



Г. Кирхгоф

1824—1887



Р. Бунзен

1811—1899

---

## О спектральном анализе О законе теплового излучения

Создание метода спектрального анализа представляет собой пример открытия, явившегося результатом длительной подготовительной работы многих ученых. Действительно, еще в оптических экспериментальных установках Ньютона можно найти основные элементы спектроскопа. Многие ученые XIX в. наблюдали так называемые «фраунгоферовы» линии в спектре Солнца. Наконец, идея о качественном спектральном анализе высказывалась английскими учеными Дж. Гершелем и У.-Г. Ф. Тальботом. Однако заслуга приведения в систему выполненных ранее наблюдений и строгого обоснования нового метода анализа вещества принадлежит двум немецким ученым: физику Г. Кирхгофу и химику Р. Бунзену. Особое значение для развития физики имело и то обстоятельство, что работа над теоретическим обоснованием спектрального анализа привела Г. Кирхгофа к открытию важнейшего закона теплового излучения, связавшего два раздела физики: оптику и термодинамику.

**Р**оберт Вильгельм Эберхард Бунзен родился 31 марта 1811 г. в Геттингене в семье главного библиотекаря, профессора лингвистики университета. Он получил высшее образование в университете родного города, где изучал химию, минералогию, физику и математику. Хотя с первых лет учебы в университете Бунзен проявлял живой интерес к химии, он защитил докторскую диссертацию по физике (1830).

После успешной защиты диссертации Бунзен получил возможность поехать за границу для завершения образования. Во время этой поездки он познакомился со многими известными учеными, в том числе Ж. Гей-Люсаком и В. Реньо. Вернувшись на родину, Бунзен стал приват-доцентом Геттингенского университета, затем преподавал в Касселе, Марбурге, Бреслау. Хотя в Бреслау он проработал недолго, именно там он познакомился

и подружился с молодым физиком Кирхгофом, своим будущим коллегой и соавтором. Наконец в 1855 г. Бунзен перешел в Гейдельбергский университет, с которым оказалась связанной вся его дальнейшая деятельность. В Гейдельберге он на протяжении семидесяти четырех (!) семестров читал курс общей экспериментальной химии.

Хотя в начале своей научной карьеры Бунзен занимался органической химией, его основные исследования связаны с неорганической химией.

Широкую известность Бунзен получил как изобретатель научных приборов. Он усовершенствовал ледяной и паровой калориметры, изобрел гальванический элемент нового типа (теперь носящий его имя), разработал специальную газовую горелку, дававшую высокотемпературное и практически не светящееся пламя, и другие приборы. Особенно много Бунзен работал над совершенствованием методов анализа газов. Достижения Бунзена в этой области были обобщены в ставшей классической монографии «Методы газометрии» (1857).

Бунзен не ограничивался исследованиями в области химии. В 1846 г. он принял участие в экспедиции в Исландию, где изучал продукты извержения вулкана Гекла и гейзеры. Он внес вклад в медицину, открыл противоядие (водную окись железа) при отравлении мышьяком. В сотрудничестве с английским химиком Г. Роско Бунзен исследовал фотохимические процессы.

В 1856 г. Бунзен начал работать над методом анализа газов, основанным на наблюдении окраски пламени. Когда он рассказал о своих изысканиях Г. Кирхгофу, к тому времени уже работавшему в Гейдельберге, то Кирхгоф заметил, что метод анализа можно сделать более информативным, если наблюдать не просто окраску пламени, а спектр его излучения. Совместная разработка этой идеи привлекла к созданию спектрального анализа. С помощью нового метода Бунзен и Кирхгоф открыли в 1860 г. цезий, а в 1861 г. — рубидий. Вслед за ними спектральный анализ стали применять и другие ученые, вследствие чего на протяжении последующих тридцати лет были открыты еще пять новых элементов.

Научные исследования Бунзена получили высокую оценку. Он был избран членом-корреспондентом Парижской Академии наук, иностранным членом Лондонского Королевского общества, был удостоен медали Копли, а также специальной награды за содействие в развитии промышленности.

Умер Бунзен 16 августа 1899 г.

