

315

А.Г.СТОЛЕТОВ
СОБРАНИЕ СОЧИНЕНИЙ

том
II

Г. Р. КИРХГОФ *

Vollständig erreicht wird dieses Ziel der Naturwissenschaften (Zurückführung aller Naturscheinungen auf die Mechanik) niemals werden; aber schon die Thatsache, dass es als solches erkannt ist, bietet eine gewisse Befriedigung, und in der Annäherung an dasselbe liegt der höchste Genuss, den die Beschäftigung mit den Erscheinungen der Natur zu gewähren vermag.

Kirchhoff. Ueber das Ziel der Naturwissenschaften, akademischer Vortrag, 1865.

I

Сороковые годы начинают собой блестящую эпоху в истории германского естествознания. Эта эпоха — прямое продолжение того энергического подъема точных наук, которым в конце прошедшего и в начале текущего столетия ознаменовала себя Франция. Было время, когда страна Коперника и Кеплера далеко уклонилась от пути, указанного великим учителем — Ньютона. В то время как Франция, ранее утвердившаяся на этом пути, имела Лапласа, Лавуазье, Френеля, Ампера, немецкая наука еще сводила счеты с ложными притязаниями всем завладевшей философии, которой именно здесь, в сфере естествоведения, пришлось обнаружить свою слабую сторону. Но всякое увлечение, развиваясь до крайних пределов, вызывает реакцию. Начатый еще в двадцатых годах отпор против натурфилософии созрел, наконец, и принес плоды. Беспристрастное и терпеливое изучение природы, на время оттесненное задачами другого порядка, вступило вновь во все свои права. Много труда положили люди точного знания в этой своего рода „борьбе за независимость“. Гаусс, Бессель, Мюллер,

* Статья в журнале *Природа*, 1873.

Гумбольдт, Либих — вот ряд великих натуралистов, еще причастных борьбе и упрочивших победу.

В области физики, в тесном смысле слова, борьба находила себе всего больше пищи. Менее обработанная, чем астрономия, более разносторонняя, чем химия, физика особенно соблазняла натурфилософов. Какой благодарной темой для самых необузданных фантазий были явления электрические, с их полярной „любовью и ненавистью“, с их таинственным отношением к процессам животного организма! Красивые и туманные дедукции стояли на первом плане; кропотливый труд экспериментатора, точный анализ математика были не в чести: они казались лишними и вредными при изучении природы. Поэт-биолог Гете провозглашал, что математику „следует изгнать из многих отделов физики“ и что „природа не имеет на пытке“. Его „учение о цветах“ характеризует эпоху. Нужна была особенная трезвость и ясность ума, чтобы устоять против общего течения. Два человека своей энергической пропагандой окончательно водворяют среди немцев методы точной физики. Это — покойный Гейнрих Густав Магнус (1802—1870) в Берлине и семидесятипятилетний старец Франц Эрнст Нейман (род. 1798 г.) в Кенигсберге.

Тот и другой становятся центром целой школы, и оба важны в истории науки не только по своим личным работам, но гораздо более по силе пропаганды, по количеству учеников. Отчасти различные по направлению, школа Магнуса и школа Неймана взаимно дополняют одна другую. Магнус — поборник более непосредственного эмпиризма. С недоверием, нередко преувеличенным, избегает он всякого „теоретирования“ и неохотно терпит математические подмостки даже там, где они вполне уместны. Как можно скорее стать на почву опыта, как можно ближе ее держаться — вот его девиз. В глазах Неймана математика — мощное орудие изучения природы, необходимое звено между простым „элементарным законом“ и сложным явлением действительности; она проникает туда, где бессилен опыт, дает суждению отчетливость и общность. Своих учеников Нейман проводит прежде всего через длинную и строгую школу механики и математической физики и не спешит знакомить их с практикой лаборатории.

Совместная деятельность Магнуса и Неймана дала Германии целый ряд физиков. Знаменитости нашего времени:

Гельмгольц, Кирхгоф, Клаузиус — воспитались более или менее под их влиянием. Математико-физический семинарий Неймана приучает пользоваться анализом в вопросах физики, переносить в эту науку тот идеал точного измерения, какого достигла астрономия. Магнус — одновременно физик, химик и технолог — учит искусству экспериментировать, той практической сноровке, которая ускользает от вычислений; он вводит учеников в тот круг вопросов, где опыт — единственный руководитель. Домашняя лаборатория Магнуса — первый пример *физической лаборатории* — становится рассадником физиков-экспериментаторов *. Кроме того, Магнус (с 1843 г.) еженедельно собирает у себя молодых людей для беседы о важнейших новостях физической литературы. Так возникли известные *коллоквии* Магнуса, которые вскоре (1845 г.) вызвали основание Берлинского физического общества **. Влияние Неймана ограничено более тесным кругом, за то оно еще глубже и прочнее.

Одним из самых замечательных талантов, прошедших школу Неймана и (отчасти) Магнуса, — гейдельбергский профессор Густав Роберт Кирхгоф. В открытии, обессмертившем его имя, мы видим, говоря словами Гельмгольца, „один из самых блестящих примеров слияния теоретической проницательности с искусством экспериментатора“. Такое слияние составляет идеал современной физики.

II

Биографические сведения о знаменитостях, еще живущих, почти всегда скучны. Нашей темой будет не столько внешняя жизнь ученого, сколько характеристика его работ и значение их в науке.

Кирхгоф родился в Кенигсберге 12 марта (н. ст.) 1824 года. Блестящее обставленный университет родного города дал ему глубокое математическое образование. Бессель, Якоби, Нейман были его учителями, и под руководством последнего он стал специализироваться как физик. С 1847 г. доктор

* Только в 1853 г. она получает субсидию от правительства и обращается в публичную лабораторию. По смерти Магнуса, его преемник Гельмгольц перенес ее в здание университета. В апреле 1873 г. начата постройка нового обширного здания для физической лаборатории.

