Максвелл сказал: «Лучше живая собака, чем мертвый лев!» и прекратил опыты над своим любимцем.

Немало времени у Максвелла уходило на участие в делах по руководству университетом. Как член комиссии по подготовке закона об экзаменах, он старался убедить своих коллег, что научные занятия в университете должны вестись в тесном союзе с другими научными учреждениями, что в работы по математике необходимо включать и задачи из разных отделов физики, что естественникам — для широты развития — следует «поддерживать живую связь с гуманитарными курсами Кембриджа». Обеспокоенный состоянием английской науки, Максвелл писал, что растет число профессоров и студентов, увеличивается количество учебников и популярных книг, а творческая исследовательская работа — источник благосостояния нации — падает. Польза, которую ученый, как таковой, приносит нации, измеряется количеством новых знаний, которыми он ее обогащает... нам нужны еще Фарадеи, другими словами, нужны люди, работающие над созданием новых знаний». Он говорит: «для развития науки требуется... не только, чтобы люди мыслили вообще, но чтобы они концентрировали свои мысли на той части обширного поля науки, которое в данное время требует разработки».

Сам он увлеченно занимался и небольшими, и частными вопросами (например, мог писать о способе выведения жирных пятен с одежды), но вместе с тем — такова особенность его гения — он умел намечать что называется магистральные проблемы, которые на десятилетия предопределяли направление развития научной и технической мысли.

1869 год — крупнейшая веха в истории науки: Менделеевым открыта периодическая система элементов. Максвелл проявляет большой интерес к атомистике и строению вещества. В Британской энциклопедии печатается серия его популярных статей — «Молекулы», «Атом», «Строение тел», «Эфир»... Будучи сторонником ато-

мистического учения Демокрита, Эпикура и Лукреция, он придерживался концепции неизменных атомов и молекул. «Они остаются такими, какими создал их творец». Однако он готов повторить вслед за Фарадеем: «Я не люблю слова *атом*» (в смысле «неделимый»). Его статья «Атом» начинается определением: «Атом есть тело, которое нельзя расщепить пополам». И — почти одновременно — в своей прекрасной популярной книге «Материя и движение» (1873) он писал: «Даже атом, если мы рассматриваем его, как нечто способное к вращению, должен быть представляем состоящим из многих материальных частичек». Понятия дискретности и непрерывности Максвелл рассматривал, не отдавая предпочтения ни тому, ни другому, допуская, так сказать, возможность и того и другого. «Всякое наше знание как о времени, так и о месте в сущности относительно», — писал он. И это отсутствие предубежденности позволяло ему, не владея еще достоверным знанием, проявлять большую широту в мыслях, в догадках, в прогнозах. «Великой задачей ученых нашего века является распространение наших знаний о движении вещества от тех случаев, в которых мы можем видеть и измерять движение, к тем, в которых наши чувства не могут его обнаружить». Заявление Максвелла о том, что должны существовать «молекулы электричества», было встречено, даже его учениками, скептически. Об этом вспомнили лет через двадцать, когда был открыт электрон. Максвелл был единственным, пожалуй, в Европе ученым, оценившим значение термодинамических работ американского физика-теоретика Гиббса. Словно бы предвосхищая появление гипотезы Планка, Максвелл говорил тогда: «Принципы термодинамики бросают яркий свет на все явления природы и, вероятно, многие важные применения этих принципов могут быть получены в будущем».

Он продолжал размышлять и над электромагнитной теорией, однако после «Трактата» ничего существенного к ней уже не добавил.

Работу над книгой «Электричество в элементарном изложении» Максвелл закончить не успел, она вышла посмертно.

В последние годы жизни ученый предпринял еще одно интересное исследование, относящееся к истории науки, — занялся подготовкой к изданию трудов Генри Кавендиша. Он был поражен и пленен фигурой этого великого оригинала, отшельника, отдавшего всего себя науке, сделавшего ряд замечательных открытий в физике и химии, искусного экспериментатора. Однако физических работ Кавендиш почему-то не публиковал (напечатал лишь две из них). Никому не известные, они более ста лет пролежали в архиве. Двадцать пакетов ценнейших манускриптов! Максвелл получил их в 1874 г. от герцога Девонширского. Он не только их изучил, но собственноручно все переписал, повторил большую часть описанных Кавендишем опытов и многие результаты уточнил. Такую работу никто лучше и добросовестнее Максвелла выполнить бы, конечно, не смог. Это был достойный подражания образец экспериментального, творческого подхода к историко-научным исследованиям. В итоге Максвелл открыл науке Кавендиша — физика, и в этом открытии было немало удивительного: оказалось, что Кавендиш за 12 лет до Кулона установил закон взаимодействия электрических зарядов, за 65 лет до Фарадея изучил вопрос о влиянии диэлектрика, разделяющего обкладки конденсатора, на его

емкость; он предвосхитил открытие закона Ома и т. д. Два больших тома Кавендиша увидели свет в октябре 1879 г. На пять лет растянулась у Максвелла эта работа. Он сделал огромного значения дело, но, знай он, как мало уже оставалось у него времени, он бы, наверное, за это не взялся.

Все эти годы подолгу и серьезно хворала его жена. Максвелл настоял на том, чтобы ухаживать за ней самому. Сиделкой он был искусной и самоотверженной. Однажды он три недели не ложился в постель. А еще был такой случай. Как-то он зашел в комнату жены. Спавшая там собачка Гуни, когда он наклонился над больной, цапнула его с перепуга за нос. Не издав ни звука, Максвелл вышел, бережно придерживая висевшую у него на лице собачку. Спокойствие и выдержка ему никогда не изменяли. Он был бодр, деятелен, доброжелателен. Он все успевал, и работа шла, как обычно. Он никогда ни на что не жаловался; его сдержанность с годами возрастала, словно он все больше и больше уходил в себя. Некогда отъявленный спорщик, он теперь уклонялся от споров, предпочитая, уединившись, написать о предмете спора язвительные стихи (и не только язвительные). Иногда — под секретом — он читал их своим друзьям. Иногда публиковал в «Nature», подписываясь псевдонимом $\frac{dp}{dt}$. (Кстати, одному историку

стихи ученого помогли установить, когда был впервые употреблен термин «ток смещения».) За эти годы он сильно поседел — «стал серый, как железо». Но здоровье его не вызывало опасений. Весной 1877 г. внезапно начались боли в груди, он стал задыхаться при глотании. Он никому об этом не говорил, не обращался почему-то и к врачам, хотя самочувствие его ухудшалось. Он еще держался, походка его оставалась твердой. Темные глаза на обычно бледном лице все так же сверкали мыслью, иронией, но к весне 1879 г. он настолько ослабел, что еле дотянул семестр. В лаборатории он бывал почти ежедневно, но не подолгу. В июне, сдав рукописи Кавендиша в типографию, он уехал в Гленлэр. Все надеялись, что физические упражнения и благодатный воздух родных мест, напоенный запахом близкого моря и цветущего вереска, восстановят его здоровье. Этого не случилось. Больному становилось все хуже, страдания его были ужасны; боли не прекращались, он потерял аппетит и сон. В октябре, узнав от эдинбургского врача, который его освидетельствовал, что ему остается жить не более месяца, Максвелл поспешил в Кембридж. Его главной заботой оставалась жена, прикованная в те дни к постели. Кембридж был печален. «Максвелл уходит», — говорили друг другу при встрече люди. Умер он 5 ноября 1879 г. сорока восьми лет, как и его мать и от той же болезни — рака. «Не было человека, — писал пользовавший его врач, — который бы встретил смерть с большим спокойствием и в более ясном сознании». Погребли его, после панихиды в Тринити-колледже, на Пэртонском кладбище, в Корсоке, близ Гленлэра — фамильном месте погребения Максвеллов.

Макс Планк сказал: «...по рождению он принадлежит Эдинбургу, как личность он принадлежит Кембриджу, а труды его — достояние всего мира».

Максвелл не дожил до торжества своей теории. Почти ни одно из основных ее положений не было при его жизни подтверждено

опытом, поэтому теория фактически оставалась на правах гипотезы. Маститые физики относились к ней с недоверием, а молодые — приняли ее, безоглядно в нее поверили, но, полагая (справедливо, конечно), что опыты по ее доказательству сопряжены с огромными трудностями, не помогали ей завоевать признание. Для ученого, казалось бы, нет большего несчастья, чем остаться непонятым, не увидеть победы своих идей! Однако для Максвелла это не обернулось трагедией. Он не подталкивал других, потому что не в его принципах было кому-то что-то навязывать, но и сам ничего не предпринимал, спокойно предоставив событиям идти своим чередом (эту черту мы встретим потом у Эйнштейна). Так что ни подтверждение гипотезы о токе смещения, ни открытие электромагнитных волн и светового давления — все это дело рук не английских физиков. Но английские физики тоже внесли лепту в разработку и распространение теории своего великого соотечественника. Назовем хотя бы О. Хевисайда, Д. Пойнтинга, А. Шустера, Дж. Дж. Томсона. Шустер в 1875/76 учебном году в Оуэн-колледже (Манчестер) прочитал первый систематический курс физики, основанный на теории Максвелла. «Сэр Джозеф Томсон, — вспоминает он, — был одним из трех (!) студентов, которые слушали мой курс».

«Научная слава Максвелла при его жизни поддерживалась главным образом британскими теоретиками физики, особенно Кавендишской школы, — писал Д. Лармор. — Но с тех пор, как Гельмгольд занялся изучением его теории... и подвергнул ее обсуждению в многочисленных серьезных работах, внимание, уделявшееся произведениям Максвелла за границей, стало возрастать...» Горячим пропагандистом идей Максвелла в Германии выступил также Больцман, благодаря которому электромагнитная теория в значительной степени перестала быть «книгой за семью печатями». И все же до работ Генриха Герца, занявшегося получением электромагнитных волн по совету Гельмгольца, теория Максвелла не была широко известна на континенте.

Электромагнитные волны Герц получил в 1888 г. После этого уже ничто не могло остановить победоносного шествия теории Максвелла. П. Н. Лебедев, учившийся тогда в Страсбургском университете, вспоминал потом характерный эпизод. За год до опытов Герца курс теоретической оптики у них читал профессор Э. Кон. Этот курс был построен на основе классической теории Юнга — Френеля, т. е. на механической теории света. Курс был большой — по четыре часа в неделю, но взглядам Максвелла, преподносимым к тому же как некий курьез, отводилось всего... полчаса на одной из заключительных лекций. А в 1889 г. профессор Кон тот же курс читал уже полностью на основе теории Максвелла. Так стремительно утверждалась в науке фарадей-максвелловская теория! Она словно брала реванш за десятилетия пренебрежения и унижительного к ней недоверия.

Герц (в одно время с О. Хевисайдом) придал уравнениям Максвелла их современную форму. Больцман по этому поводу замечает: «Я мог бы сказать, что последователи Максвелла в этих уравнениях, пожалуй, ничего кроме букв не переменили. Однако это было бы слишком. Конечно, не тому следует удивляться, что к этим уравнениям вообще что-то могло бы быть добавлено, а гораздо более тому, как мало к ним было добавлено».

В той борьбе за утверждение теории Максвелла, которая велась в науке на разных этапах, исключительная заслуга принадлежит русским ученым. А. Г. Столетов был не только активным пропагандистом первых статей Максвелла, он предложил свой метод для экспериментального измерения «постоянной Максвелла», выражающей скорость распространения волны. В «Трактате» Максвелл потом отметил, что метод Столетова является одним из самых надежных и точных.

Для подтверждения теории Максвелла важное значение имела проверка соотношения $n^2 = \epsilon$ (квадрат показателя преломления равен диэлектрической постоянной). В 1872—1874 гг. Больцман предпринял серию работ по проверке и уточнению n и ϵ для ряда твердых и газообразных тел. В 1874 г. ученик Столетова Н. Н. Шиллер, следуя указаниям Максвелла, первым стал измерять диэлектрические постоянные в переменных магнитных полях. А через год П. А. Зилов провел в лаборатории Столетова измерение диэлектрических постоянных жидкостей. О точности и большом значении результатов Больцмана, Шиллера и Зилова Максвелл писал в своей последней книге «Электричество в элементарном изложении», которую в 1886 г. издал киевский профессор М. П. Авенариус. Это была первая на русском языке книга Максвелла.

Замечательный русский физик Н. А. Умов, введя в 1873 г. (правда, независимо от максвелловской концепции) понятие о движении и потоке энергии, сделал существенный вклад в разработку теории поля. Умов с восхищением отзывался о теории Максвелла. «Работу Максвелла, — писал он, — можно сравнить с работой художника, разбившего вазу с изящным рисунком и из черепков этой вазы построившего новую. Получился новый рисунок, составленный из элементов старого...»

После опытов Герца борьба за теорию Максвелла вступила в новую фазу. И вновь русская физика заняла самые передовые, а в ряде направлений и главенствующие позиции. У. Брэгг говорит: «После того как Максвелл сформулировал четыре математических уравнения... радио, как мы теперь называем его, стало возможным». Эту возможность впервые осуществил А. С. Попов, который в мае 1895 г. произвел передачу и прием радиосигналов. Изобретение Попова вывело теорию Максвелла в широкий мир техники и многочисленных ее приложений. В том же году П. Н. Лебедев получил самые короткие (6 мм) электромагнитные волны, а еще через четыре года доказал существование светового давления. Опыты Лебедева имели для подтверждения теории Максвелла огромное значение. Лорд Кельвин, издавая скептически относясь к электромагнитной теории, признался потом К. А. Тимирязеву: «Вы, может быть, знаете, что я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот ваш Лебедев заставил меня сдаться!» Работы последующего поколения русских ученых (А. А. Эйхенвальда, Д. С. Рождественского, В. Ф. Миткевича, А. А. Глаголевой-Аркадьевой и др.) еще более упрочили и развили теорию Максвелла. Таким образом, практика — критерий истины — подтвердила истинность электромагнитной теории.

Максвелл никогда не ставил перед собой задачи — дать законченную картину мира, но исторически сложилось так, что ему и Гельмгольцу суждено было завершить картину мира классической физики, начатую Галилеем и Ньютоном. «Имя его блистает на вра-

тах классической физики», — сказал М. Планк. Но, вместе с тем, Максвелл — это и конец классической физики.

Опираясь на теорию Максвелла, Г. А. Лоренц построил свою электронную теорию. Максвелл является одним из главных предшественников Эйнштейна, родившегося в год его смерти. Эйнштейн писал, что «теория относительности обязана своим возникновением уравнениям Максвелла для электромагнитного поля». И — в другом месте: «Теория Максвелла — Лоренца неизбежно вела к специальной теории относительности». Эйнштейн освещает и такой интересный вопрос — а что дала теория относительности теории Максвелла, «своей родительнице»: «До того времени электрические и магнитные поля считали существующими независимо, хотя между этими двумя видами поля благодаря уравнениям Максвелла и устанавливалась тесная причинная связь. Но специальная теория относительности показала, что эта причинная связь есть проявление тождественной сущности двух видов поля» («Новая теория поля. I», 1929 г.). И тем не менее теория Максвелла получила от теории относительности несколько серьезных ударов, поколебавших ее основы. Но еще более сильные удары ей нанесла квантовая теория излучения Планка, возникающая в начале XX в. на стыке термодинамики и оптики. (Одним из истоков теории квантов была динамическая теория газов Максвелла). Максвелл учил: «Из всех гипотез... выбирайте ту, которая не пресекает дальнейшего мышления об исследуемых вещах». К ужасу многих, в том числе и самого Планка, казалось, что под ударами теории квантов электромагнитная теория вот-вот рухнет. Но она выстояла и даже сохранила свое значение.

В статье о Фарадее Максвелл писал: «...мы не знаем даже названия той науки, которая вырастет из ныне собираемых нами материалов...» Истинный смысл теории Максвелла раскрывается только теперь; вместе с тем становится ясным, что даже сам Максвелл, не говоря о его современниках, еще не вполне представлял себе всю неисчерпаемую глубину, все значение своего открытия. (В истории науки такое случалось не однажды!) Это тонко почувствовал уже Герц, писавший: «Нельзя изучать эту удивительную теорию, не испытывая по временам такого чувства, как будто в математических формулах есть самостоятельная жизнь, собственный разум — как будто они умнее нас, умнее даже самого автора, как будто они дают нам больше, чем в свое время было в них вложено».

«Как за Ньютоном последовала эпоха математического оформления механики, так отныне наступила пора математической обработки теории Максвелла, — писал Макс Лауэ. — В современном изложении теория Максвелла является замечательным творением, равноценным механике».

Максвелл говорил: «...прямая цель всякого научного труда — раскрывать тайны природы». Один из величайших естествоиспытателей всех времен, Максвелл с честью служил этой высокой цели. Огромного охвата ум, он поднимал и решил такие проблемы, которые питают науку вот уже целое столетие. В нем органически соединился гениальный теоретик и блестящий экспериментатор, проницательный математик и мудрый натурфилософ; его пылкую научную фантазию постоянно контролировала трезвость практика. Он был материалистом, однако материализм его — непоследовательный, подчас механистический. По складу интеллекта Максвелл близок

Фарадею, по работам иным методом, что позволило ему продвинуться дальше учителя. Глубина сочеталась в нем с необыкновенной разносторонностью; его научное наследие и обширно, и разнообразно: тут и работы по теории электричества и оптике, по механике и астрономии, по молекулярно-кинетической теории газов и теории сооружений, по математике и машиностроению, по методам электрических измерений и по истории науки. Его перу принадлежит ряд образцовых популярных статей и книг, интересно и богато его эпистолярное наследие. «Всякий великий человек,— писал Максвелл,— является единственным в своем роде. В историческом шествии ученых у каждого из них своя определенная задача и свое определенное место». Имя Максвелла прочно и навсегда вошло в науку. Мы говорим: «электромагнитная теория Максвелла», «закон Максвелла», «распределение Максвелла», «статистика Максвелла — Больцмана», «число Максвелла», «маятник Максвелла», «диск Максвелла», «правило Максвелла» (правило винта), «ток Максвелла» (ток смещения), *максвелл* — единица измерения магнитного потока в системе ЦГС...

В свое время в Кавендишской лаборатории была учреждена стипендия имени Максвелла. «Она дается на три года лучшему из работающих в лаборатории, и получение ее считается большой честью»,— писал П. Л. Капица, которому она была присуждена в 1923 г.

Теория Максвелла сыграла огромную роль не только в науке, но и в духовном развитии человечества.

В 1931 г. широко отмечалось 100-летие со дня рождения великого ученого. На торжества в Англию съехались делегаты от ученых корпораций всего мира. 30 сентября в Вестминстерском аббатстве, неподалеку от надгробия Ньютона, были открыты мемориальные доски Фарадея и Максвелла. 1 и 2 октября с речами выступили Резерфорд, Планк, Бор, Джинс... Для юбилейного сборника написали статьи Эйнштейн и ряд других физиков.

Темой выступления Нильса Бора было — Максвелл и современная теоретическая физика. Говоря «о применении электромагнитной теории к проблеме строения атома, где теория Максвелла не только была исключительно плодотворна в истолковании явлений, но дала максимум того, что может дать какая бы то ни было теория», Бор отметил, что применение идей Максвелла к атомной теории «само по себе составляет целую главу физики». И — далее: «Когда приходится слышать как физики в наши дни толкуют об электронных волнах и фотонах, может показаться, пожалуй, что мы полностью оставили почву, на которой строили Ньютон и Максвелл». Однако, подчеркнул Бор, «теория Максвелла не перестала использоваться в качестве направляющего начала и на позднейшей стадии развития атомной теории. Хотя фундаментальное открытие лордом Резерфордом атомного ядра, приведшее к замечательному завершению наших представлений об атоме, ярче всего обнаружило ограниченность обычной механики и электродинамики, единственным путем развития в этой области осталось сохранение возможно более тесного контакта с классическими идеями Ньютона и Максвелла».

Так «старик Максвелл» входит в новую и новейшую физику — в наше время.

Роль Максвелла в развитии кинетической теории газов

В 1859—1860 гг. Максвелл развил ряд фундаментальных положений кинетической теории газов.

Кинетическая теория газов с момента ее возникновения базировалась на представлениях о дискретном строении всех тел и о беспорядочном непрерывном движении дискретных частиц, образующих газообразные тела. В самом начале своего трактата «Пояснение к динамической теории газов» Максвелл писал: «Из гипотезы, согласно которой мельчайшие частицы материи находятся в быстром движении, причем скорость этого движения возрастает с температурой, может быть выведено так много свойств материи, в особенности если ее взять в газообразной форме,— что истинная природа этого движения является предметом естественного интереса¹».