**Г**устав Роберт Кирхгоф родился 12 марта 1824 г. в Кенигсберге в семье юриста. Окончив гимназию, он поступил в Кенигсбергский университет, где учился у таких известных ученых, как, например, Ф. Бессель. Особенно сильное влияние на формирование Кирхгофа как ученого оказал Ф. Нейман. После окончания университета в 1847 г. Кирхгоф преподавал

сначала в Берлине, а затем в Бреслау. В 1854 г. по совету Бунзена Кирхгофа приглашают в Гейдельбергский университет, с которым связаны многие годы его творческой жизни, не богатой внешними событиями. Лишь безвременная смерть жены, оставившей ему четверых детей, да тяжелая болезнь, из-за которой он потерял подвижность, нарушили размеренный ход его жизни. Л. Больцман писал об этом так: «В жизни Кирхгофа не было ничего выдающегося, что соответствовало бы необычности его гения. Его жизнь была обычной жизнью немецкого профессора университета. Великие события происходили исключительно в его голове.»

Научную работу Кирхгоф начал, еще будучи студентом. В 1845—1847 гг. он подготовил важные исследования об электрических цепях. И в дальнейшем Кирхгоф много занимался исследованиями в области электричества. В 1849 г. он выдвинул идею о том, что напряжение в гальванических цепях идентично со статическим потенциалом. На основе этой идеи он вывел знаменитые «правила Кирхгофа», которые применяются для расчета электрических цепей. В 1857 г. ученый опубликовал статью о распространении переменных токов по проводам, некоторые результаты которой явились предвосхищением следствий теории электромагнитного поля Максвелла.

Однако Кирхгоф не ограничивался изучением электромагнетизма. Значителен его вклад в обобщение теории дифракции Френеля. Много занимался ученый теорией деформаций и равновесия упругих тел. Его лекции по механике, в которых тщательно рассмотрены многие важнейшие вопросы этого раздела науки, считаются классическими. Ряд работ Кирхгофа посвящен термодинамике растворов.

Разнообразие исследовательских интересов Кирхгофа в области теории сочеталось с пристальным интересом к физическому эксперименту. Кирхгоф был классическим представителем механицизма — он считал задачей физики объяснение всех природных явлений на основе законов механики.

Кирхгоф был прекрасным преподавателем. На протяжении многих лет его лекции сначала в Гейдельберге, а с 1875 г. в Берлине пользовались большой популярностью. Он организовал специальный семинар-практикум, где студенты могли познакомиться с классическими экспериментальными методами и обсудить их. Многие ученики Кирхгофа впоследствии стали известными учеными и среди них К. Пирсон, Ф. Клейн, А. Шустер, М. Планк. Своим учителем считал Кирхгофа А. Г. Столетов.

Исследования Кирхгофа получили всеобщее признание. Он являлся действительным членом Прусской Академии наук и членом-корреспондентом Парижской и Петербургской академий наук. За создание спектрального анализа он (вместе с Бунзеном) был награжден медалью Дэви. Ученый умер 17 октября 1887 г.

Как уже говорилось выше, началом работ Кирхгофа по теории теплового излучения послужили исследования спектров. Еще

до начала совместной работы Бунзена и Кирхгофа несколько ученых (Д. Брюстер, Л. Фуко, Дж. Г. Стокс) обратили внимание на близость положения в спектре Солнца темных (фраунгоферовых) *D*-линий и линий испускания в спектре натрия. Однако достаточно глубоко связь между линиями испускания и поглощения до Кирхгофа никто не исследовал. Он же в октябре 1859 г. обнаружил интересное явление — обращение линий испускания в спектре натрия при пропускании через пламя солнечного света различной интенсивности. При пропускании через пламя ослабленного солнечного света линии в спектре натрия становились ярче. Когда же через пламя с парами натрия пропускался неослабленный свет Солнца, то на месте светлых линий испускания возникали отчетливые темные линии. Это наблюдение и побудило Кирхгофа заняться анализом связи между процессами излучения и поглощения. В октябре 1859 г. он доложил об открытии закона теплового излучения на заседании Прусской Академии наук.

В 1862 г. Кирхгоф ввел понятие «абсолютно черное тело» и предложил его модель (полость с небольшим отверстием). С этого времени до начала XX в. проблема излучения черного тела рассматривалась как одна из наиболее актуальных в физике. Ее разработка в конечном счете привела к созданию квантовой теории излучения.