** Теперь оно насчитывает до ста членов, живущих в Берлине (не считая иногородних и иностранцев).

Кенигсбергского университета, Кирхгоф зачисляется в 1849 г. приват-доцентом в Берлине и здесь вступает как деятельный член в юное Физическое общество. Уже в следующем году он получает место экстраординарного профессора в Бреслау. Здесь сближается с ним его будущий друг и сотрудник по спектральному анализу, химик Роберт Вильгельм Бунзен (род. в 1811 г. в Геттингене). В 1852 г. Бунзен переходит в Гейдельберг; через два года приглашен туда и Кирхгоф в качестве ординарного профессора. Здесь он и остается, отказываясь от приглашений в Бонн (на место Плюккера) и в Берлин (на место Магнуса). С 1863 г. учебная обстановка Кирхгофа значительно улучшается. В новом здании университета (*Naturwissenschaftliches Institut*) ему отведена обширная лаборатория; тут же рядом помещается и его квартира: комфорт, существенно необходимый для того, чтобы без огромной траты времени руководить постоянными занятиями учащихся. Последнее время было несчастливо для Кирхгофа. В 1866 г. он сильно повредил себе ногу; хромота (теперь уже едва заметная) долго удерживала его от экспериментальных работ, требующих постоянного передвижения. В 1869 г. скончалась жена Кирхгофа (дочь одного из его кенигсбергских учителей, профессора Ришело). Между тем известность Кирхгофа, как ученого и как образцового преподавателя, росла более и более. С 1859 г. (время открытия спектрального анализа) имя его получило всемирную известность; в 1861 г. Кирхгоф сделан корреспондентом Берлинской академии, в 1870 г.—корреспондентом Парижской и действительным членом Берлинской. Его лекции и особенно практический семинарий привлекали и продолжают отовсюду привлекать в Гейдельберг молодых физиков.

Автор этих строк имел счастье несколько лет пользоваться и лекциями и частными беседами Кирхгофа, и мог пристально всмотреться в личность знаменитого учителя. Простота обращения и неутомимая внимательность в отношении к учащимся, постоянная деятельность и самообладание мысли, дар сжатой, но отчетливой речи—вот что поражало нас в Кирхгофе. Во всем сказывается сильная воля, чувство долга, высокое—и чуждое высокомерия—самолюбие. Мы мало привыкли соединять в уме понятия о гении и о любви к порядку; фраза, что „гений есть высшее терпенье“, также находит мало веры. Поучительно видеть ту аккуратность, с какой Кирхгоф ведет свои бумаги, красивым и неспешным

почерком записывает *in extenso* все продуманное и сделанное. Видишь, что эта глубина и точность мысли далаась не вдруг и не даром: она — плод упорной работы над собой.

Главную особенность Кирхгофа, как преподавателя, составляет его практический семинарий. Цель его — служить переходом от прослушанных и прочитанных курсов к самостоятельной работе, знакомя учащихся с классическими методами физических измерений. Объясняется идея метода, устройство снарядов, ведущих к цели, их особенности и ошибки, способ наблюдений и их вычисления; затем снаряды (возможно просто и наглядно устроенные) передаются в руки учащегося, который и выполняет задачу. Результаты всех работавших сравниваются между собой и с цифрами, принятыми в науке. Темами для таких измерений служат, например: сила тяжести в месте наблюдения, сила земного магнетизма, число качаний данного камертона, показатели преломления данной призмы, длина волны светового луча, емкость лейденской банки, электрическое сопротивление проволоки, тепло, отделяемое при растворении соли, и т. п. Испытав свои силы над подобными классическими задачами, где методы выработаны и результаты часто заранее известны, начинающий физик уже с большой уверенностью может взяться за более оригинальные исследования.

Мы переходим к обзору ученых работ Кирхгофа. В краткой и возможно общедоступной статье весьма трудно вести речь об этих работах, касающихся самых глубоких вопросов науки. Попытаемся быть насколько можно ясными.

Стремление свести все физические явления к основным принципам механики — вот девиз современной физики, мало того — всего естествоведения. „Эта цель естественных наук“ (говорим словами Кирхгофа) „никогда не будет достигнута вполне, но уже самый факт, что она признана, дает известное удовлетворение, и, приближаясь к ней, мы испытываем самое высокое наслаждение, какое могут доставить нам занятия наукой о природе“.

III

Первые исследования Кирхгофа относятся к области электричества. С небольшим двадцати лет от роду, еще на студенческой скамье, он делает работу „о распределении гальванического тока в пластинке“. Уже здесь сказывается

будущий мастер. Выбор задачи, изящество математической и экспериментальной обработки, убедительное сопоставление теории с опытом — замечательны в равной степени.

Теория гальванической цепи, предложенная Омом (1827 г.), занималась главным образом *линейными* составными частями цепи (проводки, тонкие столбики жидкости), где ток имеет одно данное направление. Более сложный случай представит пластиинка, введенная в цепь; ток, входящий в нее через одну проволоку, разветвляется, так сказать, на струйки, которые, снова собираясь в один пучок, выходят в другую проволоку. Проследить это разветвление путем теории и опыта — в этом состояла задача.