Учение о дискретной структуре материи восходит к глубокой древности. Атомистику древности и средневековья, натурфилософскую по своему существу, можно условно расчленить на «физическую атомистику» и «математический атомизм», тесно переплетающиеся между собой². В начале XVII в. возрождается «физическая атомистика» (Гассенди), но уже последующее ее развитие шло иными путями. Атомистика Галилея, Декарта, Бойля, Ньютона, как и вся атомистика середины и второй половины XVII в., связана в явном или скрытом виде с новыми задачами механики, физики и математики. На ее основе в XVIII в. развилась атомистика Бернулли, Лесажа, Ломоносова, Бошковича и многих других, промежуточное звено между атомистиками XVIII и XIX вв. Кинетическая теория газов генетически связана со всей атомистикой в целом, но непосредственно базируется на атомистике XIX в.³

¹ Д. К. Максвелл. Пояснения к динамической теории газов. В кн.: «Основатели кинетической теории материи». М., ОНТИ, 1937, стр. 187.

² K. L a s s w i t z. Geschichte der Atomistik. Bd. I, II.

³ В. П. Зубов. Развитие атомистических представлений до начала XIX в. М., изд-во «Наука», 1965.

В 1801 г. Дальтон применил атомистическую гипотезу для объяснения закона парциальных давлений. Работы Авогадро и Ампера, как и дальнейшие работы Дальтона, были тем новым этапом в развитии атомистики, который непосредственно привел к кинетической теории газов.

Учение о беспорядочном непрерывном движении частиц газов начало усиленно разрабатываться после того, как Румфорд обратил внимание на выделение тепла при сверлении стволов пушек и подметил противоречие этого явления с господствовавшей теорией теплорода. В 1798 г. Румфорд объяснил нагревание стволов пушек тем, что теплота есть особый род движения. «Совершенно необходимо добавить, что это нечто, которое любое *изолированное* тело или система тел может непрерывно поставлять *без ограничения*, не может быть *материальной субстанцией*; и мне кажется чрезвычайно трудным, если не совершенно невозможным, создать какую-либо точную идею о чем-то, что в состоянии возбуждаться и передаваться подобно тому, как возбуждается и передается в этих экспериментах теплота; если только не допустить, что это что-то есть движение»¹

Максвелл называет в качестве своих прямых предшественников Даниеля Бернулли, Герапата, Джоуля, Кренига, Клаузиуса и других, показавших, что отношения между давлением, температурой и плотностью в идеальном газе можно объяснить, полагая, что частицы движутся прямолинейно и равномерно, ударяются о стенки сосуда, содержащего газ, создавая тем самым давление.

В приведенной работе Максвелл не ставил перед собой задачи анализировать генезис кинетических представлений и дифференцировать взгляды их творцов.

Уже в 1845 г. Ватерстон представил для опубликования статью «О физической среде, состоящей из свободных и вполне упругих молекул, находящихся в движении», (опубликована Рэлеем в 1892 г.)². В 1850 г. Ранкин рассматривает теплоту, как скрытое движение частиц³. В 1851 г. в работе «Некоторые замечания о теплоте и о строении упругих жидкостей»⁴ он объясняет ряд свойств газов, полагая, что частицы движутся прямолинейно и равномерно. Джоуль полагал, что гипотеза Дэви о вращательном движении молекул также позволяет объяснить некоторые газовые законы. Он писал: «Я лично попытался показать, что вращательное движение, аналогичное описанному Дэви, способно объяснить закон Бойля — Мариотта, а также и другие явления, представляемые упругими жидкостями. (М-р Ранкин в своей работе «О механическом действии газов и паров» дал полное математическое исследование действия вихрей.) Тем не менее, принимая во внимание, что гипотеза Герапата, в которой допускается, что частицы газа постоянно летают во всех направлениях с большой скоростью и что давление газа обязано своим происхождением натиску частиц на всякую по-

¹ Цит. по кн.: А. Эйнштейн, Л. Инфельд. Эволюция физики. М., изд-во «Наука», 1965, стр. 40.

² J. Waterston. «Phil. Trans» (A), 1892, 183, p. 1—80.

³ W. Rankine. Miscellaneous scientific papers, p. 16.

⁴ См. сб.: «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 31—38.

ставленную против них поверхность,— несколько проще, я воспользуюсь ею в своих последующих замечаниях о строении упругой жидкости...»¹

В 1856 г. в работе «Grundzüge einer Theorie der Gase»² Крениг выдвинул гипотезу, согласно которой газы состоят из атомов. Эти атомы можно уподобить твердым идеальным упругим шарам. Атомы движутся с определенными скоростями в вакууме. Движение атома газа продолжается до тех пор, пока он не сталкивается с другим атомом. Столкновение может произойти и со стенкой. Взаимодействие между атомами происходит при их соприкосновении на малом расстоянии.

Крениг рассмотрел прямоугольный параллелепипед, в котором атомы, одинаковые по величине, движутся с равными скоростями по трем направлениям, параллельно ребрам параллелепипеда. Число ударов об стенку пропорционально его скорости и обратно пропорционально двойному ребру. Крениг рассматривает гладкую стенку как очень неровную по отношению к атомам газа. Эта неровность создает беспорядочность в траекториях атомов. Беспорядочность траектории не поддается никакому расчету. Однако Крениг полагает, что понятие вероятности, введенное в теорию, устраняет не поддающуюся расчету беспорядочность. Идеализация полной упорядоченности атомов — результат применения теории вероятности. Допустив равномерное распределение скоростей, Крениг

получил для давления на стенку величину $p = mc \frac{c}{2x} \frac{n}{3}$, где m — масса атома, c — скорость атома, $\frac{c}{2x}$ — число ударов, производимых в одну секунду на одну из стенок, n — число атомов, содержащихся в сосуде. Давление на единицу площади $p = mc \frac{c}{2x} \frac{n}{3} \times \frac{1}{yz} = \frac{1}{6} \frac{nmcs^2}{V}$, откуда $pV = \frac{1}{6} nmcs^2$. Неправильный подсчет импульса привел к величине $\frac{1}{6}$ вместо $\frac{1}{3}$. Таким путем можно получить не только закон Бойля — Мариотта, но и закон Гей-Люссака и Авогадро. Крениг рассмотрел также вопрос об отклонениях от этих законов. Идеи, им высказанные, привлекли к себе внимание Р. Клаузиуса.

В 1860 г. Максвелл сделал решительный шаг в развитии кинетической теории газов, дав впервые вывод закона распределения скоростей газовых молекул. Максвелл решил ряд задач, сформулированных им в виде предложений. В первом предложении рассматривается чисто механическая задача.

Два совершенно упругих шара, движущихся в противоположных направлениях со скоростями, обратно пропорциональными их массам, сталкиваются друг с другом. Легко доказать, что скорости каждого шара остаются одними и теми же до и после удара и что направления их до и после удара лежат в одной плоскости с линией центров и образуют с ней одинаковые углы. Во втором предложении вводится понятие вероятности, новое для физики того

¹ См. сб.: «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 36.

² «Ann. Physik», 1856, Bd. 99, S. 315.

времени. Определяется вероятность того, что направление скорости после удара лежит между заданными пределами, а также равновероятность всех направлений отражения. Максвелл полагает, что столкновения между молекулами газа приводит не к выравниванию скоростей, а к статистическому их распределению.

Работы Максвелла были важнейшим шагом в дальнейшем развитии кинетической теории. До этого средняя скорость газовых частиц вычислялась в предположении, что давление в любом замкнутом объеме одинаково по всем направлениям. Поскольку невыполнимость этого условия была очевидна, то, естественно, возникал вопрос, насколько скорости отдельных молекул способны отклониться от средних скоростей. Эта задача была поставлена и впервые разрешена Максвеллом. Четвертое положение Максвелла, в котором определялось среднее число частиц, скорости которых лежат между заданными пределами после большого числа столкновений между большим числом одинаковых частиц, далеко выходило за пределы общепринятых тогда методов. Оно проложило путь в новую область, оказавшуюся крайне плодотворной для атомистики.

Получив функциональное уравнение, которому удовлетворяет несложного вида функция $f(x) = \frac{1}{\alpha \sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{\alpha^2}}$, Максвелл вывел четыре заключения:

1. Число частиц, скорость которых, разложенная в определенном направлении, лежит между x и $x + dx$, равно $N \frac{1}{\alpha \sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{\alpha^2}} dx$,

где N — общее число частиц, x, y, z — составляющие скорости.

2. Число частиц, действительные скорости которых лежат между v и $v + dv$, равно $N \frac{4}{\alpha^3 \sqrt{\pi}} v^2 e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}} dv$.

3. Среднее значение скорости $\bar{v} = \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}}$.

4. Среднее значение квадрата скорости $\overline{v^2} = \frac{3}{2} \alpha^2$.

Выводы Максвелла, однозначно вытекавшие из основных предположений, означали, что в каждом газе при совершенно равномерной температуре возможны самые различные скорости, но очень большие и очень малые скорости имеют весьма незначительные вероятности. Молекулы движутся главным образом со средними скоростями. Вероятности для каждой из координат у Максвелла выражены одинаково и при составлении основного функционального уравнения перемножаются. Перемножение вероятностей возможно только в том случае, если составляющие данного сложного события независимы друг от друга. Многие, не без основания, считали, что это положение требует дополнительного доказательства, а потому данное Максвеллом обоснование закона распределения скоростей рассматривали как недостаточно строгое.

В то время гипотетическими были исходные представления о молекулах и их движении. Непосредственных опытов, доказыва-

ющих правильность распределения Максвелла, не существовало. Надо отметить, что опытное подтверждение закона Максвелла и в дальнейшем было дано первоначально не на молекулах, а на ионах, благодаря тому, что заряд иона позволяет легко им управлять. Лишь в дальнейшем был разработан экспериментальный метод непосредственной проверки закона Максвелла. При этих условиях строгость методов приобретала для молекулярно-кинетической теории и атомистики особое значение. Анализируя работы Максвелла, Джинс писал: «При помощи соображений, которые, казалось бы, не имели никакого отношения ни к молекулам, ни к динамике их движений, ни к логике, ни даже к здравому смыслу, Максвелл нашел формулу, которая, согласно всем прецедентам и всем правилам научной философии, должна была бы быть безнадежно неправильной. В действительности же, как было впоследствии доказано, она вполне правильна и до наших дней известна как закон Максвелла».

Максвелл был твердо убежден в существовании молекул. Не колеблясь, он ставит атомистику наряду с учением о континууме. Здесь было нечто новое по сравнению с атомизмом Пуассона, Коши. Это новое состояло в стремлении получить картину движения частиц, описываемых уравнениями, определяющими вероятностные состояния. Для атомистики особое значение приобрели VI и XII предложения. В предложении VI доказано, что если две системы частиц движутся в одном и том же сосуде, то средняя живая сила каждой частицы одинакова в обеих системах.

В предложении XII определено давление на единицу площади стенки сосуда, вызванное ударами молекул о стенку.

Посредством этих положений Максвелл приходит к выводу одного из фундаментальных положений атомистики — закону Авогадро.

«Мы видели,— пишет Максвелл,— что на основании гипотезы об упругих частицах, движущихся по прямолинейным путям, давление газа может быть объяснено, если исходить из допущения, что квадрат скорости прямо пропорционален абсолютной температуре и обратно пропорционален удельному весу газа при постоянной температуре, так что при одном и том же давлении и одной и той же температуре $N M v^2$ является общим для всех газов. Но в предложении VI мы установили, что, когда две группы частиц передают друг другу свое движение, то $M v^2$ в каждом из них имеет одно и то же значение. Отсюда следует, что N , число частиц в единице объема, является при равном давлении и равной температуре одинаковым для всех газов. Этот вывод находится в согласии с законом химии, в силу которого равные объемы газов химически эквивалентны»¹.

В 1868 г. Максвелл, исходя из более строгих положений, дал другое доказательство закона распределения.

Внутреннее сопротивление при движении «капельных жидкостей» экспериментально исследовалось Кулоном уже в начале XIX в. (1800)². Сэби (1929) показал, что замедление колебания

¹ Д. К. Максвелл, Пояснения к динамической теории газов, В сб.: «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 201.

² Ch. A. Coulomb. Expériences destinées à déterminer la cohérence des fluides et les lois de leur résistance dans le mouvements très lents. «Mem. de l'inst.». P., 1800, v. III, p. 246—305.

маятника зависит от того, происходили ли эти колебания в сосуде, наполненном при одном и том же давлении воздухом или водородом. Замедления маятника оказались не пропорциональными плотностям газов¹. Гаген² и Пуазель³ исследовали внутреннее сопротивление при течении жидкости в узких трубках. Общее направление работ по трению и вязкости было преимущественно экспериментальным.

В 1860 г. Максвелл предложил объяснение механизма внутреннего трения в газах, основанное на кинетической теории газов. Молекулы определенного слоя, движущегося с определенной скоростью в направлении оси X наряду с упорядоченным движением, обладают хаотическим движением во всех направлениях. Определенное число молекул переходит из верхнего слоя в менее быстро движущийся слой, расположенный под ним, и при столкновении передают им часть своего количества движения. В результате происходит торможение верхнего слоя и ускорение нижнего слоя. Медленнее движущиеся молекулы нижнего слоя, проникая в верхний слой, при столкновении с молекулами верхнего слоя также увеличивают свое количество движения.

В предложении XIII Максвелл определяет внутренне трение в системе движения частиц.

$$F = \frac{1}{3} \rho l v \frac{du}{dz} = \mu \frac{du}{dz},$$

$$\mu = \frac{1}{3} \rho l v = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{Mv}{\pi s^2}},$$

где ρ — плотность, μ — коэффициент трения, l — средняя длина пути частиц, v — средняя скорость, s — расстояние между центрами в момент столкновения, M — масса частиц. Эти формулы позволяют определить среднюю длину пути частицы между двумя последовательными столкновениями. Максвелл считал удивительным то, что коэффициент трения не зависит от плотности. Он писал: «Этот вывод из математической теории является крайне поразительным и единственный опыт, с которым я встретился в этой области, его как будто не подтверждает»⁴. В 1866 г. Максвелл провел опыты по методу, найденному Кулоном. Одновременно такие же опыты произвел О. Э. Мейер. Результаты этих опытов широко известны.

Перенос количества движения молекул из одной области в другую приводит к выравниванию скоростей и с этим связаны вязкость и трение. При отсутствии теплового равновесия в газе имеют место потоки молекул — диффузия и потоки энергии.

¹ E. Sabin. On the reduction to a vacuum of the vibrations of an invariable pendulum. «Phil. Trans», 1829, p 207—239.

² G. Hagen. Ueber die Bewegung des Wassers in engen cylindrischen Röhren. «Pogg. Ann.», 1839, 46, S. 423—442.

³ L. Poiseuille. Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètres. C. R. 1840, 11, 961—967, 1041—1048; 1841, 12, 112—115; «Pogg. Ann.», 1843, 58, 424—447.

⁴ В сб.: «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., ОНТИ, стр. 203.

Потоки энергии связаны с переходом энергии теплового движения молекул из одной области газа в другую (теплопроводность). Все явления переноса кинетическая теория газов Максвелла позволяла рассматривать с единой точки зрения. Дальнейшие опыты и строгий анализ теории показали, что закон Максвелла должен быть видоизменен, не нарушая при этом целостности атомистической картины мира.

Творцы кинетической теории, опираясь на атомистику, одновременно развивали и ряд основных ее положений. В речи, произнесенной на съезде Британской ассоциации в Бредфорде в 1873 г., Максвелл тесно связывает вопросы атомистики с общеполософскими проблемами конечности и бесконечности. «Человеческий ум, — пишет он, — в недоумении останавливается перед многими трудными вопросами. Бесконечно ли пространство, и если да, то в каком смысле? Бесконечен ли по своему протяжению материальный мир, и все ли места внутри того, что протяженно, также наполнены материей? Существуют ли атомы, если материя делима до бесконечности?»¹. В этой же речи Максвелл отмечает, во-первых, переход от уравнений динамики к статистическому методу, не имеющему притязаний на абсолютную точность, свойственную законам абстрактной динамики, и, во-вторых, то, что мы наряду с этим твердо узнаем, что молекулы образованы по одному и тому же типу. Максвелл подробно анализирует три рода диффузии — материи, количества движения и энергии.

В 1875 г. в лекции «О динамическом доказательстве молекулярного строения тел» Максвелл обратился к вопросу о возможности молекулярной структуры эфира. Для атомистики XIX в. вопрос этот при той роли, какая придана была эфиру, стал существенным. «Прежде всего, — пишет Максвелл, — молекулярный эфир был бы не чем иным, как газом. Мы можем, если хотим, предположить, что каждая из его молекул равна одной тысячной, одной миллионной части молекулы водорода и что они могут свободно проходить в промежутке между обычными молекулами, но, как мы видим, само собой установилось бы равновесие между движением обычных молекул и движением молекул эфира. Другими словами, эфир и находящиеся в нем тела стремились бы к уравниванию температуры и эфир подчинялся бы в отношении давления и температуры обычным газовым законам. Среди других свойств газов он обладал бы и свойством, установленным Дюлонгом и Пти и заключающимся в том, что теплоемкость единицы объема эфира должна была бы быть равна теплоемкости единицы объема любого обычного газа при том же давлении. Поэтому мы обязательно обнаружили бы его присутствие при наших опытах с удельной теплотой, так что мы можем утверждать, что эфир не обладает молекулярным строением»².

В статье «Атом» Максвелл уточняет основные понятия атомистики, дает краткий исторический очерк ее развития, анализ современной ему молекулярной физики и, в частности, молекулярной теории газов, анализирует возможность дискретной структуры эфира

¹ Д. К. Максвелл. Молекулы. (Речь, произнесенная на съезде Британской ассоциации в Бредфорде.) Опубликовано в «Nature», 1875, 8. См. стр. 71 в этом сборнике.

² «Nature», 1875, т. XI. См. стр. 119 в этом сборнике.

ра, указывает на различия между динамической и химической трактовками молекулы.

«Химики, — пишет Максвелл, — убеждаются опытом, каковы отношения масс различных веществ в соединении. Отсюда они выводят эквиваленты различных веществ, взяв за единицу химической эквивалент одного вещества, скажем водорода. Свои доводы, на которые они опираются, они заимствуют исключительно из химических соединений. Таким образом, чтобы дать себе отчет в фактах, являемых соединениями, допускается, что причина, почему вещества соединяются в определенных отношениях, заключается в том, что молекулы веществ находятся в отношении своих химических эквивалентов и что то, что мы называем соединением, есть некоторое действие, имеющее место, когда молекулы одного вещества соединяются с молекулой другого»¹.

Отдав должное химическим исследованиям, Максвелл анализирует тот вклад, который внесла кинетическая теория в трактовку о молекулах, используя чисто динамические методы.

Учение о центральных силах не явилось ни основным, ни решающим как в развитии атомистики, так и в развитии кинетической теории газов. Уже в конце XIX в. Больцман усмотрел, что слияние кинетической теории с учением о центральных силах — явление чисто случайное и отметил другую интересную связь теории газов с электродинамикой. Сходство теории газов с электродинамикой заключается в том, что видимое движение газа, внутреннее трение и тепло рассматриваются как явления, кажущиеся существенно различными только в стационарных или приближенно стационарных состояниях, тогда как в переходных случаях невозможно резко разделить видимые движения от тепловых. В электродинамике Максвелла в переходных случаях также невозможно провести разделение электростатических и электродинамических сил. «Как раз, — пишет Больцман, — в этих переходных областях теория электричества Максвелла внесла нечто совершенное новое. Также и теория газов в таких переходных случаях приводит к совсем новым законам, из которых вытекают обычные гидродинамические уравнения, исправленные на трение и теплопроводность только как приближенные формулы...»². Интересно отметить, что хотя структуры теории газов электричества не идентичны, но прерывистая структура, присущая самим объектам, сказалась во многом, в том числе и в том, что методы, разработанные в кинетической теории газов, применимы и к электронной теории металлов.

У Максвелла мы встречаем живой интерес ко многим другим аспектам атомистики. Он отмечает, что свойства вихревых колец подари В. Томсону мысль построить новую форму атомистической теории. Вихревое кольцо Гельмгольца, которое Томсон считает истинной формой атома, количественно неизменно в отношении его объема и напряжения, а качественно — в отношении степени сложности его внутреннего строения. Наряду с тем оно способно и к бесконечным изменениям формы и может совершать колебания различных периодов подобно молекуле. Высшее достоинство вих-

¹ См. стр. 133 в этом сборнике

² Л. Больцман. Лекции по теории газов. М., ГТТИ, 1953, стр. 25.