Здесь воспроизводятся из статьи Бунзена и Кирхгофа о спектральном анализе и статья Кирхгофа по теории теплового излучения, о которой Больцман писал: «Кто сомневается, что могут быть художественно прекрасными математические произведения, пусть тот прочтет... статью о поглощении и испускании».

## Р. Бунзен, Г. Кирхгоф

### Химический анализ посредством наблюдений спектров

---

#### СТАТЬЯ ПЕРВАЯ

Известно что многие вещества, внесенные в пламя имеют свойство вызывать в спектре последнего определенные светлые линии. На этих линиях может быть основан метод качественного анализа, который значительно расширяет область химических реакций и приводит к решению задач, которые до сих пор даже не ставились. Здесь мы ограничимся прежде всего тем, что разовьем этот метод для щелочных и щелочно-земельных металлов, а также на ряде примеров разъясним его достоинства.

Упомянутые линии проявляются тем отчетливее, чем выше температура и чем меньше собственная светимость пламени. Предложенная одним из нас газовая горелка<sup>1</sup> создает пламя очень высокой температуры и очень малой светимости. Такое пла-



Рис. 97

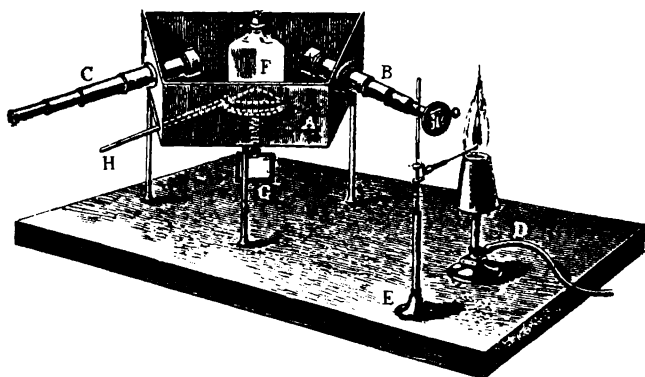


Рис. 98

мя лучше всего пригодно для опытов с веществами, дающими светлые линии.

На рис. 97 представлены спектры, которые получаются от пламени газовой горелки, если в нем испарять возможно более чистые хлорные соединения калия, натрия, лития, стронция, кальция, бария. Чтобы облегчить распознавание, тут же приведен солнечный спектр. <...>

На рис. 98 изображен прибор, служивший нам большей частью при наблюдении спектров. Зачерненный изнутри ящик А имеет форму трапеции и покоится на трех ножках; боковые его стенки, угол между которыми составляет  $58^\circ$ , несут две зрительные трубы В и С. Окулярные линзы первой удалены и заменены пластиной, на которой находится образованная двумя латунными лезвиями щель, расположенная в фокусе линзы-объектива. Перед щелью стоит горелка D так, что ее пламя находится на оси трубы В. Несколько ниже того места, где ось как бы проходит через пламя, находится согнутый в маленькую петлю конец очень тонкой платиновой проволоки, поддерживаемой подставкой Е. На этой петле расплавляется капля исследуемого пред-

варительно обезвоженного хлористого соединения. Между объективами зрительных труб *B* и *C* находится полая призма *F* с преломляющим углом  $60^\circ$ , наполненная сероуглеродом. Призма покоится на латунной пластине, способной поворачиваться вокруг вертикальной оси. Эта ось имеет на своем нижнем конце зеркало *G* и над ним рукоятку *H*, служащую для того, чтобы поворачивать призму и зеркало. Напротив зеркала укреплена маленькая зрительная труба, с помощью которой можно видеть зеркальное изображение горизонтальной шкалы, расположенной на небольшом удалении. Благодаря вращению призмы можно провести изображение спектра пламени мимо вертикальной нити зрительной трубы *C* и совместить с этой нитью любой участок спектра. Каждому участку соответствует сделанный по шкале отсчет. Если спектр неяркий, то нить зрительной трубы подсвечивается с помощью линзы, которая направляет [на нить] часть испускаемых лампой лучей через небольшое отверстие, сделанное сбоку в окуляре зрительной трубы *C*.