В ближайшей затем работе (1849 г.) Кирхгоф касается самых основ теории тока. Омова теория этого процесса опиралась на аналогию с током теплоты в теле, неравномерно нагретом. В проволоке, постоянно нагреваемой с одного конца, происходит ток теплоты от частицы к частице, в силу которого температура на протяжении проволоки распределяется по определенному закону: она равномерно (поровну на каждый вершок) понижается от нагреваемого конца к холодному. То же самое происходит, по Ому, в проволоке, замыкающей гальваническую цепь: там в основе явлений лежит *обмен теплоты* между неодинаково нагретыми частицами, здесь — *обмен электричества*. С этой точки зрения Ому удалось вывести любопытные законы, подтвержденные опытом. Но исходный принцип теории стоит в стороне от другой, смежной области явлений, и в некоторой мере ей противоречит. Гальванический ток есть, несомненно, явление электрическое. Концы незамкнутой цепи всегда наэлектризованы: процесс, происходящий в цепи, когда она замкнута, во всем подобен разряду наэлектризованного тела (при соединении его с землей), только разряду не мгновенному, а как бы постоянно возобновляемому и неиссякающему. Явления, зависящие от наэлектризованных проводников, объясняются из весьма простого начала: надо принять, что различные точки таких тел становятся центрами сил притягательных и отталкивательных, действующих по известному закону квадратов расстояний. Это начало, как показывает вычисление, неразрывно связано с другим, еще более простым и вполне его заменяющим: некоторая величина, которую называют *электрическим напряжением* или *электрическим потенциалом* проводника, непременно

одинакова во всех точках этого последнего. Есть снаряд, который прямо дает нам меру этого напряжения, подобно тому, как термометр дает меру температуры тела: этот снаряд — *электроскоп*. Какую бы точку проводника мы ни испытывали электроскопом, всегда получим одинаковое действие.

Если процесс, происходящий в гальванической цепи, есть постоянный разряд, постоянное *перемещение* электричества, то объяснение этого процесса должно опираться на тот же принцип, к которому привело изучение тел в состоянии электрического *равновесия*. Только в том случае, если этот принцип окажется недостаточным, он должен быть обобщен, дополнен возможно отчетливо и ясно.

Теория Кирхгофа есть попытка вывести законы Ома, не вступая в разлад с электростатикой (учением об электрическом равновесии). Понятие о напряжении или потенциале электричества играет здесь главную роль. Сблизим до прикосновения два проводника электричества. Пусть эти проводники (назовем их *A* и *B*) суть два куска одного и того же металла. Соприкасаясь, они составят как бы один проводник, и во всех его точках установится одинаковое электрическое напряжение. То же ли будет, если проводники состоят из *разных* веществ, если, например, это — кусок цинка и кусок меди? Вообще говоря, будет не то же, что прежде; иначе, слагая несколько проводников в цепь, мы всегда получали бы электрическое равновесие, т. е. отсутствие тока. Допустим же, что, на переходе из одного вещества в другое, электрическое напряжение внезапно, скачком, изменяется: во всех точках тела *A* оно одинаково — назовем его *a*; во всех точках *B* оно опять одинаково, но уже равно *b*. Допустим, что разница напряжения (т. е. *a* — *b*) зависит только от вещества двух соприкасающихся тел, и назовем ее *a|b*.

В рассмотренном случае, когда мы имели только два проводника, равновесие электричества всегда возможно. Но пойдем далее. Возьмем *три* проводника из трех разных веществ и сложим их попарно в виде *цепи* (рис. 1); пусть это будет цинк, медь и железо. В такой системе электрическое равновесие возможно только при известном выборе веществ: необходимо, чтобы по свойству трех веществ сумма *a|b + b|c + c|a* составляла нуль. Только под этим условием, напряжение, оставаясь одинаковым в каж-

дом проводнике порознь (что, как мы уже знаем, необходимо), может представлять на местах соприкосновения ту градацию, какой требуют три вещества нашей цепи. Такому условию равновесия действительно удовлетворяют многие тела, именно все металлы, уголь и др. Но заменим один из металлов (например железо) жидкостью (например серной кислотой) — и мы введем в цепь такое вещество, которое не выполняет сказанного условия. Электрическое равновесие станет невозможным, и электричество цепи будет в непрерывном движении. Мы получим простейший вид гальванической пары.

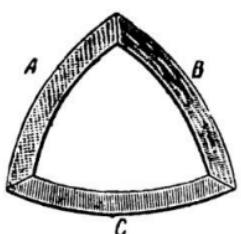


Рис. 1.

Такая точка зрения примиряет факт электризования через прикосновение, найденный Вольтою, с мнением тех, кто спрашивает указывал на химическое действие как на необходимое условие тока в цепи. Всякие два проводника могут электризовать друг друга прикосновением; но мы имеем здесь лишь замену одного электрического равновесия другим. Непрерывный ток получим лишь тогда, когда в цепи есть хоть один проводник жидкий. Такой жидкий проводник разлагается от действия вызванного тока. Всеобщее начало современной физики — начало сохранения энергии — остается и здесь ненарушимым. Цепь, составленная из одних металлов — тел, не изменяющих друг друга своим прикосновением, никогда не даст тока*: это значило бы из ничего созидать теплоту (всякий ток сопровождается нагреванием цепи). Во всякой цепи рядом с нагреванием идет химическое разложение: химическая энергия веществ переходит в форму энергии тепловой, и чтобы возвратить продукты разложения в их первоначальное состояние, пришлось бы истратить ровно столько теплоты, сколько получено в процессе тока.

Развивая эти соображения (о которых мы могли дать только неточное понятие), дополняя их, где нужно, простыми и позволительными гипотезами, Кирхгоф впервые выражает точным математическим языком явление постоянного (стационарного) тока. Его теория еще примыкает к гипотезе о двух электрических жидкостях, но результаты ее подтверждаются всеми опытами, и кирхгофовы уравнения тока, как

* Мы говорим здесь все время о цепях, имеющих на всем протяжении одинаковую температуру.

общее выражение фактов, целиком перейдут во всякую новую теорию электрических явлений, основанную на иных началах.