ревой теории атома Максвелл усматривает в том, что она не допускает введения гипотетических спл. Подробно также анализирует Максвелл вопрос о теории массы у Томсона. Он писал: «...одно из первых, если не самое первое требование полной теории материи есть объяснение, во-первых, массы и, во-вторых, тяготения. Объяснить массу — это может показаться предприятием абсурдным. Мы вообще предполагаем, что сущность материи — быть носителем количества движения и энергии, и даже Томсон в определении своей основной жидкости приписывает ей обладание массой. Однако, согласно Томсону, хотя основная жидкость и есть единственная истинная материя, но то, что мы называем материей, не есть сама основная жидкость, а способ движения этой основной жидкости. Вихревое кольцо и есть этот способ движения, и оно являет нам пример постоянства...материи. Основная жидкость, эта единственная истинная материя, совершенно недоступна нашим чувствам, если она не наделена способом движения, превращающим известные ее участки в вихревые кольца и таким образом делающим ее молекулярной. Следовательно, в теории Томсона масса тел требует объяснения. Нам нужно объяснить инерцию чего-то, что есть лишь способ движения, инерция же есть свойство материи, а не способа движения...»¹.

Яркая оценка деятельности Максвелла в развитии кинетической теории газов была дана Ланжевенем. Часто случается, писал Ланжевен, что особенная форма индивидуальных законов ступивается или даже исчезает, когда исследователь переходит к целому, в котором некоторые свойства лишь результат очень большого числа имеющихся элементов, и подчинены исключительно статистическим выводам. В таком случае принципы и законы должны дать повод к значительным отклонениям и колебаниям.

Наблюдение над отклонениями в весьма различных областях принесло физике убедительные аргументы в пользу существования прерывных элементов и дало общий и точный метод определения количества и величины этих элементов. Чтобы создать эту физику прерывности, следует использовать данные статистики и беспрестанно пользоваться вычислениями теории вероятностей. Введение же в физику теории вероятностей было впервые осуществлено Максвеллом в связи с кинетической теорией газов. «Легко себе представить, что применение этого способа расчетов, зачастую весьма сложного, к совершенно новой области, не могло осуществиться сразу... Первые заключения Максвелла страдали отсутствием необходимой точности и вызвали возражения, которые, наряду с трудностями вычислений, препятствовали большинству физиков уделить кинетической теории заслуженное ею внимание и признать все совершенство полученных результатов...»².

Дальнейшее развитие физики целиком оправдало это чужеродное для классической физики направление, показав одновременно неизбежность и правомерность тех упрощений, которые были допущены при обосновании теории.

У. И. Франкфурт

¹ См. стр. 151—152 в этом сборнике.

² П. Ланжевен. Физика прерывности. (В кн.: П. Ланжевен. Избранные произведения. М., ИЛ, 1949, стр. 256—257).

Некоторые замечания к электродинамике Максвелла

Анализируя научное творчество Д. К. Максвелла, М. Планк писал: «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.

...В каждой из этих областей Максвелл поощрительно влиял своими плодотворными идеями на ход развития науки»¹.

Идея атомов и идея эфира, как идеи дискретности и непрерывности, переплетались уже начиная с XVII в. весьма сложным образом. Замечание Вольтера, что в Париже считают Вселенную состоящей из вихрей тонкой материи, а в Лондоне ничего этого не признают, было, по существу, характеристикой отношения к двум физическим концепциям: эфира и атомизма, непрерывности и дискретности, и одновременно метко охватывало отношение «физики принципов» к «декартовым вихрям».

Гюйгенс, первый из физиков, давший стройную картину световых явлений на основе представлений о существовании упругого эфира, не отвергал атомистическую структуру самого эфира. Он писал, что если бы даже мы не знали истинной причины упругости, то все же мы постоянно видим, что этим свойством обладают многие тела, и нет ничего странного в предположении, что им обладают также и весьма маленькие невидимые частицы эфира. Он полагал, что в природе существует бесконечная иерархия частиц, различных по своей величине и по своим кинематическим характеристикам. У Ньютона иерархия частиц и эфир, неоднозначный по свойствам и структуре, носит иной характер, однако более существенно то, что уже в XVII в. совокупность фактов, подлежащих объяснению, не позволяла отвлечься ни от континуальных свойств материи, ни от ее дискретных особенностей. В XVII в. возник и другой вопрос, доминирующий в творчестве Максвелла, вопрос о том, какие свойства существенны для среды, способной передавать волны или переносить частицы со ско-

¹ М. Планк. Единство физической картины мира. М., «Наука», 1956, стр. 171.

ростью, близкой к скорости света. В качестве основных свойств рассматривали упругость и инерцию, но анализ первого из них был связан с атомистикой, поэтому вынуждены были ограничиваться моделированием эфира, не прибегая к более глубокому анализу самой природы упругости. В XVIII в. основные трудности, которые приходилось преодолевать эфирной теории, касались не структуры эфира, не противоречивости его свойств, хотя и они не были преодолены, а проблем подвижности и неподвижности. В 1725 г. Брайлей во время поисков годичных параллаксов звезд обнаружил изменение видимого положения звезды на небесной сфере. Это изменение было легко объяснить тем, что Земля движется вокруг Солнца и непрерывно меняет направление своего движения относительно звезд. Абберрация звезд существует как кинематический эффект, в котором движение эфира не отражается, и именно это, как это ни парадоксально, позволяло судить о некоторых его свойствах уже структурного характера. Если существует какое-нибудь скольжение слоев эфира, то это должно давать дополнительные абберрационные явления иного порядка, чем действительно наблюдаемые. Явление абберрации оказалось трудно объяснимым в модели подвижного эфира. Эти вопросы, как мы знаем, также привлекли к себе внимание Максвелла.

Три теории — корпускулярная теория Гассенди — Бошковича, теория Ньютона и волновая теория Гюйгенса — опирались в конце XVII в. на ограниченное число новых фактов, в начале же XIX в. был сделан ряд важных оптических открытий, потребовавших тщательного пересмотра имевших хождение к тому времени представлений о природе света и связанных с ними концепций эфира.

В 1801 г. Вильям Хайд Волластон обнаружил за фиолетовой частью спектра химически действующее излучение, а Риттер — фотохимические свойства света. В том же году Т. Юнг в докладе «Теория света и цветов», прочитанном в Королевском обществе, дал объяснение ньютоновских колец с помощью принципа интерференции. В 1808—1811 гг. Малюс открыл явление поляризации света при отражении и преломлении, а в 1810 г. установил закон, определяющий зависимость интенсивности линейно-поляризованного света после прохождения его через анализатор от величины угла между плоскостью поляризации падающего света и плоскостью поляризации анализатора (закон Малюса). В 1811 г. Араго впервые наблюдал вращение плоскости поляризации света в кристаллическом кварце и обнаружил явление частичной поляризации света при отражении и преломлении. В 1816 г. Френель и Араго обнаружили явление интерференции поляризованных лучей. В 1817 г. Брюстер обнаружил явление эллиптической поляризации. Вся эта изумительная по разнообразию совокупность фактов не получила интерпретации на основе корпускулярных теорий. В 1818 г. Френель создал теорию дифракции, основанную на использовании принципа Гюйгенса, а в 1821 г. он разъясняет вопрос о цвете кристаллических пластинок, устранив теорию Био, базировавшуюся на эмиссионных представлениях. В 1822 г. Френель открыл круговую и эллиптическую поляризацию, объяснив эти явления с волновой точки зрения. В то время как работы Дальтона, Авогадро, Ампера, Берцелиуса утверждали атомистическую концепцию, в оптике усиливается роль волновой теории света и связанных с ней непрерывных представлений.

Континуальная и атомистическая концепция были развиты Максвеллом в его исследованиях по электродинамике и кинетической теории материи. Те решения, которые давал им Максвелл, не только соответствовали наиболее глубоким запросам науки первой половины XIX в., но, как мы теперь знаем, прогнозировали ее развитие по крайней мере на целое столетие.

В XIX в. проблема эфира претерпела существенные изменения. Торжество максвелловой электромагнитной теории света исторически потребовало от всякой теории эфира дать объяснение электромагнитных явлений, хотя сама по себе система уравнений Максвелла, как теория замкнутая и по характеру своему феноменологическая, не требовала каких-либо механических или электромагнитных картин эфира. Однако это положение стало понятно лишь значительно позднее благодаря Герцу и Пуанкаре.

В то время казалось заманчивым объяснить явления света, электричества и магнетизма, как разнообразные проявления механических состояний всепроникающей среды — эфира.

Вопрос о том, стремился ли сам Максвелл дать строгую теорию электродинамических явлений, целиком опирающуюся на механическое объяснение электричества и магнетизма, отнюдь не решается однозначно.

«Так, открывая том Максвелла,— писал А. Пуанкаре,— француз ожидает там найти единую теорию, столь же логичную и столь же строгую, как физическая оптика, основанная на гипотезе эфира; в таком случае его ждет, однако, разочарование, от которого я хотел бы избавить читателя... Максвелл не дает механического объяснения электричества и магнетизма; он ограничивается тем, что доказывает возможность такого объяснения»¹.

Согласно Пуанкаре, основная идея Максвелла состояла в расчленении проблемы механической трактовки электродинамики. Доказательство возможности механического объяснения электричества отнюдь не должно быть связано с самим отысканием этого объяснения и построением модели. Доказательство возможности механического объяснения состоит: в нахождении выражения двух функций T и I — составных частей энергии, в образовании с их помощью уравнений Лагранжа и в сравнении полученных уравнений с экспериментальными законами. Уравнения электромагнитного поля Максвелл трактовал как результат применения законов механики к эфиру, но при этом полагал, что многие элементы этого эфирного механизма, скрыты от нас. Идеи Максвелла столкнулись, кроме трудности, указанной Пуанкаре и состоящей в неоднозначности механической интерпретации уравнений, еще со старой проблемой увлечения эфира движущимися телами и с вопросом о зависимости скорости света, измеренной по отношению к среде, относительно которой источник движется, от скорости самого источника. Проблема эфира не была разрешена в теории Максвелла, а была лишь своеобразно поставлена.

Концепция Пуанкаре о неоднозначности механической модели и возможности многих механических моделей могла быть выдвинута уже в 70-х годах XIX в., но исторически сложилось так, что она была высказана после сложных поисков этих моделей.

¹ А. Пуанкаре. Введение к кн. «Электричество и оптика». В сб.: «Вариационные принципы механики». Физматгиз, 1959, стр. 773.

Мак-Келлог выдвинул предположение, что потенциальная энергия есть квадратичная функция углов вращения.

При отсутствии сил, стремящихся вернуть смещенные части в состояние равновесия, упругости не существует. В модели Мак-Келлога, если энергия зависит только от вращений, то система противодействующих сил должна состоять из пар.

Объяснение этих пар сил требовало введения второй неподвижной среды, не принимающей участия во вращении первой среды, но действующей на первую своими восстанавливающими силами.

В. Томсон выдвинул идею о модели квазижесткого эфира, а также стремился представить эфир при посредстве модели несжимаемой жидкости, находящейся в турбулентном движении.

Анализируя большое число различных гипотез, относительно строения и свойств эфира, Лоренц писал: «Эти теории имели некоторый успех, но нужно признать, что они не дают особого удовлетворения, так как становятся все более искусственными по мере возрастания количества случаев, требующих детального объяснения. В последнее время механические объяснения происходящих в эфире процессов все более отступают на задний план. Для многих физиков основной частью теории является количественное описание явлений, как, например, данное в уравнениях Максвелла...»¹

В. Томсон стремился преодолеть затруднение, суть которого в том, что в эфире распространяются поперечные колебания и, следовательно, проявляются свойства твердых тел, но одновременно он не оказывает никакого сопротивления движущимся сквозь него телам. В. Томсон (Кельвин) утверждал, что эфир нельзя себе представлять сплошным. Эфир охвачен по всему объему сильными вихрями; он весь состоит из вращающихся масс, оси вращения которых находятся в хаотическом движении. Вращающиеся массы в силу свойств вихрей легко сдвигаемы друг относительно друга, в то же время невозможно повернуть отдельные ячейки около любой оси. Гиростатическая модель эфира, в конечном счете исходит не из континуальных свойств, а из атомистических. В. Томсон выдвигал немало интересных модификаций эфира, но они не достигли цели. В 1910 г. Планк писал: «Чтобы постигнуть строение эфира, были исчерпаны все предложения и комбинации, какие только можно себе представить; на этом поприще самым деятельным среди великих физиков оставался до конца своей жизни лорд Кельвин. И обнаружилось, что из единой механической гипотезы невозможно вывести электродинамические процессы в свободном эфире...»² Наличие множества различных моделей в пределах одной теории казалось крайне парадоксальным. Эту трудность преодолел Анри Пуанкаре.

Он внес существенный вклад в обоснование максвелловой электродинамики и в выяснение ее принципиальных теоретических основ. Он показал, что если французские ученые, начиная с Лапласа и кончая Коши, исходили из точно высказанных гипотез и следствия из этих гипотез, выведенных с математической строгостью, сравнивали с опытом, то метод Максвелла был иным.

¹ Г. А. Лоренц. Статьи. Л., 1940, стр. 40.

² М. Планк. Единая физическая картина мира. М., 1966, стр. 61.

Максвелл, в отличие от многих физиков конца XVIII — начала XIX в. не давал механического объяснения электричества и магнетизма, он лишь доказывал возможность такого объяснения, и естественно, что уравнения Максвелла можно было идентифицировать с самой теорией. Из непосредственного опыта можно получить некоторое число параметров (q_1, q_2, \dots, q_n) и их измерить. Наблюдение дает нам законы изменения этих параметров. Законы эти можно представить в форме дифференциальных уравнений, связывающих параметры между собой и со временем.

Для механического истолкования явления его надо, отмечает Пуанкаре, объяснить при помощи движения обычной материи или гипотетических частиц. Уравнения движения частиц m_1, m_2, \dots, m_p имеют вид:

$$\begin{aligned} m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= - \frac{\partial U}{\partial x_i}, & m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= - \frac{\partial U}{\partial y_i}, \\ m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= - \frac{\partial U}{\partial z_i}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $(-U)$ — силовая функция от $3p$ координат.

«Мы будем иметь полное механическое объяснение явлениям, если будем, с одной стороны, знать силовую функцию $(-U)$ и, с другой стороны, сумеем выразить $3p$ координат x_i, y_i, z_i через n параметров q »¹.

Заменяв координаты их выражениями через параметры, мы переходим к законам движения в форме Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial U}{\partial q_k} = 0. \quad (2)$$

«Итак, — пишет Пуанкаре, — для того чтобы механическое объяснение явления было возможным, нужно, чтобы оказалось возможным найти две функции U и T , зависящие: первая — только от параметров q , вторая — от этих параметров и их производных; нужно, далее, чтобы T была однородной функцией второго порядка по отношению к этим производным и чтобы дифференциальным уравнениям, выведенным из опыта, могла быть придана форма (2). Справедливо и обратное предложение: всякий раз, когда можно найти эти две функции T и U , есть уверенность, что явление поддается механическому объяснению»². Далее Пуанкаре доказывает, что при наличии функций $U(q_k)$ и $T(\dot{q}_k, q_k)$ можно найти бесконечное множество механических объяснений явлений, и все они соответствуют частным особенностям опыта. «Теперь нетрудно понять основную идею Максвелла. Чтобы доказать возможность механического объяснения электричества, нам не нужно затруднять себя отысканием этого самого объяснения, достаточно знать выражения для двух функций T и U , которые обе являются составными частями энергии, образовать с их помощью уравнения Лагранжа и затем сравнить эти уравнения с экспериментальными законами»³.

¹ А. Пуанкаре. Введение к кн. «Электричество и оптика». В сб. «Вариационные принципы механики». Физматгиз, 1959, стр. 775.

² Там же, стр. 775.

³ Там же, стр. 776.

Пуанкаре принадлежит также глубокий анализ амперовой электродинамики, ее связи с гельмгольцевой электродинамикой и обоснование необходимости перехода к электродинамике Максвелла.

Наряду с этим Пуанкаре глубоко оценил сложнейшие проблемы электростатики Максвелла, внося значительный вклад в обоснование ряда проблем ее. Мы вкратце остановимся лишь на некоторых из них.

Глубокая связь электростатики и теории потенциала, возникшая после открытия закона Кулона, оказалась плодотворной для обеих сторон; электростатика получила математический аппарат и методы, сложившиеся в теории притяжения, а сама эта теория, благодаря специфике проблем электростатики, обогатилась новыми задачами, новыми методами. Можно без преувеличения сказать, что начиная с работ Пуассона и Грина и кончая работами Ляпунова и Стеклова, все важнейшие исследования по теории потенциала прямо или косвенно были связаны с задачами электростатики.

Уже первые электростатические опыты Кулона (1786) позволили принципиально правильно поставить первую краевую задачу для уравнения Лапласа и стимулировали исследования Пуассона по решению этой задачи для сферы. Теорема Пуассона о разрыве нормальной производной потенциала простого слоя (1814) также была предвосхищена опытами Кулона.

Исследования Грина, приведшие к его знаменитым формулам и к так называемому методу функций Грина, были предприняты в связи с решением чисто электростатической задачи об отыскании связи между «потенциальной функцией» объемных зарядов и соответствующей ей плотностью распределения электричества на поверхности проводника.

Метод электрических изображений В. Томсона обязан своим происхождением поискам путей, направленных на преодоление трудностей, встретившихся при рассмотрении некоторых задач электростатики, относящихся к сферическим проводникам¹.

Исследования Гаусса, Томсона, Дирихле и Римана, связанные с проблемами существования и единственности, возникли вместе с постановкой краевых задач и, таким образом, их генетическая связь с электростатикой очевидна. Эти проблемы были в сфере интересов Максвелла. Последующее их развитие привело к замкнутости теории в целом.

Метод арифметических средних К. Неймана был первым общим методом решения краевых задач теории потенциала, применимым ко всем достаточно гладким выпуклым поверхностям; потребностями электростатики были вызваны и исследования Неймана, связанные с распространением метода арифметических средних на поверхности, обремененные плоскими частями, ребрами и угловыми точками². Примерно к тому же времени относятся и исследования Робэна о распределении электричества на проводниках, при-

¹ См.: М. Г. Шраер. Учение о потенциале в работах В. Томсона. «Труды Института истории естествознания и техники», т. 34. М., 1960, стр. 103—109.

² См.: М. Г. Шраер. К истории математических методов электростатики во второй половине XIX в. «Вопросы истории естествознания и техники». М., изд-во «Наука», 1964, вып. 17, стр. 76—82.

ведшие к так называемому методу Робэна. Значение методов Неймана и Робэна состоит в том, что они не только устанавливали существование решения краевых задач теории потенциала, но и давали конструкцию, алгоритм самих этих решений. Поэтому они оказались в центре внимания всех исследований по теории потенциала последней трети XIX в. Эти исследования предпринимались с целью распространения методов Неймана и Робэна на класс поверхностей, более широкий, чем выпуклые, ибо выпуклые поверхности не удовлетворяли требованиям математической общности и, главное, представляли собой класс поверхностей, слишком узкий с точки зрения приложений теории потенциала, в частности приложений к электростатике.

С именем Анри Пуанкаре связан важный этап истории теории потенциала, лежащий на стыке классического направления этой теории, идущего от Грина и Гаусса, и нового теоретико-множественного и теоретико-функционального направления в математике. Три больших мемуара Пуанкаре¹, появившиеся один вслед за другим на протяжении короткого отрезка времени, сыграли благодаря богатству содержащихся в них новых идей выдающуюся роль и оказали огромное влияние на дальнейшее развитие теории потенциала и математической физике в целом.

Пуанкаре был одним из творцов метода, известного под именем «метода Шварца — Пуанкаре», с помощью которого ему удалось установить существование и свойства решений широкого класса краевых задач математической физики. Идеи, лежащие в основе этого метода, проложили путь к распространению методов Неймана и Робэна на все поверхности Ляпунова. Пуанкаре принадлежит открытие так называемого метода фундаментальных функций, обобщающего классические методы решения частных задач теории потенциала с помощью специальных функций, и, наконец, открытие замечательного метода доказательства существования решения первой краевой задачи (задачи Дирихле), свободного от ограничений, связанных с выпуклостью рассматриваемой поверхности. Речь идет о методе, названном самим автором «методом выметания» (*«methode de balayage»*) и опубликованного в первом из указанных мемуаров.

Метод выметания явил собой пример поразительного сочетания математических и физических идей, какой история теории потенциала уже имела в работах Грина и Гаусса.