Представленные рис. 97 спектры, полученные из названных выше хлорных соединений, сравнивались со спектрами, которые получают, когда бромиды, иодиды, гидроксиды, сульфаты и карбонаты соответствующих металлов вносят в пламя, т. е. рассматривались пламя серы, пламя сероуглерода, пламя, содержащее воду спирта, несветящееся пламя светильного газа, пламя окиси углерода, пламя водорода и пламя гремучего газа. (...)

Тем, кому отдельные спектры известны из многократных наблюдений, не требуются точные измерения отдельных линий. Их цвет, взаимное расположение, своеобразная форма и оттенок, степень блеска являются характеристиками, которых вполне достаточно для надежной ориентации и неопытных наблюдателей.

Эти характеристики являются критериями для сравнения, которые можно использовать подобно неким реагентам для изучения различных осадков по их внешнему виду.

Аналогично тому, как осадки могут быть различного характера: желеобразные, порошкообразные, творожистые, зернистые или кристаллические, — так и спектральные линии имеют присущие им особенности: одна линия резко ограничивается кантами, другие размазываются с одной или с обеих сторон, одинаково или по-разному, одни могут быть шире, а другие — уже. И если обычно для исследования используют лишь те осадки, которые выпадают при возможно большем разбавлении [исходного] раствора, то и при спектральном анализе для изучения состава используются только те линии, которые появляются при наименьшем количестве [исследуемого] вещества и при не слишком высокой температуре.

В этом смысле оба метода примерно одинаковы. Зато спектральный анализ, рассматриваемый как своеобразный реактив, имеет в отношении окраски особенность, которая обеспечивает ему преимущество перед любыми другими аналитическими методами. В самом деле, среди осадков, которые используются для

изучения веществ, большая часть имеет белый цвет и только некоторые из них являются окрашенными. При этом окраска осадков не очень постоянна и имеет различные оттенки в зависимости от того, происходит ли осаждение в более плотных или более рыхлых формах. Кроме того, часто уже мельчайшие примеси посторонних веществ приводят к потере характерной окраски и замене ее совершенно неизвестной. Поэтому более тонкие градации цвета осадков не принимаются во внимание как химические характеристики состава.

Напротив, появляющиеся в спектральном анализе окрашенные полосы не затрагиваются такими посторонними влияниями и не меняются в присутствии других веществ. Места, которые они занимают в спектре, определяют химическое свойство, которое имеет столь же фундаментальную и неизменную природу, как атомный вес вещества, и могут быть поэтому установлены с почти астрономической точностью.

Совершенно особое значение спектрально-аналитическим методам придает то обстоятельство, что они почти бесконечно раздвигают границы, которых к настоящему времени достигла химическая характеристика материи. Они обещают дать нам драгоценные сведения о распространенности и распределении веществ в геологических формациях. Уже немногие опыты, описанные в настоящей статье, приводят к неожиданному заключению, что не только калий и натрий, но также литий и стронций, правда в меньших количествах, должны считаться веществами, распространенными повсюду на нашей Земле.

Не менее важную роль должен сыграть спектральный анализ в открытии до сих пор неизвестных элементов. Действительно, когда речь идет о веществе, которое распространено в природе столь экономно, что прежними методами анализа обнаружить и определить его невозможно, то можно надеяться, что многие такие вещества могут быть обнаружены простым рассмотрением спектров их пламен при наличии количеств этих веществ, не распознанных обычными химическими методами. И в самом деле, мы уже имели возможность убедиться, что существуют до сих пор неизвестные элементы.

Мы полагаем, опираясь на не вызывающие сомнений результаты спектрально-аналитического метода, что уже теперь можно выдвинуть утверждение — наряду с калием, натрием и литием имеется еще и четвертый, принадлежащий к щелочной группе металл. Он имеет такой же характерный и простой спектр, как и литий — металл, который дает в нашем спектральном приборе только две линии: слабую синюю, почти совпадающую с линией стронция  $\text{Sr}\delta$ , и другую, тоже синюю, но расположенную немного ближе к фиолетовому концу спектра, а интенсивностью и резкостью границ соперничающую с линией лития.