В то же время (1849 г.) Кирхгоф предпринимает важную измерительную работу из области электричества. В выражении общего закона *наведения токов*, незадолго перед тем открытого Нейманом, входит некоторый постоянный фактор, имеющий важное значение. Кирхгоф определяет этот фактор. В его остроумно расположенной работе заключаются все элементы для так называемой „абсолютной меры“ гальванических сопротивлений, вслед затем предложенной В. Вебером (1850 г.) и окончательно утвержденной в науке особым комитетом Британской ассоциации (comittee on electrical standards) в 1863—1864 гг.

Мы говорили о примирении между электростатикой и теорией постоянного тока. Но не призрачна ли, не одностороння ли такая попытка? Есть обширный круг явлений, тоже электрических, необъяснимых из основных начал электростатики. Это — взаимодействия между проводниками токов, в том числе и тех микроскопических токов электричества, которые, по всему вероятию, составляют причину магнитных явлений. Чтобы понять эти явления, необходимо пополнить, обобщить тот простой закон, который лежит в основе электростатики. В 1846 г. Вебер дал свой знаменитый „общий электрический закон“, подводящий под одно начало как электростатику, так и теорию взаимодействия токов и магнитов. Пришлось допустить, что притяжения и отталкивания двух наэлектризованных частичек только тогда совершаются по простому закону квадратов расстояний, когда эти частички в *покое*; если они движутся, этот закон усложняется в зависимости от относительной скорости движения. Рассматривая всякую часть цепи как канал, в котором движется электричество, и принимая в расчет это движение при оценке электрических сил, Вебер выводит законы Ампера и Неймана о взаимодействии гальванических токов и магнитов.

Но теория Вебера касается лишь *дальнодействий* тока — действий его на удаленные тела. Самый процесс, происходящий внутри цепи, принимается как факт, как нечто данное. Но понятен ли, возможен ли этот процесс с усвоенной нами точки зрения? Возникновение его согласно ли с основным законом о взаимных силах движущихся электричеств? Электрическое состояние каждой точки цепи должно обусловли-

ваться теми же силами. Отказавшись от прежнего простого закона об этих силах, мы должны посмотреть, согласен ли новый закон с явлениями внутри цепи и нет ли тут внутреннего противоречия. Вебер только слегка и намеками касается этой стороны вопроса. Кирхгоф идет глубже и осиливает задачу во всей ее сложности (1857 г.). Оказывается, что разница нового закона с прежним влияет при вычислении только на первые моменты тока: тот *постоянный ток*, который водворится потом, не зависит от введенной нами перемены, и для него прежние уравнения сохранят свою силу. Новость заключается в исследовании *переходного состояния*. Это переходное состояние, когда ток еще не *установился* (не сделался постоянным), при известных условиях, имеет характер постепенно замирающих *волн*. В проволоке весьма длинной (например в телеграфной линии) движение электричества в переходную эпоху подобно движению тепла, какое произошло бы при нагревании одного конца проволоки. В проволоке менее длинной электричество образует волны, движение передается, как звук в упругом, как свет в прозрачном теле. Опыты (Вебера и Кольрауша) позволяют вычислить, какова должна быть *скорость* этой *электрической волны*. Эта скорость всегда одинакова; она *веселья близка к скорости света* (около 300 тысяч километров в секунду). Так обнаружена любопытная точка соприкосновения между областью света и тепла и областью электрических явлений. Опираясь на это, английский физик Максвелл (1865 г.) дал эскиз *общей теории* тех и других явлений как динамических процессов одной и той же все-проникающей среды (эфира).

Мы остановились с некоторой подробностью на работах Кирхгофа по теории электричества. Они всего труднее для изучения; местами, по самому свойству предмета, они имеют характер незаконченный, условный, и ждут дальнейшей разработки: это — первая попытка внести строгий метод в наименее понятную область физики. Перейдем к другим работам Кирхгофа.

IV

Теория упругости твердых тел есть один из основных отделов физики. Сопротивление, оказываемое такими телами, когда мы изменяем их форму: тянем, крутим, сгибаем их, — звучание и передача звука — все это результаты

особых сил, действующих между частицами тел, все это входит в названную теорию, имеющую обширное приложение в практической механике и акустике. В этой области Кирхгоф делает две классические работы. В одной (1850 г.) дается общая теория равновесия и колебаний тонкого упругого *кружка*, — до сих пор единственный вполне и строго решенный вопрос из теории упругой пластиинки. Как и везде, Кирхгоф умеет выбрать задачу, доступную контролю опыта. Пластиинка, приведенная в дрожание, движется различно в разных своих точках, что ясно видно из так называемых *хладниевых фигур*: мелкий порошок, набросанный на пластиинку, располагается правильными полосками, слетая с мест наименьшего дрожания и накапливаясь в местах покоя. Вид и размеры фигур стоят в связи с теми тонами, какие издает пластиинка, и могут быть вычислены для данного тона. Такое вычисление для пластиинки круглой делает Кирхгоф. С другой стороны, есть точные прямые измерения таких фигур (Штрельке): согласие теории с опытом поразительно.

Другая работа из области упругости (1859 г.) есть теория равновесия и движения тонкого призматического стержня или проволоки. Удачным применением так называемой „проблемы Сен-Венана“ Кирхгоф дает этой теории полную общность. И здесь теоретические выводы приложены к решению весьма важного практического вопроса. Когда металлическая проволока, укрепленная вверху, вытягивается от действия груза, привешенного к нижнему концу, то она сжимается в *поперечных* размерах. Прежде думали, что это сжатие, для проволок одинакового диаметра и при одинаковом грузе, не зависит от материала проволоки. Кирхгоф точными и остроумно расположенными измерениями доказал противное. Результат этот имеет важное значение для самых основ теории упругости, для понимания внутреннего строения тел. С тех пор он подтвержден разнообразными путями.