Еще со времен Пуассона и Грина было известно, что если единичный заряд, сосредоточенный в какой-нибудь точке P внутри сферы, распределить по его поверхности так, чтобы на ней образовался так называемый слой Грина, то такое преобразование (как раз и названное Пуанкаре «операцией выметания» изнутри сферы) не приведет к каким-либо изменениям поля вне данной сферы, Пуанкаре обратил внимание на то, что из этого утверждения, дополненного указанием о действии слоя Грина на точки внутри

¹ H. Poincaré. Sur les équations aux dérivées de la Physique mathématique. «American Journal of mathematics». 1890, vol. XII, N 3, p. 211—294.— Sur les équations de la physique mathématique. «Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo», tomo VIII, 1894, p. 57—186.— La méthode de Neumann et le problème de Dirichlet. «Acta Mathematica», t. 20, 1896, p. 59—142.

данной сферы, можно извлечь весьма далеко идущие следствия. Такого рода дополнение и делает сначала Пуанкаре, доказав, что операция выметания положительных масс изнутри сферы приводит к ослаблению поля внутри этой сферы. Это предложение Пуанкаре составляет, так сказать, первую, классическую основу его «метода выметания».

Вторая основа этого метода имеет чисто математический характер и связана с новыми в то время направлениями в математике, относящимися к области теории множеств. Пуанкаре показывает, что для любой замкнутой поверхности (σ) всегда можно построить счетное множество сфер (S_n), покрывающих область вне (σ) и не пересекающихся с самой поверхностью (σ).

Если теперь представить проводник (σ), окруженный сферой (Σ) центра O и радиуса R , равномерно заряженный положительным электричеством плотности, равной $\frac{1}{4\pi R^2}$, то внутри некоторых из сфер (S_n) счетного покрытия, области, внешней к (σ), попадут электрические заряды. Начиная с какой-нибудь из таких сфер (S_i), произведем в любом порядке последовательные выметания, но так, чтобы каждая из сфер покрытия выметалась бесконечно много раз. Из сказанного выше следует, что каждая операция выметания может привести разве лишь к уменьшению потенциала в любой точке M пространства по сравнению с его первоначальным значением V_0 , равным $\frac{R}{OM}$ в любой точке M вне (Σ) и равным 1 внутри (Σ).

Таким образом, внутри каждой из сфер (S_i) определится некоторая невозрастающая последовательность $V_1^{(i)}$, $V_2^{(i)}$, ..., $V_n^{(i)}$ положительных функций, гармонических внутри (S_i), имеющая, следовательно, некоторый конечный предел $V^{(i)}$. Согласно теореме Гарнака, этот предел также является функцией гармонической внутри (S_i), а совокупность этих последних, взятая во всем i , определяет некоторую функцию V , гармоническую вне (σ). Так как каждая из $V_n^{(i)}$ удовлетворяет условию $0 \leq V_n^{(i)} < V_0$, то таким же свойством обладает и функция V , которая в силу этого оказывается регулярной на бесконечности.

Согласно построению, каждая из функций $V_n^{(i)}$, обращается в 1 на (σ). Для доказательства того, что таким же свойством обладает и предельная функция V , Пуанкаре вынужден наложить некоторое ограничение на поверхность проводника (σ). Именно, он предполагает, что в каждой точке этой поверхности существует определенная касательная плоскость и два определенных отличных от нуля радиуса кривизны. Эти ограничения позволяют для любой точки M_0 поверхности проводника (σ) построить сферу (S), целиком лежащую внутри (σ), и касательную к (σ) в точке M_0 .

Если C — центр сферы (S) и r — ее радиус, то функция $\frac{r}{MC}$, рассматриваемая как функция от M , гармонична вне (S) и обращается в 1 на (S). Поэтому функция $u(M) = V_n(M) - \frac{r}{MC}$, где $V_n(M)$ — потенциал точки M , получающийся из $V_0(M)$ после n операций выметания, будет потенциалом в точке M поля, порождаемого положительными зарядами, лежащими вне (S), и от-

рицательного заряда $-r$, сконцентрированного в центре сферы (S) . В силу этого вне (S) функция u может иметь лишь максимумы, и так как $U|_{(S)}=0$, то вне (S) $U>0$, т. е. $V_n(M) > \frac{r}{MC}$. Таким образом, вне (S) $\frac{r}{MC} < V_n \leq V < 1$, и при $M \rightarrow M_0$ будет $V(M) \rightarrow V(M_0) = 1$. Тем самым доказано существование функции, гармонической вне заданного проводника (σ) и обращающейся в 1 на поверхности этого проводника, т. е. установлено существование решения основной задачи электростатики для указанного класса поверхностей.

С помощью метода изображений Томсона эта задача дает возможность установить существование функции Грина, а значит, и решить внутреннюю задачу Дирихле.

Мы не станем останавливаться на некоторых остроумных усовершенствованиях метода выметания, сделанных Пуанкаре в этом же мемуаре. Укажем лишь, что Пуанкаре удалось снять некоторые ограничения на рассматриваемые им поверхности и предложить такое видоизменение метода выметания, которое позволяет непосредственно (т. е. минуя построение функции Грина) доказать принцип Дирихле для указанного выше класса поверхностей при условии непрерывности функции, входящей в краевое условие задачи Дирихле.

Высказанные в связи с этим идеи Пуанкаре привели к глубокому проникновению в теорию потенциала методов теории функций, связанных с понятиями меры и емкости множеств, с теорией суб- и супергармонических функций, благодаря чему теория потенциала обогатилась новыми обобщениями в постановке и решении ее задач.

В третьем из упомянутых выше мемуаров, выпущенном в 1896 г., Пуанкаре определяет некоторый класс поверхностей, содержащий выпуклые поверхности, для которого методы Неймана и Робэна сохраняют еще свою силу. Для этих поверхностей Пуанкаре устанавливает следующее: если W — потенциал двойного слоя с непрерывной плотностью $v \neq \text{const}$, то отношение $\frac{J}{J'}$ интегралов вида $\int (\Delta W)^2 di$, взятых соответственно по внутренней и внешней (S) , заключено в конечных и отличных от нуля пределах, не зависящих от v . Опираясь на это предложение, Пуанкаре установил принцип Неймана для всех введенных им поверхностей.

Заслуга Пуанкаре в том, что он впервые обратил внимание на связь между принципом Неймана и существованием конечных и отличных от нуля пределов отношения $\frac{J}{J'}$.

Именно эта связь послужила исходным пунктом в исследованиях Стеклова и Зарембы, которые, опираясь на основополагающие работы Ляпунова, смогли обосновать применимость методов Неймана и Робэна ко всем поверхностям Ляпунова. Метод Пуанкаре, как и многие другие методы решения электростатических задач, которыми Максвелл непосредственно не занимался, дополняли стройное здание электродинамики, понимаемой в широком смысле.

У. И. Франкфурт, М. Г. Шраер

Теория цветов в исследованиях Максвелла

В первые годы своей научной деятельности Д. К. Максвелл активно интересовался проблемами, связанными с теорией цветов.

Следует отметить, что в то время теория цветов только складывалась. Первые работы в этой области относятся, правда, еще к XVII в. и были выполнены в основном Ньютоном. XVIII век не внес ничего существенного в изучение этой проблемы. И только в XIX в. возрождается интерес к ней и появляются многочисленные теоретико-экспериментальные работы. Еще короче была история вопросов, связанных с цветовой слепотой: она впервые была описана в XIX в. известным английским химиком Дальтоном, который обнаружил у себя недостаток в цветовом восприятии.

Основы теории цветов были заложены И. Ньютоном. Он поставил перед собой задачу создать математическую теорию цветов¹ и выполнил ее. Он показал на опыте, что «лучам с разной преломляемостью отвечают разные цвета»², что «цвет белый и черный, а также пепельный или более темные промежуточные цвета создаются беспорядочным смешением лучей всякого рода. Таким же образом прочие все цвета, не являющиеся первоначальными, производятся различными смесями этих лучей. Отсюда не удивительно, что при разъединении разнородных лучей неравным преломлением мы видим, что снова возникают из них различные цвета. ...Первоначальные цвета при смешении лучей одного с другим могут проявлять смежные цвета; так, зеленый — из желтого и синего, желтый — из прилежащего зеленого и лимонного и также из других. Под первоначальными цветами я разумею... какие угодно... проявляемые каким-либо однородным видом лучей»³. Ньютон от-

¹ И. Ньютон. Лекции по оптике (перевод, комментарии и редакция акад. С. И. Вавилова). Изд-во Академии наук СССР. М., 1946.

² Там же, стр. 146.

³ Там же, стр. 145.

мечает: «Свет [Солнца] состоит из лучей всех цветов не только при выходе из призмы, когда он ею разлагается на цвета, но даже тогда, когда он еще не дошел до призмы, до всякого преломления»⁴.

Таким образом, в «Лекциях» он определяет основные положения, которые в последующих работах еще более подкрепляются опытами. Здесь мы видим и зачатки цветоведения, что в дальнейшем было разработано в «Оптике» (1704), и утверждение, что белый свет — более сложен в сравнении с «первоначальными» цветами: нет ни одного сорта лучей, который в отдельности мог бы проявлять белизну — белый свет всегда есть смесь находящихся в определенной пропорции лучей разной цветности.

«Лекции по оптике» читались Ньютоном в 1669—1671 гг. в Тринити-колледже небольшому числу студентов. В силу ряда причин «Лекции» не были опубликованы, и первой работой Ньютона по теории цветов, получившей известность, оказался мемуар 1672 г., направленный тогдашнему секретарю Королевского общества Ольденбургу. В нем Ньютон отстаивает те же положения. И в мемуаре 1675 г. и в завершающей его оптической изыскания «Оптике» Ньютон остается на этих позициях.

Ньютон первый четко провел грань между физическими характеристиками цвета и теми ощущениями, которые они могут вызывать у человека, что было не понято даже таким физиком, как Гюйгенс. По мнению Гюйгенса, гипотеза, объясняющая два цвета — желтый и голубой, — достаточна, так как из этих двух цветов можно составить красный и синий, а из этих четырех — все остальные цвета. И проще объяснить только два цвета, чем все разнообразие цветов. И белый свет можно попытаться составить из желтого и голубого. «Я думаю, что даже наиболее светлая часть желтого достаточна для получения белого»².

Ньютон писал, отвечая на критику Гюйгенса, что «белый, который получается из двух цветов (как у Гюйгенса), отличается от того белого, о котором я говорю в своей теории, т. е. от солнечного света. Противоречие, которое усматривает в этом Гюйгенс, кажущееся, так как этот белый отличается от других белых тем, что он не состоит только из двух цветов. И если Гюйгенс хотел бы доказать тождество его белого с другим белым, то необходимо доказать тождественность всех их свойств, а не только то, что для глаза они одинаковы»³.

Уже позднее, возвращаясь к этому же вопросу в «Оптике», Ньютон писал: «В самих лучах нет ничего иного, кроме предрасположения распространять то или иное движение в чувствительнице; в последнем же проявляются ощущения этих движений в форме цветов». Отсюда видно, что Ньютон четко разделял физическое описание цветов и физиологическое восприятие их.

Но в математической теории цветов он не смог отказаться от семи основных цветов, на которые разлагается призмой солнечный свет, и причина здесь, видимо, та, на которую указывали мно-

¹ И. Ньютон. Лекции по оптике, стр. 182.

² «The Correspondence of I. Newton». Cambridge, 1959, т. I, стр. 225.

³ Там же, стр. 291.

гие исследователи: аналогия со звуковыми колебаниями — аналогия, которой широко пользовались и в XVII в.

Для определения цвета смеси нескольких цветов по известному «количеству и качеству» первичных цветов Ньютон использует цветовой круг, вдоль окружности которого располагаются семь основных цветов, а в центре круга — белый свет. Переход между цветами на окружности постепенный, как и в солнечном спектре. Цвет смеси по известному спектральному составу ее Ньютон находил по аналогии с отысканием центра тяжести, но считал, что этот метод приближенный, а не точный. И, как отметил М. М. Гуревич, «сколько бы главных цветов не намечал бы Ньютон в спектре — семь, восемь или более, но, суммируя их по предложенному им правилу центра тяжести, он находил всегда один центр на плоскости графика, что... неизбежно ведет к трехмерности цвета»¹.

В XVIII в. проблемой цветов интересовался М. В. Ломоносов. В «Слове о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее» (1756)² он присоединяется к мнению Мариотта³, который занимался физиологической оптикой, о трех главных цветах в противоположность семи цветам Ньютона. Ломоносов придавал этим трем цветам объективное физическое значение: он считал, что существуют только три физически простых цвета — красный, желтый, голубой, которым соответствуют три рода эфирных частиц сферической формы, но разной величины. «Прочие цвета рождаются от смешения первых трех».

Дальнейшее развитие учения о цветах связано с именем Томаса Юнга. Первое изложение своей теории Юнг дал в «Лекции о теории света и цветов», прочитанной 12 ноября 1801 г.⁴ Единственный, на кого ссылается Юнг, и притом не только ссылается, но и подчеркивает преимущество воззрений⁵, — это Ньютон. Но Юнг идет дальше в анализе цветовых ощущений. «Теперь, когда почти невозможно представить, что каждая чувствительная точка сетчатки содержит бесконечное число частиц, каждая из которых способна колебаться в унисон с любым возможным волнообразным движением, возникает необходимость в предположении, что это число ограничивается, например, тремя основными цветами — красным, желтым и голубым». Однако уже в 1802 г. более точные измерения цветов призматического спектра Волластоном и собственные наблюдения последовательности цветов в тонких пластинах заставили Юнга отказаться от этих трех основных цветов, которые фигурировали во всех предшествовавших трехкомпонентных теориях и были взяты по примеру художников, и принять другую тройку цветов — красный, зеленый, фиолетовый⁶.

¹ М. М. Гуревич. Теория цветов Ньютона. УФН, 52, 1954, стр. 308.

² М. В. Ломоносов. Полное собрание сочинений, т. III. Изд-во Академии наук СССР. М.—Л., 1952, стр. 315.

³ E. Mariotte. De la nature des couleurs. P., 1681.

⁴ «Philosophical Transactions», 92, 1802, стр. 12.

⁵ Это относится к учению о цветах, но не к взглядам на природу света.

⁶ «Philosophical Transactions», 92, 1802, стр. 387.

Юнг был первым, кто связал все разнообразие наблюдаемых цветов со строением глаза человека. Он высказал предположение, что окончание каждого глазного нерва состоит из трех видов нервных волокон: каждое для соответствующего основного цвета.

Для расчета цвета Юнг предложил пользоваться цветовым треугольником, в вершинах углов которого находятся основные цвета.

Но и после работ Юнга еще предпринимались попытки отстаивать теории, аналогичные теории Ломоносова, например, Д. Брюстером.

Следующий этап в развитии учения о цветах приходится примерно на середину XIX в. и связан в основном с именами Гельмгольца, Грассмана и Максвелла. В это же время появляется ряд работ и по изучению цветовой слепоты. Много ценных результатов было получено благодаря «слепым» к цвету. Этой группой вопросов занимались Дальтон, Д. Вильсон, Поль, Мейер, Максвелл, Гельмгольд.

Наиболее полная серия опытов по смешению цветов была проведена Гельмгольцем¹. Он принял как основные те же цвета, что были и у Юнга. Грассман проверил первые результаты Гельмгольца и, сравнив их с Ньютоновыми, показал ошибочность утверждения Гельмгольца о существовании только одной пары дополнительных цветов в спектре, Грассман тщательно изучил оптические работы Ньютона и смог из результатов последнего вывести три закона сложения цветов, известных сейчас как законы Грассмана: непрерывности, аддитивности, трехмерности.

Максвелл, независимо от Гельмгольца, во многом повторил его эксперименты². К изучению цветов Максвелл приступил в 1852 г.³ Первая работа его — письмо к доктору Вильсону, занимавшемуся вопросами, связанными с цветовой слепотой, — датирована 4 января 1855 г. и опубликована в «Transactions of the Royal Scottish Society of Arts». Само название статьи — «Теория цветов в связи с цветовой слепотой» — говорит о ее содержании. Из опытов Максвелл заключил, что у людей с обычным зрением цвет есть функция трех переменных, а у цветослепых — только двух.

О двух сериях исследований (ноябрь 1854 г. и март 1855 г.) Максвелл сообщает в следующей работе — «Опыты по восприятию цветов глазом и замечания о цветовой слепоте»⁴. Для смешения цветов он пользовался цветовым волчком⁵. Его применяли и рапш-

¹ «Poggendorf. Annalen», 1852.

² J. C. Maxwell. Scientific papers, т. I, 1927, стр. 144.

³ Там же, стр. 415.

⁴ «Trans. of Roy. Soc. of Ed.», т. XXI, ч. II, 1855 или в кн.: J. C. Maxwell. Scientific papers, т. I, стр. 126.

⁵ Три диска из плотной бумаги, окрашенные каждый в один из трех основных цветов, насажены с помощью прорезей, сделанных по радиусу от окружности к центру, на общую ось. Такое соединение дает возможность менять площади окрашенных спектров, а величина их выражается числом занимаемых ими делений, которые нанесены на один из дисков (этих делений 100). На эту ось насаживаются меньшие черный и белый диски, соединенные таким же образом. При быстром вращении волчка секторы дают определенное цветовое ощущение, которое сравнивается с серым от белого и черного дисков.

ше, но только в руках Максвелла он стал прибором, дающим количественные результаты. Выводы, к которым приходит Максвелл, таковы:

а) глаз способен оценивать подобие цветов с точностью, в ряде случаев очень высокой;

б) заключения (о цвете) определяются не реальной идентичностью цветов, а причиной, присущей глазу наблюдателя, и,

в) несмотря на расхождения в точности, не остается сомнений в том, что закон цветового зрения одинаков для всех нормальных глаз.

Опыты по смешению цветов убедили Максвелла, что основные цвета — красный, зеленый и синий¹, как принято и сейчас. Максвелл провел серию экспериментов для того, чтобы получить более совершенные количественные доказательства теории трех основных цветов. Для смешения цветов он использует в более поздних работах построенный им цветовой ящик². В цветовом ящике различные части спектра можно смешивать и сравнивать их по цвету с белым, интенсивность которого может быть изменена. Из этих исследований были получены данные о комбинациях цветовых ощущений³.

Еще в 1855 г. Максвелл высказал мысль, что теория цветов Юнга может быть проиллюстрирована с помощью фотографии. «Эта иллюстрация покажет, как функции, которые Юнг относил к трем системам нервов, могут имитироваться оптическим устройством»⁴. Осуществить эту идею ему удалось лишь в 1861 г. Во время лекции в Королевском институте 17 мая 1861 г. Максвелл впервые в мире продемонстрировал цветную фотографию⁵.

Всего по теории цветов Максвеллом написано семь работ и прочитаны две лекции в Королевском институте. Он занимался этими вопросами с 1852 по 1872 г. После 1872 г. он к ним более не возвращался.

В данной области Максвелл получил ряд существенных результатов. Он во многом способствовал утверждению трехкомпонентной теории цвета, провел точные количественные измерения по смешению цветов, используя цветовой волчок и цветовой ящик, заложил основы цветной фотографии, дал методы измерения и количественного выражения цвета, которыми пользовались все последующие исследователи.

Е. И. Погребысская

¹ Необходимо отметить, что выбор основных цветов при цветовых измерениях в определенной степени произволен, чего нельзя сказать о трех цветовых ощущениях человека. В последнем случае такой выбор предопределен строением глаза.

² Цветовой ящик состоит из набора щелей, размеры которых можно менять, двояковыпуклой линзы, призмы и экрана.

³ J. C. Maxwell. Scientific papers, v. II, P., 1927, p. 96, 230, 267.

⁴ См. сноску 4 на стр. 389 в этом сборнике.

⁵ См. статью Р. М. Эванса в этом сборнике.

Библиография ¹

1. Книги Д. К. Максвелла

1. J. C. Maxwell. On the stability of the motion of Saturn's Rings. Cambridge, 1859.
2. J. C. Maxwell. Theory of Heat. 1870.
3. J. C. Maxwell. Introductory Lecture on Experimental Physics. L., 1871.
4. J. C. Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism. 2 vol., 1873.
5. J. C. Maxwell. Matter and Motion. 1873.
6. J. C. Maxwell. An Elementary Treatise on Electricity. 1881; Second Edition, 1888.
7. James Clerk Maxwell. The Scientific Papers of J. C. Maxwell. Cambridge, 2 vol., 1890.
8. J. C. Maxwell. Ueber Faraday's Kraftlinien... (Herausgegeben von L. Boltzmann), 1895.
9. Д. К. Максвелл. Теория теплоты, т. I. Владимир, 1883.
10. Д. К. Максвелл. Движение и материя (пер. с англ. М. А. Антоновича). СПб., 1885, последующ. изд. 1889, 1924.
11. Д. К. Максвелл. Электричество в элементарной обработке. Киев, 1886; последующ. изд. 1888.
12. Д. К. Максвелл. Речи и статьи. М., 1901; последующ. изд. 1940.
13. Д. К. Максвелл. О фарадеевских силовых линиях (примеч. Л. Больцмана). М., 1907.
14. Д. К. Максвелл. О регуляторах (В кн.: Д. К. Максвелл, Н. А. Вышнеградский, А. Стодола. Теория автоматического регулирования. Серия «Классики науки», Изд-во Академии наук СССР. М., 1949), стр. 9—73.
15. Джеймс Клерк Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля (пер. З. А. Цейтлина). М., ГТТИ, 1954.