Выше мы представили спектральный анализ как изумительно простое средство для обнаружения мельчайших следов определенных элементов в земных телах. С другой стороны, он открыва-

ет для химического исследования область, совершенно недоступную до настоящего времени, простирающуюся далеко за границы Земли и самой Солнечной системы. Поскольку в рассматриваемом аналитическом методе для наблюдения используют раскаленный газ, естественно возникает мысль, что он не должен быть применим к атмосфере Солнца и к неподвижным звездам. Однако он должен быть модифицирован из-за света, который испускают ядра этих мировых тел. В своей статье «Об отношении между испускательной и поглощательной способностями тел для тепла и света»<sup>2</sup> один из нас с помощью теоретического рассмотрения доказал, что спектр накаливаемого газа *обращается*, т. е. светлые линии превращаются в темные, когда за ними находится источник света достаточной интенсивности, который сам дает непрерывный спектр. Отсюда необходимо сделать вывод, что солнечный спектр с его темными линиями есть не что иное, как обращение спектра, которым обладает атмосфера Солнца сама по себе. Таким образом, для химического анализа солнечной атмосферы нужно лишь разыскать те вещества, которые при внесении в пламя дают светлые линии, совпадающие с темными линиями солнечного спектра.

Здесь уместно в качестве экспериментального подтверждения этого закона, выведенного теоретически, привести следующие выполненные нами опыты.

Светлая газовая линия в спектре газового пламени, в которое внесена гранула хлористого лития, превращается в черную, когда через пламя пропускается неослабленный солнечный свет.

Заменив гранулу хлористого лития на гранулу хлористого натрия, получим в солнечном спектре двойную темную линию D необыкновенной четкости, совпадающую со светлой линией натрия.

В спектре друммондова света<sup>3</sup> появляется темная двойная линия D, когда его лучи проходят через пламя водного раствора спирта, в который внесен хлористый натрий\*.

Нам представляется не лишенным интереса получить дополнительные подтверждения найденного примечательного теоретического закона. Их можно получить с помощью опытов, которые здесь следует описать. Мы взяли и раскалили толстую платиновую проволоку в пламени и электрическим током подвели ее

\* В мартовском номере «Philosophical Magazine» за 1860 г. Стокс напомнил, что Фуко еще в 1849 г. провел наблюдение, аналогичное вышеупомянутому. При исследовании электрической дуги между заостренными углями он заметил (...), что в этом спектре на месте [темной] двойной линии D солнечного спектра находится светлая линия и что темная линия D становится отчетливой или появляется в спектре дуги, если через нее пропустить солнечный свет или свет одного из раскаленных заостренных углей и наложить это излучение на спектр. Упомянутое в тексте наблюдение объясняет это интересное, уже 11 лет тому назад отмеченное Фуко явление и показывает, что оно не обуславливается свойствами во многих отношениях еще столь загадочного электрического света, а вызывается одним из соединений натрия, содержащимся в угле, которое благодаря току превратилось в раскаленный газ.



близко к точке плавления. Проволока излучала яркий спектр без каких-либо следов светлых или темных линий. Если же между проволокой и щелью прибора поместить пламя сильно разбавленного водного раствора спирта, в котором растворена поваренная соль, то появляется очень четкая темная линия D.

В спектре платиновой проволоки, которая накалена в пламени, можно получить темную линию D, если перед пламенем поместить пробирку, на поверхности которой нанесено немного амальгамы натрия, нагретой до кипения. Этот опыт важен, поскольку он показывает, что при температуре гораздо более низкой, чем калильный жар, пары натрия оказывают адсорбирующее действие точно в том же месте спектра, что и при более высоких температурах, которые мы может создать, а также и при температурах, которые существуют в атмосфере Солнца.