Третью категорию работ Кирхгофа составляют исследования, относящиеся к механической теории теплоты; сюда же можно причислить и тот закон, который составляет основу спектрального анализа, так как он непосредственно опирается на принципы названной теории.

Напомним два основных закона этой теории: они нам понадобятся. *Теплота эквивалентна механической работе*,

говорит *первый закон* (Майера и Джаула): всякая трата теплоты в природе сопровождается выигрышем работы, и обратно, по расчету 425 килограммов работы за единицу тепла (калорию). *Невозможно, не потратив работы, перевести теплоту из тела более холодного в тело более теплое*, — такова основная идея *второго закона* (Карно и Клаузиуса). Отрицая ее, мы пришли бы к тому парадоксальному следствию, будто есть возможность прямо и безвозмездно нагревать паровики наших машин за счет того обширного запаса теплоты, какой заключен в окружающей атмосфере, воде или почве, и таким путем получать ничего нестоящий механический двигатель. Невозможность этого мы вправе считать за физическую аксиому.

Из двух указанных принципов развивается обилие самых разнообразных следствий. С помощью их, как показал впервые В. Томсон, можно вычислять так называемую энергию тел. Всякая данная масса вещества обладает определенным запасом *энергии*. Так называют полное количество работы, которое можно извлечь из этой массы, обращая в дело, с одной стороны, все присущие ей силы (силы упругости, сродства, электрические и магнитные), с другой — всю заключенную в массе теплоту (теплота тоже может дать работу и представляет часть энергии тела). Вообразим себе, что мы какими-либо путями привели сказанную массу в такое состояние, что все ее частицы пришли в совершенный покой и все междучастичные силы, так сказать, совершенно удовлетворены и не стремятся произвести никаких новых изменений. Тело в таком состоянии будет вполне *лишено энергии*; а вся та механическая работа, какую оно, в течение перехода в это недеятельное состояние, вызовет в телах окружающих (предполагаем, что и вся отданная им теплота обращена на работу), представляет полную энергию тела в его первоначальном состоянии.

Вычисление энергии вещества (воды) в его различных состояниях (лед, вода, пар насыщенный и перегретый) составляет начало небольшого мемуара Кирхгофа (1858 г.), где весьма изящно обобщен прием В. Томсона. Затем здесь рассматриваются изменения энергии тел, происходящих в процессах *растворения* (соли в воде) и *поглощения* (газа водой). Результаты исследования частично уже подтверждены опытом, частично еще ожидают экспериментальной разработки.

Основные принципы механического учения о теплоте помогут нам ориентироваться и в другом труде Кирхгофа — в самом важном из его исследований, сущность которого сообщена им впервые в заседании Берлинской академии 27 октября (н. ст.) 1859 г. Мы говорим о „законе взаимности лучепускания и лучепоглощения“ с его следствиями — теорией спектров и спектральным анализом.

V

Dieser Satz war wohl von Vielen schon geahnt; besonders nahe waren ihm Ångström und Balfour Stewart gekommen; aber er war nicht mit Schärfe ausgesprochen, noch weniger mit Strenge bewiesen. Kirchhoff. Untersuchungen über das Sonnenspectrum und die Spectren der chemischen Elemente.

Этот закон, открывший физикам и астрономам новый мир явлений, имеет, как и всякая великая идея, свою длинную историю. Как скоро идея выражена с полной ясностью, и во всем ее объеме, когда она приковала к себе внимание, то, оглядываясь назад, легко находим ее зачатки в истории науки. Прекрасным примером этого служит развитие механического учения о теплоте и начала сохранения энергии. Когда Майер, Джаул и Гельмгольц открыли золотую жилу, нетрудно было проследить ее отростки до самой глубокой старины; но лишь в сороковых годах текущего столетия темная догадка стала догматом науки. То же было и со спектральным анализом. „По моему мнению, — говорит Гельмгольц в письме к Тэту (*Tait, Sketch of Thermodynamics, preface*), — кирхгофовы открытия в этой области представляют один из самых поучительных примеров в истории науки уже потому именно, что и до Кирхгофа многие исследователи были на рубеже этих открытий. Эти предшественники Кирхгофа относятся к нему почти так же, как Р. Майер, Кольдинг и Сеген относятся к Джоулю“ (прибавим — Гельмгольцу) „и В. Томсону по вопросу о сохранении силы“.

Кирхгоф — в своих „Исследованиях о солнечном спектре и о спектрах химических элементов“ (1861 г.) и после, в особой исторической записке — подробно перечисляет

труды своих предшественников; но самые выдержки из них ясно говорят о том, какая разница между случайным наблюдением или смутной догадкой и всесторонней разработкой предмета с полным сознанием его важности. Тем не менее в последнее время некоторые из английских ученых непростительно умаляют значение Кирхгофа в истории спектрального анализа. Ссылаясь на личные воспоминания о *нигде ненапечатанных* беседах, В. Томсон в речи, произнесенной на Эдинбургском съезде Британской ассоциации (1871 г.), прямо приписывает заслугу открытия своему соотечественнику Стоксу. Когда-то, в частных разговорах, Стокс сообщал ему догадки о происхождении линий спектра и о присутствии разных металлов на солнце. „Кирхгофу принадлежит, — по мнению Томсона, — *только* та заслуга, что он первый искал и нашел в солнце другие металлы, кроме натрия“.