¹ Составил У. И. Франкфурт.

II. Статьи Д. К. Максвелла

(По изд. J. C. Maxwell. The scientific papers, v. I—II. P., 1927).

Стр.

Volum I:

1. On the Description of Oval Curves and those having a plurality of Foci; with remarks by Professor Forbes 1--3
2. On the Theory of Rolling Curves 4--29
3. On the Equilibrium of Elastic Solids 30--73
- 3a. Solutions of Problems (1854) 74--79
4. On the Transformation of Surfaces by Bending 80--114
5. On a particular case of the descent of a heavy body in a resisting medium (1853) 115--118
6. On the Theory of Colours in relation to Colour-Blindness (A letter to Dr. G. Wilson, 1855) 119--125
7. Experiments on Colour, as perceived by the Eye, with remarks on Colour-Blindness 126--155
8. On Faraday's Lines of Force (1855--1856) 155--229
9. Description of a New Form of the Platometer, an Instrument for measuring the areas of Plane Figures drawn on Paper (1855) 230--237
10. On the Elementary Theory of Optical Instruments 238--240
11. On a Method of drawing the Theoretical Forms of Faraday's Lines of Force without Calculation (1856) 241
12. On the Unequal Sensibility of the Foramen Centrale to Light of different Colours 242
13. On the Theory of Compound Colours with reference to Mixtures of Blue and Yellow Light (1856) 243--245
14. On an Instrument to illustrate Poinsot's Theory of Rotation 246--247
15. On a Dynamical Top, for exhibiting the phenomena of the motion of a system of invariable form about a fixed point, with some suggestions as to the Earth's motion (1857) 248--262
16. Account of Experiments on the Perception of Colour (1857) 263--270
17. On the General Laws of Optical Instruments (1858) 271--285
18. On Theories of the Constitution of Saturn's Rings 286--287
19. On the Stability of the motion of Saturn's Rings (1856) 288--376
20. Illustrations of the Dynamical Theory of Gases (1860) 377--409
21. On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum (1860) 410--444
22. On the Theory of Three Primary Colours (1861) 445--450
23. On Physical Lines of Force 451--513
24. On Reciprocal Figures and Diagrams of Forces 514--525
25. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field (1864) 526--597
26. On the Calculation of the Equilibrium and Stiffness of Frames 597--604

27. The Bakerian Lecture.— On the Viscosity or Internal Friction of Air and other Gases (1865)	1—25
28. On the Dynamical Theory of Gases (1866)	26—78
29. On the Theory of the Maintenance of Electric Currents by Mechanical Work without the use of Permanent Magnets (1867)	79—85
30. On the Equilibrium of a Spherical Envelope (1867)	86—95
31. On the best Arrangement for producing a Pure Spectrum on a Screen (1867—1868)	96—100
32. The Construction of Stereograms of Surfaces	101
33. On Reciprocal Diagrams in Space, and their relation to Airy's Function of Stress	102—104
34. On Governors (1868)	105—120
35. «Experiment in Magneto-Electric Induction». In a Letter to W. R. Grove F. R. S. (1868)	121—124
36. On a Method of Making a Direct Comparison of Electrostatic with Electromagnetic Force; with a Note on the Electromagnetic Theory of Light (1868)	125—143
37. On the Cyclide (1867)	144—159
38. On a Bow seen on the Surface of Ice	160
39. On Reciprocal Figures, Frames and Diagrams of Force (1869—1870)	161—207
40. On the Displacement in a Case of Fluid Motion	208—214
41. Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association (1870)	215—229
42. On Colour-vision at different points of the Retina	230—232
43. On Hills and Dalles	233—240
44. Introductory Lecture on Experimental Physics	241—255
45. On the Solution of Electrical Problems by the Transformation of Conjugate Functions	256
46. On the Mathematical Classification of Physical Quantities	257—266
47. On Colour Vision	267—279
48. On the Geometrical Mean Distance of Two Figures on a Plane (1872)	280—285
49. On the Induction of Electric Currents in a Infinite Plane Sheet of Uniform Conductivity	286—296
50. On the Condition that, in the Transformation of any Figure by Curvilinear Coordinates in Three Dimensions, every angle in the new Figure shall be equal to the corresponding angle in the original Figure (1872)	297—300
51. Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism. By sir W. Thomson (1872)	301—307
52. On the Proof of the Equations of Motion of a Connected System (1876)	308—309
53. On a Problem in the Calculus of Variations in which the solution is discontinuous (1876)	310
54. On Action at a Distance	311—323
55. Elements of Natural Philosophy	324—328
56. On the Theory of a System of Electrified Conductors, and other Physical Theories involving Homo-	

	Cp.
geneous Quadratic Functions	329—331
57. On the Focal Lines of a Refracted Pencil	332—337
58. An Essay on the Mathematical Principles of Physics. By the Rev. James Challis	338—342
59. On Loschmidt's Experiments on Diffusion in relation to the Kinetic Theory of Gases	343—350
60. On the Final State of a System of Molecules in mo- tion subject to forces of any kind	351—354
61. Faraday	355—360
62. Molecules	361—378
63. On Double Refraction in a Viscous Fluid in Motion (1873)	379—380
64. On Hamilton's Characteristic Function for a narrow Beam of Light (1874)	364—390
65. On the Relation of Geometrical Optics to other parts of Mathematics and Physics	391—392
66. Plateau on Soap-Bubbles	393—399
67. Grove's «Correlation of Physical Forces»	400—405
68. On the application of Kirchoff's Rules for Electric Circuits to the Solution of a Geometrical Problem	406
69. Van der Waals on the Continuity of the Gaseous and Liquid States	407—415
70. On the Centre of Motion of the Eye	416—417
71. On the Dynamical Evidence of the Molecular Con- stitution of Bodies (A Lecture)	418—438
72. On the Application of Hamilton's Characteristic Function to the Theory of an Optical Instrument symmetrical about its axis (1875)	439—444
73. Atom	445—484
74. Attraction	485—491
75. On Bow's method of drawing diagrams in graphical statics with illustrations from Peaucellier's lin- kage (1876)	492—497
76. On the Equilibrium of Heterogeneous Substances (1876)	498—500
77. Diffusion of Gases through Absorbing Substances	501—504
78. General consideration concerning Scientific Appa- ratus	505—522
79. Instruments connected with Fluids	523—527
80. Whewell's Writings and Correspondence (Review)	528—532
81. On Ohm's Law (1876)	533—537
82. On the protection of buildings from lightning	538—540
83. Capillary Action	541—591
84. Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz	592—598
85. On a Paradox in the Theory of Attraction (1877)	599—603
86. On Approximate Multiple Integration between Li- mits by Summation (1877)	604—611
87. On the Unpublished Electrical Papers of the Henry Cavendish	612—615
88. Constitution of Bodies	616—624
89. Diffusion	625—646
90. Diagrams	647—659
91. Tait's «Thermodynamics»	660—679

92. On the Electrical Capacity of a long narrow Cylinder, and of a Disk of sensible Thickness	672—680
93. On Stresses in Rarified Gases arising from Inequalities of Temperature (1879)	681—712
94. On Boltzmann's Theorem on the average distribution of energy in a system of material points	713—741
95. Telephone (Rede Lecture)	742—755
96. Paradoxical Philosophy (A Review)	756—762
97. Ether	763—775
98. Thomson and Tait's Natural Philosophy (A Review)	776—785
99. Faraday	786—793
100. Reports on Special Branches of Science	794—796
101. Harmonic Analysis	797—801

III. Книги о Д. К. Максвелле

1. L. Campbell, W. Garnett. The Life of J. C. Maxwell. L., 1882.
2. L. Boltzmann. Vorlesungen über Maxwell's Theorie der Electricität und des Lichtes. 1891.
3. R. T. Glazebrook. J. C. Maxwell and modern Physics. 1896.
4. J. H. Poincaré. Maxwell's Theory and Wireless Telegraphy. 1904.—Electricité et Optique 1890.—Théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes. 1899.
5. H. A. Lorentz. Clerk Maxwell's Electromagnetic Theory, 1923.
6. J. C. Maxwell. A commemoration volume. Cambridge. 1931.
7. J. G. Crowther. British Scientists of the Nineteenth Century (J. C. Maxwell, v. 1, 1935; v. 2 (J. C. Maxwell, W. H. Perkin). 1940.
8. R. L. Smith-Rose. James Clerk Maxwell. L., 1948.
9. «The Collected Clerk Maxwell memorial lectures». L., 1960.
10. Ch. P. May. J. C. Maxwell and electromagnetism. N. Y., 1962.
11. «Clerk Maxwell and modern science». L., 1963.
12. Н. А. Умов. Памяти Клерка Максвелла. Одесса, 1888. (Последующ. изд. в кн.: Н. А. Умов. Собр. соч., т. III. М., 1916.)
13. А. Пуанкаре. Теория Максвелла и герцовские колебания. СПб., 1900.
14. Ф. Д. Бублейников. Максвелл (1831—1879). М., «Знание», 1960.
15. Д. Мак-Дональд. Фарадей, Максвелл и Кельвин. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1967.

О соотношении между физикой и математикой (Adress to the Mathematical and Physical Sections of the British Association, 1870).

Напечатано в кн.: J. C. Maxwell. The Scientific Papers (v. I—II). P., v. I, p. 45—60. (В последующем: S. P.)

Джемс Джозеф Сильвестр (1874—1897) — английский математик. Работы по алгебре, теории чисел, теории вероятностей, механике, математической физике. Основатель первого американского журнала «The American journal of mathematics». Лит.: J. Sylvester. The collected mathematical papers, v. 1—4. Cambridge, 1904—1902.

Джон Тиндаль (1820—1893) — английский физик. Работы по диамагнетизму, по поглощению тепловых лучей газами и парами, по акустике. Изучал строение и движение ледников в Альпах. Популяризатор науки. Лит.: J. Tyndall. Fragments of science. v. 1—2, (6 ed.) N. Y., 1901.— Фарадей и его открытия. СПб., 1871.— В Альпах. Харьков, 1876.— Формы воды в виде облаков, рек, льда и ледников. СПб., 1876.— Теплота, рассматриваемая как род движения, 2 изд. М., 1888.— О нем см.: G. Anders. John Tyndall. «Wissenschaft und Fortschritt», 1956, Bd. 6, N 12.

Майкл Фарадей (1791—1867) — английский физик. Осуществил вращение магнита вокруг прямого провода с током и вращение проводника с током вокруг магнита, тем самым создал модель электродвигателя (1821). В 1831 г. открыл электромагнитную индукцию, в дальнейшем исследовал это явление, легшее в основу электротехники. Установил законы электролиза. Создал учение об электромагнитном поле. Открыл явления пара- и диамагнетизма и магнитное вращение плоскости поляризации. Классические работы по сжижению газов. Лит.: М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству. М., Изд-во АН

¹ Составил У. И. Франкфурт.

СССР, т. I, 1959; т. II, 1951. (Имеется библиография печатных трудов Фарадея и литературы о нем.)

Огюст Конт (1798—1857) — французский философ. Один из основоположников буржуазной социологии и философии позитивизма. Лит.: A. Comte. Discours sur l'esprit positif... P., 1844.— Discours sur l'ensemble du positivisme... P., 1848.— Correspondance inédite, v. 1—4, P., 1903—1904. О нем см.: Ф. Энгельс. Диалектика природы, М., 1955.— К. Маркс. [Письмо] Энгельсу 7 июля 1866 г. (В кн.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Избр. письма, [Л.], 1953; — его же [Письмо] Э.-С. Бизли 12 июня 1871 г., там же.— В. И. Ленин. Материализм и эмпириокритицизм. Полное собр. соч., т. 18.— Философская энциклопедия. М., 1964, т. 3, стр. 51—53.

Демокрит (460—370 до н. э.) — древнегреческий философ-материалист. Демокрит утверждал, что все существующее состоит из атомов и пустоты. Атомы неделимы вследствие своей плотности. Они вечно беспорядочно движутся в пустоте. Идеи атомизма Демокрит распространил на космологию. Лит.: H. Diels. Die Fragmente der Vorsokratiker... Bd. 2, 6 Anfl., В., 1952.— А. О. Маковельский. Демокрит в его фрагментах и свидетельствах древности. [М.], 1935.— Античные философы (Свидетельства, фрагменты и тексты. Сост. А. А. Аветисян). Киев, 1955, стр. 93—110.— О нем см.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Из ранних произведений. М., 1956; — Немецкая идеология. Сочинения, т. 3, М., 1955.— В. И. Ленин. Материализм и эмпириокритицизм. Полное собр. соч., т. 18; — Философские тетради. Полное собр. соч., т. 29.— А. О. Маковельский. Демокрит. Баку, 1926.— С. Я. Лурье. Демокрит. М., 1937.— В. Е. Тимошенко. Материализм Демокрита. М., 1959.— Философская энциклопедия, т. 1. М.—Л., 1960, стр. 459—462.

Эпикур (341—270 до н. э.) — древнегреческий философ-материалист. Следуя Демокриту, придерживался атомистических представлений. Атомы различаются по форме, величине и весу. В отличие от Демокрита полагал, что атомы могут самопроизвольно отклоняться от прямолинейного движения. Лит.: «Epicurus, the extant remains of the Greek text, transl. by Cyril Bayley». N. Y., 1947.— Материалисты древней Греции (Собрание текстов Героклита, Демокрита и Эпикура). М., 1955.— О нем см.: К. Маркс. Различие между натурфилософией Демокрита и натурфилософией Эпикура (В кн.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Из ранних произведений. М., 1956).

Лукреций (99—95 — ум. 55 до н. э.) — древнеримский поэт и философ-материалист. В поэме «О природе вещей» утверждал, что атомистический принцип призван объяснить все многообразие явлений природы. Лукреций говорит о «первичных тельцах», не употребляя термин «атом»; они существуют вечно, неизменны, неделимы, отличаясь весом и конфигурацией. «Тельца» и «пустота» — основа всего существующего. Вселенная бесконечна. Лит.: Лукреций. О природе вещей (ред. лат. текста и пер. Ф. А. Петровского), т. 1—2. М.—Л., 1946—1947.— О нем см.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Из ранних произведений, М., 1956.— Философская энциклопедия, т. 3. М., 1964, стр. 259—260.

Томас Грахам (Грэхем) (1805—1869) — английский химик. С 1855 г., после Джона Гершеля, был директором Монетного двора в Лондоне.

Густав Видеман (1826—1899) — немецкий физик. Работы в области электричества и магнетизма. Совместно с Францем исследовал теплопроводность и электропроводность металлов. Исследования по электропроводности жидкостей, электролизу. С 1877 г. редактор «Annalen der Physik».

Рудольф Клаузиус (1822—1888) — немецкий физик. Работы по основам термодинамики и кинетической теории газов. Ввел в 1865 г. понятие энтропии. Лит.: R. Clausius. Die mechanische Wärmetheorie, Bd. 1—3. Braunschweig, 1879—1891.— О нем см.: У. И. Франкфурт. Из истории второго начала термодинамики. «Труды ИИЕиТ», Изд-во АН СССР, 1957, т. 19, стр. 582—602.

Лорд Кельвин (Вильям Томсон, 1824—1907) — английский физик. Работы в области термодинамики; установил термодинамическую шкалу температур; открыл явление переноса тепла электрическим током. Установил, что при адиабатическом расширении газ охлаждается (эффект Джоуля — Томсона). Разработал основы теории электрических колебаний и ряд задач математической физики. Сделал ряд важных изобретений. Лит.: W. Thomson. Mathematical and physical papers, v. 1—6. Cambridge, 1882—1911.— В. Томсон. Строение материи. СПб., 1895.

Герман Гельмгольц (1821—1894) — немецкий ученый. В 1847 г. в мемуаре «О сохранении силы» впервые дал математическую формулировку закона сохранения энергии. Доказал применимость принципа наименьшего действия к электромагнитным, тепловым и оптическим явлениям. Ввел понятие о свободной и связанной энергии. Дал теорию вихревых движений. Разработал теорию аномальной дисперсии. Выдвинул идею об атомарном строении электричества. Открыл комбинационные тона, решил задачу о звуке органной трубы. В области физиологии работы Гельмгольца относятся к изучению нервной и мышечной систем. Лит.: H. Helmholtz. Wissenschaftliche Abhandlungen, Bd. I—III. Lpz., 1882—1895.— Vorträge und Reden. Bd. 1—2, Braunschweig, 1884.— Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. 1—6. Lpz., 1898—1903.— Два исследования по гидродинамике. М., 1902.— Учение о слуховых ощущениях как физическая основа для теории музыки. СПб., 1875.— Популярные речи. СПб., 1898—1899.— О нем см.: Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955.— Анти-Диюринг. М., 1957.— В. И. Ленин. Полное собр. соч., т. 18.— Сб. «Герман Гельмгольц (Публичные лекции, читанные в Московском университете)». М., 1892.— П. П. Лазарев. Герман Гельмгольц. М., Изд-во АН СССР, 1956.— В. Л. Грановский, Е. Л. Старокадомская. Герман Гельмгольц. М., 1930.— А. В. Лебединский, У. И. Франкфурт, А. М. Френк. Гельмгольц. М., изд-во «Наука», 1966.

Жан Батист Жозеф Фурье (1768—1830) — французский математик. Работы в области математической физики, алгебры. Лит.: Fourier Oeuvres... publiees par les soins de m. G. Darboux,

t. 1—2, P., 1888—1890.— *Analyse des équations déterminées*, part 1, P., 1834.

Уильям Роун Гамильтон (1805—1865) — английский математик. Применил вариационный метод к механике (принцип наименьшего действия), построил теорию кватернионов. Лит.: W. R. Hamilton. *The mathematical papers*, v. 1—2. Cambridge, 1931—1940.— *Lectures on quaternions*. Dublin, 1855.— *Elements of quaternions*, v. 1—2, 2 ed., L., 1899—1901.— О нем см.: R. P. Graves. *Life of sire W. R. Hamilton*, v. 1—3. Dublin, 1882—1889.— Sir William Hamilton. «*Nature*», L., 1955, 176, N 4474.— Л. С. Полак. В. Р. Гамильтон и принцип стационарного действия. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1936.

Питер Тэт (1831—1901) — английский математик и физик. Работы в области термодинамики. Лит.: W. Thomson and P. Gait. *Treatise on Natural Philosophy*, 1867.

Карл Фридрих Гаусс (1777—1855) — немецкий математик и астроном. Ему принадлежат основополагающие исследования по теории чисел, высшей алгебре, теории рядов, способа наименьших квадратов, теории поверхностей, астрономии, теоретической физике. Лит.: C. Gauss. *Werke*, Bd. 1—11 (издание продолжается).— О нем см.: E. Wörhls. C. F. Gauss. *Ein Lebensbild*. Lpz., 1955.— «Карл Фридрих Гаусс (Сб. статей к 100-летию со дня смерти)». Изд-во АН СССР, М., 1956.

Бернхард Риман (1826—1866) — немецкий математик. Исследования по теории аналитических функций, теории дифференциальных уравнений, аналитической теории чисел, математического учения о пространстве. Лит.: B. Riemann. *Gesammelte mathematische Werke...* 1953.— Б. Риман. Сочинения. М.—Л., 1948.

Л. Лоренц (1829—1891) — датский физик. Работы по оптике, электропроводности и теплопроводности металлов, теории дисперсии. Максвелл указал, что Л. Лоренц в 1867 г. («*Pogg. Ann.*», 131, S. 243) вывел электромагнитную теорию из уравнения Кирхгофа; теория же Максвелла была опубликована в 1865 г.

Карл Нейман (1832—1925) — немецкий математик и физик-теоретик. Работы по электродинамике и по теории потенциала. Дал метод решения задачи Дирихле для случая выпуклых контуров на плоскости и выпуклых поверхностей в пространстве (метод Неймана). Исследовал вторую краевую задачу (задача Неймана). Работы по римановой теории алгебраических функций. Лит.: C. Neuman. *Mathematische Annalen*. 1925, 94.— О нем см.: O. Holder. Carl Neumann. Там же, 96, N. 1 (имеется библиография работ Неймана).