Светлые линии спектров K, Sr, Ca, Ba можно обратить, используя солнечный свет и применяя смесь хлоридов этих металлов с молочным сахаром. Перед щелью аппарата устанавливается маленький желоб, в который помещается эта смесь; неослабленный солнечный свет проходит вдоль желоба и падает на щель, а смесь поджигается сбоку раскаленной проволокой. Зрительная труба, используемая для наблюдения, устанавливается так, что точка пересечения ее нитей, натянутых под углом, приходится на светлую линию спектра пламени, обращение которой должно быть доказано. Наблюдатель концентрирует свое внимание на том, чтобы определить, появляется ли в момент вспышки темная линия, проходящая через точку пересечения [нитей]. Таким способом при хорошем перемешивании горючей смеси очень легко наблюдать обращение линий Ba $\alpha$ , Ba $\beta$ , K $\delta$ . Последняя из этих линий совпадает с ярчайшей, но не отмеченной Фраунгофером темной линией в солнечном спектре; эта линия появляется в момент вспышки соли калия и оказывается значительно ярче обычной. Чтобы наблюдать описанным способом обращение светлой линии спектра стронция, следует путем просушки тщательнейшим образом очистить хлорид стронция от следов влаги. Остатки влаги приводят к тому, что из-за вспышки выделяющиеся пары воды заполняют пламя вокруг частиц соли, солнечные лучи ослабевают и делается наблюдаемым положительный спектр стронция. (...)

Об отношении между  
испускающей и поглощающей  
способностью тел для тепла  
и света

---

Тело, находящееся внутри оболочки, температура которой равна его собственной, не меняет своей температуры из-за теплового излучения; следовательно, оно поглощает за определенное время ровно столько лучей, сколько испускает. Из этого уже давно был сделан вывод, что при одной и той же температуре отношение между поглощающей и испускающей способностями для всех тел одинаково. При этом предполагалось, что тела испускают лучи только одного вида. Это положение было подтверждено опытами де ля Провостэ и Десэна<sup>4</sup> для многих случаев, в которых испускаемые лучи можно было считать по крайней мере приблизительно однородными постольку, поскольку излучение было темным. Справедливо ли подобное правило, когда тела испускают одновременно лучи разного вида (что, строго говоря, почти всегда имеет место), об этом до сих пор ничего не было выяснено ни путем теоретического рассмотрения, ни посредством опытов. Я обнаружил, что высказанное утверждение остается в силе также и *в этих случаях*, если только под испускающей способностью понимать интенсивность испускаемых лучей *одного вида* и относить поглощающую способность к лучам того же вида. *Отношение испускающей способности к поглощающей способности*, если эти понятия применять в указанном смысле, *для всех тел при одинаковой температуре одинаково*. Я приведу здесь теоретическое доказательство этого утверждения и затем выведу несколько достойных внимания следствий, которые из него непосредственно вытекают и которые частично объясняют известные явления.

Всякое тело испускает лучи, характер и интенсивность которых зависят от его природы и его температуры. К этим лучам при известных обстоятельствах могут добавляться еще и другие, что происходит, когда тело в достаточной степени наэлектризовано или если оно фосфоресцирует или флуоресцирует.

Такие случаи здесь должны быть исключены. Если на тело извне падают лучи, то оно поглощает некоторую часть их и превращает ее в тепло. К *такому* поглощению может при известных условиях добавляться еще и другое, например, если тело — поглотитель света — или если оно флуоресцирует. Здесь предполагается, что все поглощаемые лучи превращаются в тепло.

§ 1. Вообразим, что перед некоторым телом  $C$  [рис. 99] поставлены два экрана  $S_1$  и  $S_2$ , с двумя отверстиями 1 и 2, размеры которых бесконечно малы по сравнению с расстоянием между

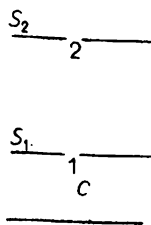


Рис. 99

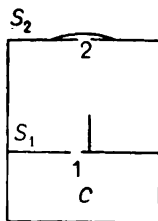


Рис. 100

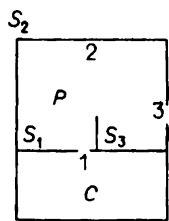


Рис. 101

ними. Через эти отверстия от тела  $C$  проходит пучок лучей. Рассмотрим ту часть его, у которой длины волн лежат между  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$ , и разложим ее на две поляризованные компоненты, плоскости поляризации  $a$  и  $b$  которых взаимно перпендикулярны и проходят через ось пучка. Пусть интенсивность поляризованной в плоскости  $a$  компоненты есть  $E d\lambda$ , где  $E$  — испускательная способность тела.

На тело  $C$  в обратном направлении через отверстия  $2$  и  $1$  падает пучок лучей с длиной волны  $\lambda$ , который поляризован в плоскости  $a$ . Из него тело поглощает некоторую часть, остальное же частично пропускается, частично отражается. Отношение интенсивности поглощенных лучей к интенсивности падающих пусть будет  $A$ ; оно называется поглощательной способностью тела.