При всем уважении к Томсону, как одному из первых физиков нашего времени, нельзя не изумиться, видя, что так относятся к истории научных открытий. В своей эксцентрической книге „О кометах“ (*Ueber den Bau der Kometen*), недавно наделавшей столько шума в ученом мире своими полемическими выходками, Цельнер весьма метко издевается над заявлением Томсона, и на этот раз он прав вполне. „Итак, ясно, — говорит он, — что единственное преимущество, какое, по мнению сэра В. Томсона, имеет Кирхгоф перед Стоксом, состоит собственно лишь в *темпераменте* и *характере*. Если бы не эта непреодолимая флегма, которая мешает г. Стоксу посвятить несколько минут на простой опыт для проверки его „великого обобщения“, так он бы и стал творцом спектрального анализа!“ Кирхгоф, который семь лет спустя попадает на ту же, уже снова забытую г. Стоксом идею, — Кирхгоф не обладает этой английской флегмой. Он говорит с Бунзеном о том, как сделать приличный опыт, и вот — глядишь — спектральный анализ и открыт. Итак, не в теоретическом выводе спектрального анализа из общих механических начал и самых общих законов лучеиспускания, не в этом заслуга Кирхгофа сравнительно с английским физиком — ничуть не бывало! Все дело в различии темперамента между англичанином и немцем. Кирхгоф ищет и находит, Стокс не ищет и не находит, хотя он уже за семь лет до Кирхгофа владеет „великим обобщением“, — в этом вся разница“. Прибавим, что тот же Стокс, сделав немного ранее, тоже в области спектра,

открытие меньшей важности, нашел досуг и охоту разработать его самым исчерпывающим образом: мемуары его о флуоресценции занимают не одну сотню страниц.

Но покончим с этой грустной тяжбой (спешим заметить, что ни Стокс, ни Кирхгоф не принимают в ней личного участия). Постараемся, насколько можно, дать понятие о сущности того действительно великого обобщения, истинным автором которого, в глазах беспристрастного историка, будет не Стокс, ни даже Б. Стюарт или Ангстром (имеющие более прав на это), а Кирхгоф.

Соображения, служащие здесь основой, имеют довольно отвлеченный характер и требуют сосредоточенного внимания. Опытная и прикладная сторона кирхгофова открытия стала всеобщим достоянием; менее общедоступна та логическая цепь, которая связывает новое учение с основными началами механики и самыми общими законами о теплоте. Попытаемся дать понятие об этой *теоретической* стороне вопроса. Мы не беремся изложить весь вывод теоремы, но считаем возможным и уместным отчетливо отметить, какие *посылки* берутся здесь в основу и какие *следствия* выводятся.

Представим себе нагретое тело *A* среди безграничного пустого (т. е. одним эфиром наполненного) пространства. Тело испускает лучи тепла (либо темные, либо светящие) и через это лишается части своей энергии. Эта энергия не пропадает бесследно: то, что потеряно телом *A*, сполна передалось окружающему морю эфира, распространяется в нем дальше и дальше, и если бы центральное тело лишилось всей своей теплоты, соответственная (эквивалентная) ей энергия продолжала бы существовать где-нибудь в эфире.

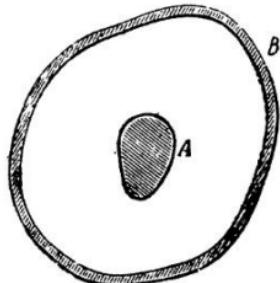


Рис. 2.

Теперь окружим мысленно тело *A* другими какими-нибудь телами, составляющими около него замкнутую оболочку *B* (рис. 2). Волны эфира, идущие из тела *A*, ударяясь в оболочку, претерпевают тройное изменение: часть их *отражается* назад (внутрь); часть *проходит* сквозь оболочку до большей или меньшей глубины; наконец, остальная часть, как говорится, *поглощается* оболочкой, т. е. исчезает, отдавая свою энергию частям оболочки (нагревая, расширяя ее и пр.). Волны отраженные, встречаясь вторично с те-

лом *A* или с новыми частями оболочки, в свою очередь испытывают такие же процессы, и т. д. Смотря по свойству тела, встречаемого волнами, смотря по свойству самых волн, преобладает либо отражение, либо пропускание, либо поглощение волн. Есть тела, которые *почти сполна* отражают все падающие на них лучи; другие отражают их только *отчасти* и притом иногда *избирательно*, т. е. лучи *известного сорта* отражаются предпочтительно перед другими. То же надо сказать о пропускании и поглощении.

Допустим, что наша оболочка *B* настолько толста или непрозрачна, что *не выпускает наружу* лучей, полученных от *A*, и *не впускает* (во внутреннюю полость) тепла, идущего извне. Тело *A* в данный момент имеет определенную температуру. *Дадим ту же самую температуру и оболочке и станем охранять температуру оболочки от всякого изменения*. Для этого нам придется снабжать оболочку (откуда-нибудь извне) либо теплом, либо холодом, регулируя деятельность источников тепла и холода таким образом, чтобы не позволять оболочке ни нагреваться, ни охлаждаться. Нетрудно сообразить, что будет следствием таких условий: *центральное тело A будет само собой сохранять свою температуру*. В самом деле, допустим на время, что тело *A* охлаждается; теряемая им теплота необходимо в конце концов переходит в *B*, и мы получим два тела, из коих более теплое (*B*) нагревается на счет более холодного (*A*). Но такой переход тепла *невозможен без затраты работы*, говорит нам второй закон механической теории теплоты, а работы мы здесь никакой не тратим. К такому же парадоксальному выводу пришли бы мы, если бы допустили, что тело *A* нагревается (очевидно, на счет *B*). Итак, центральное тело не может ни нагреваться, ни охлаждаться и должно сохранять первоначальную температуру (ту же, какая поддерживается в оболочке).

Сохраняя таким образом полное *statum quo*, тело *A* необходимо *теряет* (через лучеиспускание) ровно *столько же энергии* (тепла), сколько *приобретает ее* в то же самое время (через поглощение). Полная энергия всех волн, испущенных телом в данную секунду, равняется полной энергии всех волн поглощенных.