Джордж Буль (1815—1864) — английский логик и математик.

Вводная лекция по экспериментальной физике (*Introductory Lecture on Experimental Physics*, 1871). Напечатано: S. P. II, стр. 241—255.

Рене Декарт (1596—1650) — французский ученый и философ. В своей физике Декарт — материалист, в учении о познании и бытии — идеалист, как математик он является одним из творцов аналитической геометрии. Указал на относительный характер движения и покоя. Отрицал существование пустого пространства и конечную делимость материи. Основной закон движения — это закон сохранения движения, понимаемый скалярно. Дал краткую теорию простых машин. Вывел закон преломления света на границе двух сред. Работы по физиологии. Лит.: R. Des cartes. Oeuvres, publiées par Ch. Adam et P. Tannery, t. 1—12, Suppl., P., 1897—1913.— Correspondance, t. 1—6. P., 1936—1956.— Р. Декарт. Избранные сочинения. М., 1950.— Геометрия. М.—Л., 1938.— О нем см.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Святое семейство. Собр. соч., т. 2, М., 1955.— К. Маркс. Капитал, т. 1, М., 1955.— Ф. Энгельс. Анти-Дюринг. М., 1957.— В. Ф. Асмус. Декарт. М., 1956.— Философская энциклопедия, т. 1. М., 1960, стр. 447—450.

Исаак Ньютон (1643—1727) — английский физик, механик, математик и астроном. Открыл закон всемирного тяготения, сформулировал основные законы классической механики; наряду с Лейбницем разработал дифференциальное и интегральное исчисление; открыл законы разложения белого света на монохроматические лучи; дал теорию движения небесных тел, образующих солнечную систему. Лит.: I. Newton. Opera quae existant omnia, v. 1—5, Londini, 1779—1785.— The correspondence of Isaac Newton. Ed. by H. W. Turnbull. I. Newton's papers and letters..., 3t., Harward Univ. Press., 1959—1964.— И. Ньютон. Математические начала натуральной философии. (В кн.: А. Н. Крылов. Собрание трудов, т. 7. М.—Л., 1936).— Оптика, или трактат об отражениях, преломлениях, прызваниях и цветах света (Пер. с англ. С. И. Вавилова). М.—Л., 1927.— Лекции по оптике (Пер. С. И. Вавилова). М.—Л., 1946.— Всеобщая арифметика, или книга об арифметическом синтезе и анализе (Пер. А. П. Юшкевича). М.—Л., 1948.— Математические работы (Пер. Д. Д. Мордухай-Болтовского), М.—Л., 1937.— О нем см.: G. J. Gray. A bibliography of the works of Sir Isaac Newton together with a list of books illustrating his works. Second edition, Cambridge, 1907.— С. И. Вавилов. Исаак Ньютон. М., Изд-во АН СССР, 1961 (имеется краткий библиографический указатель, стр. 201—204).

Александр Фридрих Гумбольдт (1769—1859) — немецкий естествоиспытатель и путешественник. О нем см.: R. Bruhns. Alexander von Humboldt (Eine wissenschaftliche Biographie). Bd. 1—3, Lpz., 1872.— H. Scurla. Alexander von Humboldt. V., 1955 (имеется список трудов Гумбольдта и библиография работ о нем).

Джордж Грин (1793—1841) — английский математик. В 1828 г. в книге «Опыт применения математического анализа к теории электричества и магнетизма» ввел понятие потенциала. Вывел соотношение между интегралами по объему и по поверхности. Разработал методы решения электростатических задач. Исследовал отражение и преломление света в кристаллических средах. Лит.:

J. Green e. The mathematical papers. L., 1871.— О нем см.: «Studies and essays in the history of science and learning». N. Y., 1947.

Джордж Габриель Стокс (1819—1903) — английский физик и математик. Работы Стокса относятся к оптике, гидродинамике и математической физике. Стокс впервые выяснил явление, когда лучистая энергия одного периода превращается в лучистую энергию другого периода, назвав это явление флюоресценцией, поскольку оно впервые наблюдалось на плавленом шпате (флюорите). Установил закон, что лучи, испускаемые флюоресцирующим веществом, обладают меньшей преломляемостью, чем лучи, поглощенные этим веществом. Работы по спектральному анализу, дифракции света, прохождении волн через различные среды. В 1845 г. вывел уравнения, выражающие закон движения жидкости с учетом вязкости (уравнение Навье-Стокса). Им установлен закон, определяющий силу сопротивления, который испытывает твердый шар при медленном движении в неограниченной вязкой жидкости. Лит.: J. Stokes. Mathematical and physical papers..., v. 1—5. Cambridge, 1880—1905.— Memoir and scientific correspondence, v. 1—2. Cambridge, 1907.— On light. First course, on the nature of light. L., 1883.

О математической классификации физических величин (On the Mathematical Classification of Physical Quantities, 1871). Напечатано: S. P. I., стр. 257—266.

Моссо ти — итальянский физик. Работы о молекулярных силах, развил (независимо от Клаузиуса) теорию диэлектриков.

Габриель Ламе (1795—1870) — французский математик и инженер. В 1820—1832 гг. преподавал в Институте инженеров путей сообщения в Петербурге. Работы в области математической физики и теории упругости; разработал теорию криволинейных координат; ввел специальный класс функций (функции Ламе). Лит.: G. Lamé. Leçons sur les coordonnées curvilignes et leur divers applications, P., 1859.— Leçons sur la théorie analytique de la chaleur. P., 1861.— О нем см.: J. Malkin. The hundredth anniversary of the publication of Lamé's work on elasticity. «Scripta Mathematica». N. Y., 1955, v. 21, N 1, p. 44.

Симеон Дени Пуассон (1784—1840) — французский механик, математик и физик. Изучал вопрос об устойчивости солнечной системы. Вывел дифференциальные уравнения возмущенного движения. По теории притяжения опубликовал: «Замечания об уравнении теории притяжения» (1813), «О притяжении сферидов» (1829), «О притяжении однородных эллипсоидов» (1835). Многие работы по внешней баллистике, теории упругости, гидромеханике. Известны работы по капиллярности, теории теплопроводности, электростатике и магнетизму. Математические работы по определенным интегралам, уравнениям в конечных разностях, теории дифференциальных уравнений с частными производными, теории вероятностей. Лит.: S. D. Poisson. Théorie mathématique de la chaleur, P., 1835, Supplément, 1837.— Traité de mécanique, 2 vol., P., 1811.— Traité de mécanique. 2 éd. T., 1—2, P., 1833. 3-me éd. Bruxelles, 1838.— Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung und deren wichtigsten Anwendungen. Braunschweig, 1841.— А. Попов, Об ученых заслугах Пуассона. (Речь, читанная на торжест-

венном собрании Казанского университета 5 июня 1849 г.), Казань, 1849.— Ф. Араго. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров, т. 3. СПб., 1861.— Ф. Клейн. Лекции о развитии математики в XIX столетии. (Пер. с нем.). ч. 1, М.—Л., 1937.— И. Б. Погрёбыцкий. От Лагранжа к Эйнштейну. М., изд-во «Наука», 1966.— A. Heller. Geschichte der Physik. Stuttgart, 1844, Bd. II, S. 602—604.

Андре Мари Ампер (1775—1836) — французский физик и математик, один из основоположников электродинамики. Установил закон взаимодействия электрических токов, построил теорию магнетизма, исходя из гипотезы, согласно которой магнитные взаимодействия есть взаимодействие круговых электрических токов. Лит.: A. M. Ampère. Journal et correspondance de André Marie Ampère, 9 éd. P., 1893.— Correspondence du grand Ampère, publ. par D. de Launay..., v. 1—3, P., 1936—1943.— A. M. Ампер. Электродинамика, М., 1954 (имеется библиография трудов Ампера и литературы о нем).— О нем см.: C. Vaisson. La vie et les travaux d'André Marie Ampère 1886.— L. Launay. Le grand Ampère d'après des documents inédits. 2 ed. P., 1925.— «Revue générale de l'électricité». P., 1922, 6 Année, Novembre (Numere special: Ampère André-Marie. 1775—1836).— A. Heller. Geschichte der Physik. Bd. II, S. 607—612.— B. Diberner. Ten founding fathers of the electrical science. V. A. M. Ampere and the beginning of electrodynamics. «Electr. Engng.», 1954, 73, N 8, p. 724—725.

О действиях на расстоянии (On Action at a Distance)

Напечатано S. P., II, стр. 311—323.

Роберт Бойль (1627—1691) — английский физик и химик. Усовершенствовал воздушный насос и изложил свои опыты с ним в сочинении «Новые физико-математические опыты относительно упругости воздуха» (1660). В 1662 г. совместно с Р. Тоунлеем установил обратную зависимость изменения объема воздуха от давления. Придерживался атомистических взглядов. Один из основателей качественного химического анализа. Дал определение химического элемента. Лит.: R. Boyle. The works..., v. 1—3, L., 1699—1700.— The works..., v. 1—6, L., 1722.— О нем см.: Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955.— Анти-Дюринг. М., 1957.— L. More. The life and works of the honourable Robert Boyle. N. Y., 1944.— Robert Boyle's experiments in pneumatics, ed. by T. B. Conant. Cambridge, 1950.

Роджер Котс (1682—1716) — издатель «Principia» Ньютона. Лит.: R. Cotes. Correspondence of Sir Isaac Newton and Professor Cotes, including letters of other eminent men, now first published from the originals in the Library of Trinity College. Cambridge, 1850.— Hydrostatical and Pneumatical Lectures... Published with notes..., 1738.— О нем см.: Pemberton. Epistola and amicum de Cotesii inventis. 1722.

Генри Кавендиш (1731—1810) — английский физик и химик. В учении об электричестве в известной мере предвосхитил закон Кулона. Открыл влияние среды на емкость конденсаторов. (Его работы по электричеству были опубликованы только в

1879 г.) В 1798 г. с помощью крутильных весов определил взаимодействие тел под влиянием тяготения. Эти работы позволили ему вычислить среднюю плотность Земли. Получил в чистом виде водород и углекислый газ, измерил их плотность (1766), определил содержание кислорода в воздухе (1789), ряд других экспериментальных работ по химии. Лит.: Н. Cavendish. The scientific papers, v. 1—2. Cambridge, 1921.— О нем см.: G. Wilson. The life of Henry Cavendish, L., 1851.— В. Н. Меншуткин. Химия и пути ее развития. М.—Л., 1937.— Ch. Susskind. Henry Cavendish, electrician. «Journal of the Franklin Institute», 1950, 249, N 3.— A. Heller. Geschichte der Physik («Henry Cavendish»), Stuttgart, 1884, Bd. II, S. 455—457.

Шарль Огюстен Кулон (1736—1806) — французский физик. В 1776 г. написал труд о теории сводов, в 1777 г. — исследование о кручении волос и шелковых нитей; в дальнейшем исследовал кручение металлических нитей. Установил законы кручения. В 1781 г. исследовал опытным путем трение при скольжении и качении. Им установлены законы сухого трения. В 1784 г. построил крутильные весы. В 1785—1789 гг. с помощью крутильных весов установил закон электростатических и магнитных взаимодействий. Лит.: С. А. Coulomb. Mémoires, P., 1884.— О нем см.: О. А. Лежнева. Труды Ш. О. Кулона в области электричества и магнетизма. «Электричество», 1956, № 11, 79—81.— A. Heller. Geschichte der Physik, Bd. II («Charles-Augustin Coulomb», стр. 496—503).— «150 лет со дня смерти Шарля Огюстена Кулона», («Вестн. АН СССР», 1956, № 11, стр. 113—114).— О. А. Лежнева. Жизнь и научная деятельность Шарля Огюстена Кулона, (В сб.: «ТИИЕиТ», 1957, 19, стр. 386—396).

Руджер Иосип Бошкович (1711—1787) — славянский натурфилософ, математик, оптик и астроном. В сочинении «Теория натуральной философии, приведенная к единому закону сил, существующих в природе» (1858) Бошкович объединил учение о непротяженных монадах с учением о силах притяжения и отталкивания. Изучал неподвижные звезды, фигуру Земли, прохождение Меркурия через меридиан; дал математическую трактовку теории телескопа и других астрономических приборов. О нем см.: Н. V. Gill. Roger Boscovich, S. J. Forerunner of modern physical theories. Dublin, 1941.— F. Racki. Zivot i djela R. J. Bošćovića. Zagreb, 1888 (имеется библиография трудов Бошковича).— Э. Колман. Жизнь и научная деятельность Руджера Бошковича (1711—1782). В сб.: «Вопросы истории ест. и техники», 1958, в. 2, стр. 92—109.— A. Heller. Geschichte der Physik. Bd. II, Stuttgart, 1884, стр. 548, 564, 565.— П. И. Раскина. Р. И. Бошкович — почетный член Петербургской академии наук. «Вестн. АН СССР», 1957, № 1, стр. 92—93.— A. L. Maskau. Roger Boscovich: a 20th century mind in the 18 century. «New Scientist», 1958, 3, № 68, p. 17—18.

Ханс Кристиан Эрстед (1777—1851) — датский физик. В 1822 г. исследовал сжимаемость жидкостей с помощью изобретенного им пьезометра. Разработал методы получения хлористого и металлического алюминия. Изучал действие гальванического тока на магнитную стрелку. Работы Эрстеда положили начало исследованиям по электромагнетизму. Пытался найти связь между

светом, теплотой, электричеством и магнетизмом. Лит.: Н. С. Оерстед. *Gesamelte Schriften*. Bd. 1—6, 1850—1851.— *Naturvidenskabelige Skrifter*, t. 1—3. København, 1920.— Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку. (В кн.: А. М. Ампер. *Электродинамика*. М., 1954, стр. 433—439.) — О нем см.: М. И. Радовский. Из эпистолярного наследия Г. Х. Эрстеда. «ТИИЭиТ», 1957, стр. 642—649.— И. Нильсен. Ганс Эрстед. «Физика в школе», 1939, № 4, стр. 11—16.— А. Heller. *Geschichte der Physik*. Bd. II («Н. Chr. Oersted», S. 612—614).— E. Gleditsch. Hans Christian Ørstedes kjemiske arbeider og forbindelsen med Wother. «Fra fys. verden», 1955, 17, N 3, стр. 111—129 (норв.).

Жан Бернар Леон Фуко (1819—1868) — французский физик. В 1850 г. обнаружил отклонение плоскости качания маятника вследствие вращения Земли. В 1851 г. осуществил опыт с 67-метровым маятником, наглядно показавшим вращение Земли вокруг своей оси. Пользуясь методом вращающегося зеркала, измерил скорость света в воздухе и в воде (1850). Обнаружил нагревание металлических тел при их быстром вращении в магнитном поле (токи Фуко). Построил поляризационную призму, пригодную для работы в ультрафиолетовой области. Совместно с Физо разработал способ наблюдения интерференции при помощи зеркал Френеля и способ измерения вращения плоскости поляризации. Лит.: J. Foucault. *Recueil des travaux scientifiques...* P., 1878.— О нем см.: J. A. Lissajous. *Notice historique sur la vie et les travaux de Léon Foucault*, 2 éd. 1875.— Léon Foucault, sa vie et son oeuvre scientifique. Bruxelles, 1879.— «К избранию Ж. Б. Л. Фуко членом-корреспондентом Петербургской академии наук» («Вестник АН СССР», 1955, № 9).

Томас Юнг (1773—1829) — английский физик, врач, астроном, исследователь египетских иероглифов. В 1793 г. указал, что аккомодация глаза вызвана изменением кривизны хрусталика. В 1800 г. в работе «Опыты и проблемы по звуку и свету» рассмотрел вопрос о суперпозиции волн. В 1801—1802 гг. объяснил ньютоновские кольца с помощью принципа интерференции и описал первые опыты по определению длин световых волн. В 1817 г. в письме к Араго высказал гипотезу о поперечности световых волн. Юнг разработал теорию цветного зрения: в глазу существуют три рода светочувствительных нервных окончаний; раздражение первых вызывает ощущение красного, вторых — зеленого, а третьих — синего цвета (в дальнейшем в теории Юнга — Гельмгольца — фиолетового). Исследовал деформацию сдвига и ввел модуль Юнга — числовую характеристику упругости при растяжении и сжатии. Лит.: J. Young. *Miscellaneous works*, v. 1—3, L., 1855.— *Memoir of the life of Thomas Young with a catalogue of his works and assays*. L., 1831.— О нем см.: A. Wood. *Thomas Young natural philosopher (1773—1829)*. Cambridge, 1954 (имеется библиография трудов Юнга).— Ф. Араго. *Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров*, т. 2, СПб., 1900, стр. 31—66.— А. Heller. *Geschichte der Physik*. Bd. II («Thomas Young», стр. 557—564).— A. Ferguson, J. Ferguson. *Thomas Young, Physician, natural philosopher and egyptologist*. «School Sci. Rev.», 1955, 36, N 130, стр. 367—373.

Огюстен Жан Френель (1788—1827) — французский физик. Экспериментальные и теоретические исследования по дифракции света. Создал законченную теорию дифракции, основанной на принципе Гюйгенса в формулировке Френеля. Опытным путем исследовал влияние поляризации на интерференцию. Обосновал поперечный характер световых волн. Открытие и объяснение с волновой точки зрения круговой и эллиптической поляризации. Объяснение явления вращения плоскости поляризации. Создание теории двойного лучепреломления. Гипотеза о неподвижном эфире. Разработал ряд других важнейших вопросов физической оптики. Лит.: O. Fresnel. *Oeuvres complètes...*, t. 1—3. P., 1866—1870.— О. Френель. О свете (Мемуар). М.—Л., 1928.— Избранные труды по оптике. М., 1955.— О нем см.: G. A. Boutrou. *Augustin Fresnel his time, life and work (1788—1827)*. L., 1949.

Джеймс Прескотт Джоуль (1818—1889) — английский физик. Экспериментально показал, что теплота может быть создана за счет механической работы, определил механический эквивалент тепла, тем самым им дано обоснование закону сохранения и превращения энергии. Рассматривал теплоту как движение частиц. Лит.: J. P. Joule. *The scientific papers*, v. 1—2. L., 1884—1887.— Д. П. Джоуль. Некоторые замечания о теплоте и о строении упругих жидкостей. (В сб. «Основатели кинетической теории материи». М.—Л., 1937.)— О нем см.: Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955.— A. Wood. *Joule and the study of energy*. L., 1925.

Фарадей (Faraday)

Напечатано S. P., II, стр. 355—360.

Жан Батист Дюма (1800—1884) — французский химик. В 1826 г. нашел способ определения плотности паров. С помощью этого способа определил атомные веса некоторых элементов. Из отношений плотностей газов получил отношение их атомных весов. Четкого различия между атомом и молекулой у Дюма не было. О нем см.: А. В. Гофман. Химик Жан Батист Андре Дюма (пер. с нем.), СПб., 1885.— E. Maindron. *L'oeuvre de Jean-Baptiste Dumas*. P., 1886.

Вильгельм Эдуард Вебер (1804—1891) — немецкий физик. Работы в области электрических и магнитных явлений. Открыл закон взаимодействия движущихся зарядов. Один из авторов гипотезы о прерывности электрического заряда и электрического строения вещества. Разработал абсолютную систему электрических и магнитных единиц. Лит.: W. A. Weber. *Werke*, Bd., 1—6. B., 1892—1894.

Молекулы (Molecules)

Напечатано S. P., II, стр. 361—377.

Анаксагор из Клазомен в Малой Азии (500—428 гг. до н. э.) — древнегреческий натурфилософ материалистического направления. Выдвинул учение о неразрушимых элементах, которые он считал бесконечными по количеству и бесконечно делимыми. Материю считал инертной. Лит.: «Фрагменты». (В кн.: А. Маковельский. Досократики, ч. 3. Казань, 1919, стр. 104—161; в кн.: «Античные философы», сост. А. А. Аветисян. Киев, 1955,

в кн.: Н. Diels. *Fragmente der Vorsokratiker...* 5 Aufl., Bd. 2, В., 1935, S. 5—44).

Сократ (469—399 гг. до н. э.) — древнегреческий философ-идеалист.

Георг Луи Лесаж (1724—1803) — швейцарский ученый. Стремился к объединению древней атомистики с учением Ньютона. Лит.: «*Lucrese Mewtonien*». «*Nouv. Mém. de l'Acad. Royal 1782*». Berlin, 1784, S. 404—432.— Физик Прево издал книгу: «*Traité de physique, redigé d'après les notes de Mr. Lesage*» (Женева, 1818).