Чтобы от этого простого соображения перейти к кирхгофовой теореме, нужно, повидимому, сделать один шаг; но в нем-то вся трудность. Требуется именно доказать,

что то равенство, какое существует между *полной* энергией всех лучей испущенных и полной энергией всех лучей поглощенных, существует и отдельно во всяком пучке и для всякого сорта лучей. Мы сейчас объясним, что разумеем под *пучком* лучей и на чем основываем их сортировку.

Мы не можем здесь проследить всего хода соображений, ведущих к такой специализации нашего вывода. Отметим, во-первых, те простые гипотезы, которые при этом берутся в помощь.

Мы уже заметили, что есть тела, *почти* вполне отражающие все падающие на них лучи света и тепла; другие тела почти вполне их пропускают, какой бы толстый слой тела мы ни взяли; наконец, некоторые тела — даже в форме самого тонкого слоя — почти вполне поглощают все лучи. Естественно допустить, что *возможны* и такие тела, которые не *почти*, а с *абсолютным совершенством* обладают тем или другим из указанных трех свойств. Вот единственная гипотеза, необходимая Кирхгофу при выводе его закона: он принимает возможность трех типов тел, которые мы назовем типами: *совершенно зеркальным*, *совершенно прозрачным* и *совершенно черным*. Нам нет надобности верить, что *есть* в природе хоть одно из таких тел: достаточно принять, что они *возможны*, *мыслимы*, т. е. что в идее о них нет внутреннего противоречия. *Близость* некоторых действительных тел к тому или другому из этих идеальных типов — уже достаточное ручательство в законности такой гипотезы. Подобные *идеальные тела* вводятся как важное логическое пособие и в других отделах физики: так, например, говорится о телах идеально твердых, идеально упругих, идеально проводящих теплоту или электричество, и т. д.

Изложив *премиссы* кирхгофова вывода, передадим окончательный *результат*, из них вытекающий, опустив промежуточные звенья силлогизма. Прежде всего объяснимся относительно введенных нами терминов.

Вообразим себе между телом *A* и оболочкой *B* (рис. 3 изображает только часть того и другой) две ширмы с весьма маленькими отверстиями *1* и *2*, какой угодно формы. Часть лучей, идущих из *A*, и часть лучей, идущих навстречу из *B*, проходит через оба отверстия; эту-то часть взад и впе-



Рис. 3.

ред идущих лучей, выделяемую нашими двумя ширмами *, мы будем разуметь под именем одного *пучка*. Упомянутая нами специализация состоит, во-первых, в том, что *во всяком из отдельных пучков*, на какие можем разложить сумму лучей нашей системы, энергия лучей, поглощаемых телом *A*, равна энергии лучей, им испускаемых.

Пойдем далее. Выделив один пучок лучей, выберем из него мысленно лучи одного определенного *сорта*. Два качества мы примем в основу такой сортировки: длину волны лучей и их поляризацию.

Внутри пучка могут встречаться лучи темные и светящие того и другого цвета, другими словами, — лучи с различной *длиной волны*. Выделим мысленно те из них, у которых длина волны одинакова или заключается между тесными пределами. На практике такое выделение может сделать *призма*: пучок разнородных лучей, пропущенных через нее известным образом, дробится на многие пучки, занимающие каждый свое место, соответственно той длине волны, какую он имеет.

Но и в отобранных нами лучах еще можно найти физическое различие: так называемое различие поляризации. Оптика учит, что размахи каждой частички эфира, застигающейся волной или лучом, совершаются перпендикулярно к направлению этого луча, но затем могут быть направлены весьма разнообразно. Поставим мысленно кусочек карты на пути луча и под прямым углом к нему (параллельно световой волне): любая из линий, начертанных на карте, может служить направлением размахов, совершаемых эфиром. Возьмем себе теперь, что некоторая часть эфира на пути луча потеряла способность колебаться по всем этим линиям, за исключением *одной*. Такой эфир профильтрует из нашего луча только некоторую долю; эту-то долю мы называем лучом *определенной поляризации*. Практически такую фильтрацию луча можно до некоторой степени осуществить, пропуская его сквозь пластинку турмалина. В обыкновенном пучке лучей есть лучи различной поляризации.

Мы окончили нашу сортировку лучей. Из пучка лучей, выделенного ширмами *1* и *2*, мы отбираем то, что имеет одинаковую длину волны и одинаковую поляризацию. Этую отобранную долю мы назовем *элементом пучка*.

* Эти ширмы — чисто *воображаемые*, так что не изменяют обмена лучей между *A* и *B*.

Для каждого элемента пучка существует равенство между энергией, поглощенной телом A , и энергией, им испущенной (в одно и то же время).

Вот к какому результату приводит Кирхгофа ряд строгих соображений, основанных на предыдущих началах. Тот же вывод нетрудно выразить в несколько иной форме.

Назовем испускательной способностью тела A то количество энергии, которое испускается им в течение одной секунды в отделенном нами элементе пучка. Обозначим ее буквой e . Во всяком отдельном пучке, во всяком элементе этого пучка изливается особая доля энергии, и соответственно ей есть особая испускательная способность тела. Назовем далее буквой f ту энергию, которая — в том же самом элементе пучка — посылается центральному телу частями оболочки, навстречу и взамен энергии, им изливаемой. Из этой энергии f некоторая доля поглощается телом A ; назовем эту долю через af . Число a (оно будет дробь, меньшая единицы или в крайнем случае единица), т. е. отношение энергии поглощенной к полной энергии падающих лучей *, мы назовем поглощательной способностью тела A . И она так же, как e , для всякого пучка и всякого элемента, будет особая.

По равенству двух энергий e и af (испущенной и поглощенной) заключаем, что отношение $e:a$ равняется f .