Даниил Бернулли (1700—1782) — математик, механик. Работы по обыкновенным дифференциальным уравнениям, по теории вероятностей, по теории рядов. Вывел основное уравнение движения идеальной жидкости. Разрабатывал кинетические представления о газах. Лит.: D. Bernoulli. *Hydrodynamica sive de viribus et motibus fluidorum commentarii*, 1738.— Д. Бернулли. *Гидродинамика*, ч. 10-я. (В кн.: «*Основатели кинетической теории*». М.—Л., 1937).— О нем см.: Т. И. Райнов. Д. Бернулли и его работа в Петербургской академии наук. «*Вестн. АН СССР*», 1938, № 7—8, стр. 84—93).

А. Крениг (1822—1879) — немецкий физик и химик. Учитель реальной школы. Один из зачинателей кинетической теории. Писал также в области философии и теологии. Работы Кренига помещены в «*Poggend. Annalen*». Лит.: A. Krönig. «*Ann. d. Physik*», 1856, 99, S. 315—322; «*Annal. de Chimie*», 1857, 90, p. 491—497.

Жак Александр Шарль (1746—1823) — французский ученый. Работы по воздухоплаванию. Впервые заполнил водородом воздушный шар с оболочкой из прорезиненной ткани. Изучал расширение газов. О нем см.: A. Heiler. *Geschichte der Physik*. Bd. II («*Jacques-Alexander-Cesar Charles*», стр. 530—660).

Людвиг Больцман (1844—1906) — австрийский физик. Экспериментальные работы: определение диэлектрических постоянных газов и кристаллических твердых тел; впервые показал, что диэлектрическая проницаемость в кристаллах серы имеет разную величину в зависимости от взятого в кристалле направления. Теоретический вывод закона Стефана (закон Стефана — Больцмана). Классические исследования по кинетической теории газов и статистического истолкования второго начала термодинамики. Лит.: L. Boltzmann. *Wissenschaftliche Abhandlungen*, Bd. 1—3. Lpz., 1909.— *Populäre Schriften*, 2 Aufl., Lpz., 1919.— *Кинетическая теория материи*. М., 1939.— Л. Больцман. *Очерки методологии физики* (сб. статей). М., 1929.— Лекции по теории газов. М., 1956.— О нем см.: E. Broda. *Ludwig Boltzmann. Mensch. Physik, Philosoph. W.*, 1955. УФН, 1957, 61, вып. 1.— Э. Брода. *Людвиг Больцман*. (В сб.: «*Вопросы истории естествознания и техники*», М., 1957, вып. 4.)

Жозеф Луи Гей-Люссак (1778—1850) — французский физик и химик. В 1802 г. независимо от Дальтона открыл закон одинакового расширения газов и паров при одинаковом повыше-

нии температуры. В 1808 г. нашел, что газы соединяются друг с другом в простых кратных объемных отношениях и что объем полученного соединения, если оно газообразно, находится в простом кратном отношении к объемам каждого из исходных газов. О нем см.: Ф. Араго. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров, т. 2, СПб., 1860.— Ш. А. Вюрц. История химических доктрин (пер. с франц.). СПб. 1869.— К. R. Webb. Gay-Lussak (1778—1850) as chemist. «*Endeavour*», 1950, 9, N 36.— A. Heller. Geschichte der Physik. Bd. II. («*Louis-Joseph Gay-Lussac*», стр. 677—683). Stuttgart, 1884.— P. Tolibois. Cérémonie commémorative du centième anniversaire de la mort de Gay-Lussac à Saint-Léonard de Noblat. «*Notices et discours Just. France Acad. Sci...*» P., 1957, v. 3, p. 99—106.

Джозеф Пристли (1733—1804) — английский химик. Ряд открытий в химии газов. Лит.: J. Priestley. Experiments and observations on different kinds of air, v. 1—3. L., 1774—1777.— Memoirs to the year 1795, v. 1—2. L., 1806—1807.— Д. Пристли. Избранные сочинения (пер. с англ.). М., 1934.— О нем см.: P. J. Hartog. Bicentenary of Joseph Priestley (1733—1804). «*Journal of the Chemical Society*». L., 1933, 2, p. 896—902.— Б. Яффе. Д. Пристлей. «*Успехи химии*», 1938, № 9, стр. 1419—1429.

Джон Дальтон (1766—1844) — английский химик и физик. В 1793 г. издал «Метеорологические наблюдения и опыты», в 1794 г. описал дефект зрения, названный дальтонизмом. В 1801 г. открыл закон парциальных давлений. В 1803 г. установил закон растворимости газов. Широко развил атомистические воззрения в применении к химии. В 1803 г. вывел закон кратных отношений, опираясь на атомные представления. Лит.: «Сборник избранных работ по атомистике (1802—1810)» (пер. с англ.). Л., 1940.— О нем см.: W. Henry. Memoirs of the life and scientific researches of John Dalton. L., 1954.— R. A. Smith. Memoir of John Dalton and history of the atomic theory up to his time. L., 1856.— H. E. Rose and A. Harden. A new view of the origin of Dalton's atomic theory. L.—N. Y., 1896.— E. M. Brockbank. John Dalton. Some unpublished letters of personal and scientific interest. Manchester, 1944.— Б. М. Кедров. Атомистика Дальтона. М.—Л., 1949.

Иозеф Стефан (1835—1893) — австрийский физик. Работы по оптике, акустике, электромагнетизму и теплофизике. В 1879 г. опытным путем доказал, что энергия, излучаемая нагретым телом, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры тела. В 1884 г. это было установлено Больцманом теоретически (закон Стефана — Больцмана). О нем см.: A. Obermeyer. Zur Erinnerung Josef Stefan... W., 1893.

Иозеф Лосмидт (1821—1895) — австрийский физик. Работы в области кинетической теории газов, кристаллографии, стереохимии. Определил число молекул в единице объема газа при нормальных условиях (число Лосмидта). Лит.: G. Loschmidt. Konstitutionsformeln der organischen Chemie in graphischer Darstellung... «*Ostwald's Klassiker*», N 190, 1913.

О «Соотношении физических сил» Грова (Grove's «Correlation of Physical Forces», 1874).

Напечатано: S. P., II, стр. 400—405.

Вильям Роберт Гров (1811—1896) — английский физик. В 1840 г. изобрел платиновый элемент, посвящий его имя. Лит.: W. Grove. Correlation to Physical Forces. 1874.— У. Гров. Соотношение физических сил (пер. с англ.). Харьков, 1864.— О нем см.: Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., 1955.

Юлиус Роберт Майер (1814—1878) — немецкий ученый. Одним из первых открыл закон сохранения и превращения энергии. Лит.: Р. Майер. Закон сохранения и превращения энергии. Четыре исследования (1841—1851). М.—Л., 1933.— О нем см.: «Robert Mayer und das Energieprinzip 1842—1942 Gedenkschrift zur Wiederkehr der Entdeckung des Energieprinzips». В., 1942 (имеется библиография работ Майера и литературы о нем).— Б. Г. Кузнецов, У. И. Франкфурт. К истории закона сохранения и превращения энергии. «Труды ИИЕиТ». М., Изд-во АН СССР, 1959, т. 28, стр. 349—357.

О динамическом доказательстве молекулярного строения тел (On the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies, 1875).

Напечатано: S. P., II, стр. 418—438.

Галилео Галилей (1564—1642) — итальянский механик, астроном, физик. Статические исследования о машинах исходят из общего принципа равновесия. Динамические исследования о законах свободного падения тел, о падении по наклонной плоскости, о движении тела, брошенного под углом к горизонту, об изохронизме. Исследования о прочности материалов. В 1609 г. самостоятельно построил свой первый телескоп с выпуклым объективом и вогнутым окуляром. Открытие фаз Венеры, солнечных пятен и вращения Солнца. В 1612 г. опубликовал «Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и тех, которые в ней движутся». Защита и обоснование коперниканских идей вызвало гонения со стороны католической церкви и запрещение «Диалога о двух системах мира». В 1638 г.— «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки», где дано обоснование динамики. Лит.: Galileo Galilei. Le opere. Edizione nazionale, v. 1—20. Firenze, 1890—1909.— Галилео Галилей. Избранные труды. М., изд-во «Наука», 1964, т. 1—2 (имеется библиография трудов Галилея и литературы о нем).— А. Carli, A. Favaro. Bibliografia galileiana. Firenze, 1896.

Жозеф Луи Лагранж (1736—1813) — французский математик и механик. Работы по вопросам математического анализа, алгебре, теории чисел, теории дифференциальных уравнений, астрономии, механики. Лит.: J. L. Lagrange. Oeuvres, t. 1—14. P., 1867—1892.— О нем см.: «Жозеф Луи Лагранж. 1736—1936» (сб. статей к 200-летию со дня рождения). М.—Л., 1937.

Пьер Симон Лаплас (1749—1827) — французский математик, астроном и физик. Работы по дифференциальным урав-

нениям, теории вероятностей, алгебре. Вывел формулу для скорости распространения звука в воздухе; совместно с А. Лавуазье исследовал скрытую теплоту плавления тел. Развил методы небесной механики, выдвинул космогоническую гипотезу. Лит.: P. Laplace. Oeuvres, t. 1—14, P., 1878—1912.— П. С. Лаплас. Изложение системы мира, т. 1—2, СПб., 1861.— Опыт философии теории вероятностей. М., 1908.— О нем см.: H. Andoyer. L'oeuvre scientifique de Laplace. P., 1922.— Б. А. Воронцов-Вельяминов. Лаплас. М., 1937.

Ян (Иоганн) Ван-дер-Ваальс (1837—1923) — нидерландский физик. В своих исследованиях о непрерывности газообразного и жидкого состояния учел объем молекулы газа и наличие взаимного притяжения молекул; на основе этих представлений объяснил взаимный переход газообразного и жидкого состояний.

Уравнение Ван-дер-Ваальса $(p + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT$ (где p — давление газа, V — удельный объем, T — абсолютная температура, R — газовая постоянная) в силу принятого механизма молекулярного взаимодействия точно описывает поведение реальных газов только при высоких температурах и малых давлениях. В остальных случаях дает лишь качественную характеристику поведения реального газа. В 1890 г. дал уравнение для бинарной двухфазной смеси. В 1894 г. усовершенствовал термодинамическую теорию капиллярности. Лит.: J. D. Van der Waals. Über die Continuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes. Lpz., 1899.— Я. Д. Ван-дер-Ваальс. Курс термостатики, ч. 1—2. М., 1936 (совм. с Ф. Констаммом).— О нем см.: R. E. Oesper. Johannes Diderik van der Waals. «Journal of Chemical Education», 1954, v. 31, N 11.

Виллард Гиббс (1839—1903) — американский физик. Один из основателей химической термодинамики и статистической механики. Лит.: W. Gibbs. The collected works, v. 1—2, N. Y.—L., 1928.— The scientific papers, v. 1—2. N. Y., 1906.— Д. В. Гиббс. Термодинамические работы. М., 1950.— Основные принципы статистической механики. М.—Л., 1946.— О нем см.: В. К. Семенченко. Д.-В. Гиббс и его основные работы по термодинамике. «Успехи химии», 1953, 22, вып. 10.— У. И. Франкфурт, А. М. Френк. Джозайя Виллард Гиббс. М., изд-во «Наука», 1965.

Коллин Маклорен (1698—1746) — английский математик. Установил признак сходимости числовых рядов. В «Трактате о флюксиях» (1742) пытался обосновать учение о пределах и флюксиях Ньютона с помощью метода исчерпывания. Исследовал фигуры равновесия вращающейся жидкости. Уделял внимание вопросу о притяжении однородным эллипсоидом вращения тяжелой точки. Ряд работ по теории плоских кривых высших порядков. Лит.: S. Mascheroni. Geometria organica: sive descriptio linearum curvarum universalis. Londini, 1720.

Ричард Бентли (род. 1662) — английский филолог, профессор теологии. Лит.: J. Newton. Four Letters... to Doctor Bentley. L., 1756.

Ф. Кольрауш (1840—1910) — немецкий физик. Работы в области электрических и магнитных измерений, по электролизу и

термоэлектричеству.— Лит.: F. Kohlrausch. *Praktische Physik*. Bd. 1—2. 19 Aufl., Lpz., 1950—1951.

Алексис Терез Пти (1791—1820) — французский физик. Совместно с Дюлонгом показал, что атомная теплоемкость всех простых тел в кристаллическом состоянии приблизительно постоянна (1819); вывел формулу для скорости охлаждения (1818); изобрел калориметр. Лит.: A. Petit. *Recherches sur la mesure des températures et sur les lois de la communication de la chaleur*. «Annales de chimie», P., 1817, t. 7, p. 113—154, 225—264, 337—367 (совместно с Дюлонгом).— О нем см.: A. Heller. *Geschichte der Physik*, Bd. II («Alexis-Tores Petit»). Stuttgart, 1884.

Пьер Луи Дюлонг (1785—1838) — французский физик и химик. В 1811 г. получил хлористый азот, в 1816 г. фосфорноватистую кислоту. Установил (совместно с Пти) так называемый закон Дюлонга — Пти. В 1824—1830 гг. совместно с Ф. Араго определил давление насыщенного водяного пара при различных температурах.— О нем см.: P. Lemaury and R. E. Oesper. *Pierre Louis Dulong. his life and work*. (В кн.: «*Chymia. Annual studies in the history of chemistry*, ed. T. L. Davis», v. 1. Philadelphia, 1948, p. 171—190.— A. Heller. *Geschichte der Physik* («Pierre-Louis Dulong»). Stuttgart, 1884, Bd. II, S. 684—686.

Атом (Atom)

Напечатано: S. P., II, стр. 445—484.

Зенон Элейский (род. ок. 490—430 до н. э.) — древнегреческий философ. Указал на реальную противоречивость движения и пространства. Выдвинул апории против мыслимости движения. Упомянутый Максвеллом Бэль, французский картезианец, не понял аргументации Аристотеля о различении потенциальной и актуальной делимости. Лит.: *Философская энциклопедия*, т. 2. М., 1962.

Аристотель (384—322 до н. э.) — древнегреческий философ и ученый. Сочинения Аристотеля охватывают логику, психологию, философию, естествознание, историю, политику, этику, эстетику. Лит.: *Aristotelis opera*, v. 1—5. Berolini, 1831—1870.— *The works of Aristotle. transl. into English...*, v. 1—11. Oxf., 1908—1931.— О нем см.: «История философии», т. 1. М., 1957.

Бенедикт (Барух) Спиноза (1632—1677) — голландский философ-материалист. Согласно его учению, субстанция есть причина самой себя. Субстанции свойственна вечность во времени и бесконечность в пространстве. Качественная характеристика субстанции выражена в ее атрибутах. Лит.: Б. Спиноза. *Избранные произведения*, т. 1—2. М., Госполитиздат, 1957.— О нем см.: БСЭ, т. 40, 1957, стр. 298—300.

Оскар Мейер — немецкий физик. Лит.: O. Meyer. *Theorie der Gase* (1 Aufl., 1877).— *Verfahren zur Bestimmung d. inneren Reibung von Flüssigkeiten*. «*Wied. Annalen*», 1891, 43.— *Bestimm. d. inneren Reib. nach Coulomb's Verfahren*. «*Wied. Ann.*», 1877, 32.

Густав Роберт Кирхгоф (1824—1887) — немецкий физик. Теоретические исследования течения электричества по проводникам различной конфигурации, исследования о потенциале, работы по механике (теория деформации, движение и равновесие упругих тел, течение жидкости). Сформулировал основной закон теплового излучения. Совместно с Бунзеном положил начало и разрабатывал спектральный анализ. Дал строгую формулировку принципа Гюйгенса—Френеля. Лит.: G. Kirchhoff. Vorlesungen über mathematische Physik, Bd. 1—4, Lpz., 1874—1894.— Gesammelte Abhandlungen, Lpz., 1882.— Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spektren der chemischen Elemente, В., 1861—1862.— О нем см.: А. Г. Столетов. Густав Роберт Кирхгоф. Собр. соч., т. 2. М.—Л., 1941.— Т. Н. Горнштейн. Биографическая справка. (В кн.: Г. Кирхгоф. Механика. М., Изд-во АН СССР, 1962, стр. 387—390).— Библиография научных трудов Г. Кирхгофа. (В кн.: Г. Кирхгоф. Механика, стр. 394—398.)— Н. Klamfoth, G. R. Kirchhoff. «Technische Gemeinschaft», 1954, N 5.

Джон Гершель (1792—1871) — английский астроном. Сын Вильяма Гершеля. Открыл свыше трех тысяч двойных звезд, выполнил ряд теоретических работ по определению орбит двойных звезд. Работы в области математики и оптики. Обнаружил способность гипосульфита закреплять фотографическое изображение. Лит.: Д. Гершель. Очерки астрономии, т. 1—2. М., 1861—1862.

Притяжение (Attraction)

Напечатано: S. P., I, стр. 485—491.

Роберт Гук (1635—1703) — английский естествоиспытатель. В 1659 г. построил первый воздушный насос. В 1660 г. (совместно с Гюйгенсом) установил постоянные точки термометра (точки таяния льда и кипения воды); в том же году открыл закон пропорциональности между силой, приложенной к упругому телу, и его деформацией (закон Гука). Высказал ряд соображений о тяготении. Усовершенствовал микроскоп, производил наблюдения над строением материи и описал их в труде «Микрография» (1665). Работы в ряде других областей науки. Лит.: R. Hooke. Micrographia, or some physiological descriptions of minute bodies, L., 1665.— Lectures de potentia restitutiva L., 1678.— An attempt to prove the motion of the Earth from observations, L., 1674.— Lectiones Cutlerianae, L., 1679.— Posthumous works, L., 1705.— Р. Гук. Общая схема, или идея, настоящего состояния естественной философии. (В кн.: «Научное наследство. Естественно-научная серия», т. 1. М.—Л., 1948.) — О нем см.: Т. И. Райнов. Роберт Гук и его трактат об экспериментальном методе. (В кн.: «Научное наследство», т. 1, М.—Л., 1948.) — E. N. C. Andrade. Robert Hooke (1635—1703.) — «Nature», 1953, 171, N 4348.— Life and work of Robert Hooke, ed. by R. W. T. Günther. Oxford, 1930—1935. «Early science in Oxford», v. 6—8, 10.— «R. Hooke». «Postepy fizyki», Warszawa, 1953, t. 4, N 3.— E. N. C. Andrade. Robert Hooke. «Scientific American», 1954, 191, N 6.— E. Williams. Hooke's Law and the Concept of the Elastic Limit. «Annals of Science», 1956, 12, N 1, 74—83.— A Bibliography of Dr. Robert Hooke by G. Keynes. Oxford, 1960.

Джемс Чэллис (1803—1882) — профессор физики и астрономии. В 1830—1832 гг. (еще до Коши) пытался объяснить дисперсию света на основе волновой теории, допустив, что атомы эфира малы по сравнению с расстояниями между ними. Большая дискуссия со Стоксом по вопросам абберации света и длинная переписка. С 1859 г. разрабатывал волнообразную теорию тяготения.

Гюйо — французский ученый, объяснял тяготение сгущением и разрежением эфира.

Шельбах — преподаватель гимназии в Берлине. В 1870 г. занимался вопросом о звуковых колебаниях упругой среды.

Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц (H. L. F. Helmholtz, (1877)).

Напечатано: S. P., II, стр. 592—598.

Ф. К. Дондерс (1818—1889) — голландский физиолог и офтальмолог.

И. Б. Листинг (1808—1882) — немецкий математик и физик. Лит.: И. Б. Листинг. Предварительные исследования по топологии. М., 1932.

Иоганнес Мюллер (1801—1858) — немецкий естествоиспытатель, автор работ в области физиологии, сравнительной анатомии, эмбриологии и гистологии. О нем см.: X. С. Коштоянц. Очерки по истории физиологии в России. М.—Л., 1946.

Строение тел (Constitution of Bodies)

Напечатано: S. P., II, стр. 616—624.

Ш. Каньяр де ля Тур (1776—1859) — французский ученый. В 1822 г. исследовал критическое состояние, нагревая жидкости в запаянных трубах. О нем см.: «Comptes Rendus» т. 49, стр. 1023.

Томас Эндрюс (1813—1885) — английский химик. Работы по критическому состоянию. Выяснил поведение однокомпонентных систем из жидкости и пара в критической точке и ее окрестностях. Создал теорию непрерывности газообразного и жидкого состояний вещества (1869). Лит.: Т. Эндрюс. О непрерывности газообразного и жидкого состояний вещества. М.—Л., 1933.

Эфир (Ether)

Напечатано: S. P., II, стр. 763—775.

Платон (427—347 гг. до н. э.) — древнегреческий философ-идеалист. Лит.: Платон. Сочинения, переведенные с греческого и объясненные Карновым, 2 изд., ч. 1—6. СПб., 1863—1879.— Полное собрание творений Платона в 15 т. (новый пер.). Пг., 1922—1929 (изд. не закончено).— Платон. Избранные диалоги. М., 1965.

Джон Стюарт Милль (1806—1873) — английский философ-позитивист, логик и экономист. Сын Джемса Милля — английского философа юмистского направления.

Христиан Гюйгенс (1629—1695) — нидерландский механик, физик и математик. Изобрел маятниковые часы, исследовал ряд проблем математики и физики, связанных с движением маятников. Установил таутохронность движения по циклоиде, разработал теорию эволют плоских кривых, доказал, что эволюта циклоиды есть также циклоида. Гюйгенс предложил использовать свойства циклоиды для создания маятника с периодом колебания, не зависящим от амплитуды. В сочинении «Трактат о свете» (1690) развивает волновую теорию света. Лит.: Ch. Huygens. Oeuvres complètes, t. 1—22, 28 (Supplement). 1905—1950...—Х. Гюйгенс. Три трактата о механике. М.—Л., 1951.—Трактат о свете. М.—Л., 1935.—О найденной величине круга. (В кн.: «О квадратуре круга. Архимед, Гюйгенс, Ламберт, Лежандр».) Изд. 3. М.—Л., 1936.—О нем см.: У. И. Франкфурт, А. М. Френк. Христиан Гюйгенс. М., Изд-во АН СССР, 1962.

Мари Альфред Корню (1841—1902) — английский физик. Многочисленные исследования по кристаллофизике, оптике и спектроскопии.

Мак-Келлог (Мак-Куллах) — английский физик. Выдвигал гипотезу несжимаемого эфира. Занимался теорией отражения от поглощающих тел.

Клод Пулье (1790—1868) — французский физик. Подтвердил при помощи устроенной им тангенс-буссоли закон Ома. Исследовал влияния магнитного поля на свет, атмосферное электричество.

Ипполит Физо (1819—1896) — французский физик. В 1849 г. осуществил первое измерение скорости света в земных условиях. В 1851 г. установил влияние движения среды на скорость распространения света в этой среде. В 1852 г. предложил интерференционный метод для измерения коэффициента расширения твердых тел. Наблюдал явления интерференции при разности хода двух лучей, достигавшей 50 тыс. волн. Предложил способ измерения вращения плоскости поляризации (совместно с Фуко).

Самуэль Тольвер Престон — английский ученый. Известен дискуссией о применимости второго начала к явлениям диффузии. («Nature», 1878, 17, стр. 202). Объяснял тяготение колебаниями частиц. («Physics of the Ether», L., 1875). Работы по распространению звука в газах.

Фарадей (Faraday)

Напечатано: S. P., II, стр. 786—793.

Гемфри Дэви (1778—1829) — английский химик и физик. В 1800 г. обнаружил, что вода, образующаяся при трении кусков льда друг о друга, имеет температуру выше, чем окружающий ее воздух. В 1812 г. высказал мысль о кинетической природе тепла. Многие исследования по физике и химии. Лит.: H. Davy. The collected works, v. 1—9. L., 1839—1840.—Г. Дэви. О некоторых химических действиях электричества. М.—Л., 1933.—О нем см.:

J. G. Crowther. British scientists of the nineteenth century. L., 1935.— J. Davу. Life of Sir H. Davу. L., 1896.— Б. Л. Могилевский. Гемфри Деви. М., 1937.

Вильям Хайд Волластон (1766—1828) — английский естествоиспытатель. Работы в области химии, физики, ботаники. О нем см.: Н. С. King. The life and potical work of W. H. Wollaston. «The British Journal of Physiological Optics», 1954. 11, N 1.— G. Friese-Greene. William Hyde Wollaston. «Engineering», 1953, 176, N 4581.

Дж. Кэрр (1824—1907) — английский ученый. В 1875 г. открыл двойное лучепреломление у изотропного вещества, помещенного в однородное электрическое поле (электрооптическое явление Кэрра). В 1876 г. открыл магнитооптическое явление Кэрра. «Весьма интересно написанная история исследований, относящихся к явлению Кэрра, находится в первой части замечательной работы Chaumont'a (убит в 1914 г. на войне), вышедшей в 1915 г.» (О. Д. Хвольсон. Курс физики, т. 4. М., 1923, стр. 263) (ст. Шамова см.: «Annal. de phys., 1915, 4, 61; 5, 1916). Лит.: J. Kerr. Electro-optic action of a charged Franklin's plate. «Phil. Mag.», 1855, 20.— Experiments on a fundamental question in electro-optics. «Proc. Roy. Soc.». L., 1894, 55.

О цветовом зрении (On Colour Vision)

Напечатано: S. P., II, стр. 267—279.

Указатель имен

- Аббот В. 207, 208
Абрагам М. 313
Авенариус М. П. 366
Авенариус Р. 353
Авогардо А. 370, 371, 379
Адамс Д. 348
Ампер А. 44, 56, 57, 67, 69, 209, 259, 352, 370, 379, 403 *
Анаксагор 72, 73, 121, 126, 406
Ангстрем А. 201
Араго Д. 201, 352, 379
Аристотель 122, 411
- Барбари С. 311, 317
Белопольский А. А. 348
Бенсон 221
Бентли Р. 54, 169, 410
Беркс 298
Бернал Д. 357
Бернулли Д. 75, 295, 348, 369, 370, 407
Бернулли И. 328, 329, 336
Берцеллус Я. 379
Био Ж. 273, 379
Бойль Р. 54, 76, 101—105, 130, 131, 138, 169, 369—371, 403
- Больцман Л. 76, 113, 115, 116, 133, 187—189, 203, 204, 233—237, 239, 241, 248, 292, 295, 346, 356, 357, 362, 365, 366, 368, 376, 396, 407
Бор Н. 248, 281—283, 367
Бошкович Р. 55, 124—126, 151, 152, 162, 369, 379, 404
Брадлей Д. 379
Бройль Л. де 250, 356
Бруш С. 288, 303
Брэгг Л. 361
Брэгг У. 351, 366
Брюстер Д. 390
Буль Д. 19, 400
- Ван-дер-Ваальс Я. Д. 107, 138, 410
Ватерстон 233, 370
Вебер В. 18, 24, 26, 69, 188, 254, 261, 266, 309, 352, 353, 406
Вебстер П. 313, 315, 317
Верде 212
Видеман Г. 11, 399
Вильсон Д. 390

* Полужирным шрифтом отмечены страницы, на которых даны комментарии.

- Вильямсон А. 64, 66
 Винер Н. 265, 267—269
 Волластон В. 208, 209, 379, 389, 415
 Вольта А. 351
 Вольтер Ф. 378

 Гаген Г. 374
 Галллей Г. 101, 347, 366, 409
 Гамильтон У. 9, 39, 45, 400
 Гарнак 385
 Гарнет В. 311, 316
 Гассенди П. 369, 379
 Гаусс К. 18, 24, 26, 99, 233, 238, 254, 383, 384, 400
 Гейзенберг В. 250, 280
 Гей-Люссак Ж. 76, 111, 118, 133, 371, 408
 Гельмгольц Г. 12, 36, 94, 128, 146, 147, 151, 152, 174—181, 226, 227, 239, 295, 303, 345, 350, 353, 354, 365, 366, 376, 390, 399
 Генри 227
 Геранат 75, 295, 299, 370
 Герц Г. 239—241, 245, 313, 317, 365—367, 380
 Гершель Д. 89, 164, 165, 227, 412
 Гиббс В. 107, 267, 363, 410
 Гирдельстон 301, 302, 304
 Глаголева-Аркадьева А. А. 366
 Грассман Г. 352, 390
 Грин Д. 34, 45, 47, 383, 384, 386, 401
 Гров В. 91, 93, 94, 409
 Грэхем (Грахам) Т. 11, 80, 81, 88, 116, 137, 208, 298, 303, 399
 Гук Р. 172, 330, 412
 Гумбольдт А. 24, 401
 Гуревич М. М. 389

 Гюйгенс Х. 194, 251, 356, 378, 379, 388, 414
 Гюйо 173, 413
 Гютгинс 61, 145, 200
 Гютри 50, 173

 Дальтон Д. 78, 115, 208
 Декарт Р. 21, 39, 53, 123, 124, 127, 128, 193, 257, 355, 369, 401
 Демокрит 72, 121, 363, 398
 Джиллиспай 306
 Джинс Д. 355, 368, 373
 Джоуль Д. 61, 75, 77, 131, 233, 295, 297, 348, 358, 370, 406
 Диксон 343
 Дирак П. 246, 250, 279
 Дирихле П. 383, 384, 386
 Дитшайнер 224
 Дондерс Ф. 178, 413
 Дэви Г. 207, 208, 352, 370, 414
 Дюлонг П. 113, 120, 134, 135, 375, 411
 Дюма Ж. 66, 406

 Заремба С. 386
 Зеeman П. 249
 Зенон Элейский 122, 411

 Инфельд Л. 356, 360

 Кавендиш Г. 55, 61, 67, 211, 322, 351, 358, 363, 364, 404
 Казин А. 302, 304
 Каница П. Л. 368
 Кельвин *см.* Томсон В.
 Кемпбелл Л. 305, 311, 316, 340, 342, 351, 396
 Кемпбелл Н. 314—316
 Кеплер И. 316, 356
 Килф 348
 Кирхгоф Г. 159, 412
 Клаузиус Р. 16, 75, 80, 82, 101, 102, 108, 109, 112, 128,

- 129, 132, 134, 137, 233, 292,
295, 297, 300—302, 348, 370,
371, 399
- Коген М. 267, 268
- Кольрауш Ф. 188, 261, 358, 410
- Ков Э. 365
- Конт О. 9, 398
- Корню М. 196, 414
- Котс Р. 54, 55, 403
- Коулинг 295, 303
- Коши О. 373, 381
- Кравец Т. П. 353
- Крениг А. 75, 233, 295, 297,
348, 370, 371, 407
- Кроль 300, 304
- Кулон Ш. 55, 61, 67, 273, 351,
363, 373, 374, 383, 404
- Кэпп Д. 212, 415
- Кэрролл Б. 322
- Лагранж Ж. 101, 145, 181, 257—
259, 382, 409
- Ламе Г. 46, 402
- Ландау Л. Д. 281
- Ланжевен П. 249, 377
- Лашлас П. 45, 101, 347, 381, 409
- Лармор Д. 248, 249, 266, 317,
365
- Лауэ М. 367
- Лебедев П. Н. 356, 365, 366
- Лейбниц В. Г. 95, 124
- Леконт 299, 300, 304
- Ленц Э. 352
- Лесаж Г. 75, 153, 155, 172, 369,
407
- Линдсей Р. 268
- Листинг И. 178, 413
- Локьер Д. 145
- Ломоносов М. В. 356, 369, 389, 390
- Лоренц Г. А. 246, 249, 287,
367, 381, 396
- Лоренц Л. 18, 309, 313, 400
- Лоттер 299, 300, 304
- Лошмидт И. 78, 80, 81, 84,
85, 137—139, 208, 302, 408
- Лукреций 72, 74, 85, 121, 151—
153, 363, 398
- Ляпунов А. М. 383, 386
- Майер Ю. 94, 409
- Мак-Келлог 197, 198, 328, 329,
336, 381, 414
- Маклорен К. 54, 169, 410
- Малюс Э. 379
- Маргенау 268
- Мариотт Э. 370, 371, 389
- Мах Э. 302, 353
- Мейер Л. 84, 138
- Мейер О. 80, 81, 137, 188, 294,
301, 374, 390, 391, 412
- Менделеев Д. И. 362
- Милликэн Р. 353
- Милль Д. 194, 413
- Миткевич В. Ф. 366
- Мозли Г. 343
- Моссоти О. 38, 351, 402
- Муаньо 343
- Мюллер И. 178, 413
- Науман К. 301, 304
- Нейман К. 18, 69, 197, 352, 383,
384, 386, 400
- Николь У. 342, 343
- Ноберт 139
- Нортоп У. 300, 302, 304
- Ньюком С. 299, 303
- Ньютоп И. 21, 51, 53—56, 67,
94, 99, 101, 103, 130, 151,
153, 169, 170, 193, 217, 218,
223, 243, 244, 246, 250, 251,
257, 264, 311, 344, 357, 358,
366, 368, 369, 387—390, 401
- Ольденбург 388
- Ом Г. 350, 364
- Оствальд В. 302
- Оуэн Р. 352

- Паули В. 280
 Пелль 302, 304
 Петцваль 327
 Пирогов Н. Н. 348
 Планк М. 231, 248, 249, 279,
 280, 356, 363, 368, 378, 381
 Платон 193, 413
 Пойнтинг Д. 313, 365
 Поль 227, 228, 350, 390
 Попов А. С. 366
 Прево П. 153
 Престон С. 205
 Пристли Д. 78, 408
 Пти А. 113, 120, 134, 135, 375,
 411
 Пуазель Л. 374
 Пуанкаре А. 265, 268, 269, 355,
 380—386, 396
 Пулье К. 198, 414

 Ранкин В. 40, 295, 303, 370
 Рансом А. 301, 302, 304
 Редгенбахер Я. 297, 303
 Резерфорд Э. 249, 361, 368
 Реньо А. 104, 114, 131
 Риман Б. 18, 309, 383, 400
 Риттер 379
 Робэн 383, 384, 386
 Рождественский Д. С. 366
 Роде Э. 230
 Розенблют А. 265, 268, 269
 Розенфельд Л. 281—283
 Рубенс Г. 241
 Румфорд Б. 318, 350, 370
 Рэлей Д. 117, 361, 370

 Сабин Е. 373, 374
 Савар Ф. 273
 Сандеман Р. 215
 Саттон 320—327
 Сильвестр 3, 4, 397
 Сократ 72, 407
 Sommerвиль 55, 92, 93
 Спенсер Д. 322

 Спиноза Б. 124, 411
 Слоттисвуд 3
 Стеклов В. А. 383, 386
 Стефан Й. 80, 81, 137, 241, 299,
 303, 408
 Стокс Д. 34, 126, 200, 203, 229,
 311, 316, 358, 402
 Столетов А. Г. 346, 348, 358—
 360, 366
 Стоней 11, 302, 304
 Стони Д. 85, 138
 Стюарт Б. 301, 304

 Тимирязев К. А. 366
 Тиндаль Д. 4, 10, 63, 85, 297,
 300, 303, 397
 Тодгёнтер 361
 Томсон В. (лорд Кельвин) 11,
 12, 16, 35, 38, 43, 44, 50, 60,
 85, 128, 132, 138, 151—153,
 157, 170—173, 188, 198, 205,
 257, 258, 295, 296, 302, 303,
 310, 311, 328, 330, 349, 354,
 357, 358, 366, 376, 381, 383,
 399
 Томсон Д. 249, 266, 269, 276,
 313, 352, 361, 365
 Торричелли Э. 260
 Тур К. де ля 183, 413
 Турнер Д. 269, 270
 Тэйлор 176
 Тэт П. 18, 44, 45, 47, 257, 258,
 311, 316, 342, 344, 400

 Уиллис 343
 Уиттекер Е. 306, 308, 328, 329,
 336
 Умов Н. А. 366, 396
 Уотсон 311, 317

 Фарадей М. 10, 28, 38, 43, 48,
 54, 56—60, 63—70, 170, 171,
 202, 205, 207—215, 238, 239,
 243, 245, 251, 259, 268, 270,

- 273, 300, 306, 312, 314, 336,
344, 345, 347, 349, 352—355,
357, 363, 367, 368, 397
- Фехнер Г. 300, 304
- Физо И. 201, 261, 414
- Фикк 81
- Филлис Р. 209, 210
- Фицджеральд Д. 313, 315, 317,
328, 330
- Фойт 81, 82
- Форбе 342, 343, 357
- Френель О. 61, 197, 198, 365,
379, 406
- Фуко Ж. 60, 405
- Фурье Ж. 16, 38, 399
- Хаген Э. 241
- Хаксли 225
- Хевисайд О. 311—315, 317, 365
- Цейнер Г. 297, 303
- Цермело Э. 302
- Чаллис 300, 304
- Чальмерс 90
- Чепмен С. 295, 303
- Чэллис Д. 173, 413
- Шарль Ж. 76, 131, 407
- Шварц Л. 384
- Шельбах 173, 413
- Шиллер Н. Н. 366
- Шлик М. 268, 269
- Шредингер Э. 250
- Шустер А. 344, 361, 365
- Эванс Р. 318
- Эвклид 70
- Эйлер Л. 356
- Эйнштейн А. 243, 249, 277, 353,
355, 357, 365, 367, 368, 370
- Эйхенвальд А. А. 366
- Экспер М. 226, 227
- Энгельс Ф. 341, 355
- Эндрюс Т. 106, 183, 413
- Эпикур 54, 72, 363, 397
- Эри Д. 347
- Эрстед Х. 67, 208, 209, 351,
404
- Юнг Т. 61, 95, 216, 222, 223,
226, 319, 343, 345, 365, 379,
389—391, 405

Содержание

I

Доклад математической и физической секции Британской ассоциации (О соотношении между физикой и математикой). <i>Перевод Глазенапа и Н. А. Арнольд</i>	3
Вводная лекция по экспериментальной физике (Значение эксперимента в теоретическом познании). <i>Перевод Н. А. Арнольд</i>	20
О математической классификации физических величин. <i>Перевод Н. А. Арнольд</i>	37
О действиях на расстоянии. <i>Перевод Н. Н. Маракуева</i>	48
Фарадей. <i>Перевод Н. А. Арнольд и Кольченко</i>	63
Молекулы. <i>Перевод Н. Н. Маракуева и А. Г. Баранова</i>	71
О «Соотношении физических сил» Грова. <i>Перевод Глазенапа</i>	91
О динамическом доказательстве молекулярного строения тел. <i>Перевод Н. А. Арнольд</i>	98
Атом. <i>Перевод Н. Н. Маракуева и А. Г. Баранова</i>	121
Притяжение. <i>Перевод Н. Н. Маракуева</i>	166
Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц. <i>Перевод Н. А. Арнольд</i>	174
Строение тел. <i>Перевод Н. А. Арнольд</i>	182
Эфир. <i>Перевод Н. Н. Маракуева</i>	193
Фарадей. <i>Перевод Н. А. Арнольд</i>	207
О цветовом зрении. <i>Перевод Е. И. Погребысской</i>	216

II

М. Планк. Джемс Клерк Максвелл и его значение для теоретической физики в Германии. <i>Перевод И. Б. Погребысского</i>	231
А. Эйнштейн. Влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности. <i>Перевод А. М. Френка</i>	243
Н. Бор. Максвелл и современная теоретическая физика. <i>Перевод С. А. Каменецкого</i>	248

Д. Турнер. Максвелл о логике динамического объяснения. <i>Перевод С. А. Каменецкого</i>	252
Р. Э. Пайерлс. Теория поля со времени Максвелла. <i>Перевод С. А. Каменецкого</i>	270
С. Дж. Бруш. Развитие кинетической теории газов (Максвелл). <i>Перевод С. А. Каменецкого</i>	288
А. М. Борк. Максвелл, ток смещения и симметрия. <i>Перевод С. А. Каменецкого</i>	305
Р. М. Эванс. Цветная фотография Максвелла. <i>Перевод Е. И. Погребысской</i>	318
Э. Келли. Уравнения Максвелла как свойство вихревой губки. <i>Перевод С. А. Каменецкого</i>	328

Приложения

Е. М. Кляус. Джемс Клерк Максвелл	339
У. И. Франкфурт. Роль Максвелла в развитии кинетической теории газов	369
У. И. Франкфурт, М. Г. Шраер. Некоторые замечания к электродинамике Максвелла	378
Е. И. Погребысская. Теория цветов в исследованиях Максвелла	387
Библиография	392
Комментарии (<i>составил У. И. Франкфурт</i>)	397
Указатель имен	416

Джеймс Клерк Максвелл

Статьи и речи

*Утверждено к печати
редколлекцией научно-популярной литературы
Академии наук СССР*

Редактор *В. А. Никифоровский*

Художник *Л. М. Шаров*

Технические редакторы

Л. И. Матюхина, В. В. Тарасова

Сдано в набор 19/X 1967 г.

Подписано к печати 28/II 1968 г.

Формат 84×108¹/₃₂. Усл. печ. л. 22,26.

Уч.-изд. л. 23,9

Тираж 15 000 экз. Бумага № 1

Тип. зак. 3638.

Цена 1 р. 50 к.

Издательство «Наука».

Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука».

Москва, Г-99, Шубинский пер., 10