Повидимому, эта величина f зависит как от свойств оболочки, так и от свойств и положения центрального тела A . В самом деле, в числе лучей, падающих на тело A , есть лучи, испущенные самой оболочкой; могут быть и такие, которые идут от тела A , но возвращены ему отражением от оболочки. Нетрудно однажды убедиться, что эта зависимость величины f от названных обстоятельств есть только кажущаяся: на самом деле f зависит только от температуры взятых нами тел **.

* Из ста процентов падающей энергии поглощается $100a$ процентов.

** Что f не зависит от оболочки, видно уже из найденного выше: f есть то же, что $e:a$; но e и a от оболочки не зависят, они обусловливаются только особенностями центрального тела и его положения.

Далее, следует ли заключить из последнего замечания, что и отношение $e:a$ (т. е. f) зависит от свойств и положения тела A ? Нет, оно и от них не зависит. В самом деле, заменим прежнюю оболочку новой, составленной из одних только совершенно черных

Таким образом наш закон примет следующую форму:

Отношение между испускательной и поглощательной способностью (для какого-либо сорта лучей) одинаково для всех тел, взятых при одной и той же температуре.

Вот в чем состоит закон, который мы назвали *законом взаимности испускания и поглощения*. Посмотрим, к каким следствиям он приводит. Искусственная система, над которой мы доселе рассуждали, — центральное тело с оболочкой той же температуры, — уже не нужна нам более: мы пришли к результату, имеющему самое общее значение.

Если *отношение между двумя величинами остается неизменным*, то чем больше будет одна из них, тем больше должна быть и другая. Прилагая это к нашему случаю, заключаем, что в ряду *различных* тел, взятых при *одинаковой* температуре, „чем больше лучей определенного сорта испускает данное тело, тем больший процент падающих лучей того же сорта оно будет поглощать“.

Тело, которое при данной температуре *не испускает* лучей известной длины волны и потому не обнаруживает их в своем призматическом *спектре*, будет совершенно *прозрачно* для соответственных лучей всякого другого источника теплоты. Оно задержит, поглотит из лучей последнего только такие, какие есть в его собственном спектре. Поглотит больше или меньше по *абсолютному количеству*, — смотря по температуре другого тела, — но всегда одинаковый *процент* лучей данного сорта.

Спектр раскаленных твердых и жидкых тел и *сильно сжатых* газов (или паров) вмещает лучи всевозможных длин волны. Спектр газа или пара, достаточно разреженного, составлен из отдельных светлых линий: частицы такого тела, как струны на унисоне, способны издавать лишь известные, всегда одни и те же *тоны* света. Пропустим лучи одного из тел *первой* категории через какой-либо раскаленный пар; в *совместном спектре* двух веществ могут оказаться раз-

веществ и имеющей ту же температуру, как и прежняя. Мы уже знаем, что от такой замены оболочки *f* не изменится. Но эта новая оболочка не отражает никаких лучей, идущих от *A*, она шлет внутрь лишь лучи ею самой испускаемые. Посылаемая ею энергия *f* уже не может зависеть от тела *A*. Следовательно, и при *всякой* другой оболочке с тою же температурою *f* не зависит от тела *A*, а может зависеть только от температуры.

личные явления. Пусть оба вещества имеют одинаковую температуру; тогда совместный спектр ничем не разнится от спектра *первого* тела, взятого отдельно: пар и по качеству и по количеству сполна вознаграждает то, что он отнял. Но повысим температуру *первого* тела: его спектр станет ярче, и более холодный пар, попрежнему отняв из этого спектра все, что может поглощать, уже не вполне вознаградит за отнятое, ибо собственные лучи пара не довольно сильны. При большой разнице температур вознаграждение будет ничтожно, и в совместном спектре, на месте *светлых* линий, составляющих отдельно взятый спектр пара, являются *темные* линии.

В этом состоит опыт *обращения спектров*, замеченный относительно паров натрия уже в 1849 г. известным Фуко. Кирхгоф, независимо вновь открывший тот же факт, распространил опыт на множество других веществ и дал ему полное объяснение. Этим опытом обнаружена причина темных линий *солнечного* спектра: совпадение их со спектральными линиями тех или других раскаленных паров открыло Кирхгофу, что множество известных нам веществ содержатся в составе солнца. Отсюда — ряд блестящих приложений призмы к исследованию неба.

Еще одно последнее замечание.

Избирательное поглощение тел может относиться не только к лучам, различным по длине волны, но и к лучам различной *поляризации*. Наш закон говорит нам, что если какое-нибудь тело предпочтительно поглощает лучи одной определенной поляризации, то такие же лучи оно будет испускать (при той же температуре). Кирхгоф подтвердил этот вывод опытом над раскаленным *турмалином*.

Такова сущность одного из величайших открытий нашего века. Знаменитый опыт Ньютона стал исходной точкой целой новой науки, с объемом, столь же *всемирным*, как и наука о всемирном тяготении. Ревнивые опасения Гёте за природу, истязаемую „ухищренными“ (*verkünstelte*) опытами и затемняемую математическими фикциями, еще раз остались напрасными: природа дала ясный ответ и стала еще изумительнее. Из всех орудий „пытки“, призма Ньютона, это орудие *посягательства на „единство вечного света“* (*Einheit ewigen*

Lichts zu spalten), была особенно ненавистна поэту; против нее он ратовал всю жизнь. Ныне, в руках одного из достойных преемников Ньютона, призма вознаграждает нас за одно „раздробленное“ единство, указывая на другое. Факты, открытые спектроскопом, не служат ли твердой опорой для одного из самых смелых синтезов нашего времени? Не говорят ли они красноречивее, чем что-либо с тех пор, как открыто всемирное тяготение, не говорят ли они о вещественном единстве и общем происхождении видимой нами вселенной?