Величины  $E$  и  $A$  зависят от природы и температуры тела  $C$ , от положения и формы отверстий  $1$  и  $2$ , от длины волны  $\lambda$  и направления плоскости  $a$ . Надо доказать, что отношение  $E$  к  $A$  не зависит от природы тела. Тогда само собой будет следовать, что это отношение также не меняется с изменением направления плоскости  $a$ , а его зависимость от положения и формы отверстий  $1$  и  $2$  может быть легко найдена, так что остается неизвестным только, как оно зависит от температуры и длины волны  $\lambda$ .

Доказательство, которое будет дано для высказанного здесь утверждения, покоится на предположении, что мыслимы такие тела, которые при бесконечно малой толщине полностью поглощают все падающие на них лучи, т. е. не отражают и не пропускают их. Я буду называть такие тела *абсолютно черными* или, короче, просто *черными*. Необходимо исследовать в первую очередь излучение таких черных тел.

§ 2. Пусть  $C$  — черное тело; его испускательную способность, которая в общем случае обозначается  $E$ , обозначим  $e$ . Требуется доказать, что величина  $e$  остается неизменной, если  $C$  заменить каким-либо другим черным телом при той же температуре.

Пусть тело  $C$  заключено в черную оболочку, часть которой составляет экран  $S_1$ . Второй экран, как и первый, сделан из черного вещества, и оба они соединены сплошными черными боковыми стенками [рис. 100]. Отверстие  $2$  представим сначала закрытым черной площадкой, которую я буду называть площад-

кой 2. Вся система должна обладать одинаковой температурой и быть защищена от потери тепла наружу посредством непроницаемой для тепла оболочки, например посредством замкнутой полностью отражающей поверхности. Тогда температура тела  $C$  будет оставаться постоянной; следовательно, сумма интенсивностей лучей, которые на него падают (и которые оно, согласно предположению, полностью поглощает), должна быть равна сумме интенсивностей лучей, которые оно испускает. Теперь представим себе, что площадка 2 удаляется и открывшееся отверстие закрывается поставленным непосредственно за ним элементом идеально отражающей сферической поверхности, центр которой находится в центре отверстия 1. Температурное равновесие будет сохраняться и в этом случае. Существовавшее равенство интенсивностей лучей, испускаемых телом  $C$ , и лучей, попадающих на него, должно выполняться и теперь. А так как тело  $C$  испускает теперь те же лучи, что и в ранее описанном случае, то отсюда следует, что интенсивность лучей, которые падают на тело  $C$ , в обоих случаях одна и та же. С удалением площадки 2 тело  $C$  лишается тех лучей, которые площадка посылала сквозь отверстие 1, а помещенное в отверстие 2 вогнутое зеркало отбрасывает обратно к телу  $C$  те лучи, которые оно само посылает через отверстия 1 и 2. Отсюда вытекает, что интенсивность пучка лучей, посылаемого телом  $C$  через отверстия 1 и 2, равна интенсивности того пучка лучей, который испускает черная площадка 2 при той же температуре через отверстие 1. Следовательно, эта интенсивность не зависит от формы и прочих свойств черного тела  $C$ . Высказанное положение было бы этим доказано, если бы все лучи обоих сравниваемых между собой пучков имели длину волны  $\lambda$  и были бы поляризованы в плоскости  $Q$ . Учет разнородности лучей требует несколько более сложного рассмотрения.

§ 3. Не меняя изображенного на рис. 100 расположения предметов, представим себе между отверстиями 1 и 2 маленькую пластинку  $P$  [рис. 101], которая в видимых лучах дает цвета тонких пленок и которая (частично вследствие своей малой толщины, а частично вследствие своих природных свойств) не испускает и не поглощает заметного количества лучей. Пусть пластинка расположена так, что пучок лучей, проходящий через отверстия 1 и 2, падает на нее под углом поляризации, и плоскость падения есть плоскость  $Q$ . Пусть стенке, соединяющей друг с другом экраны  $S_1$  и  $S_2$ , придана такая форма, что зеркальное изображение отверстия 2, даваемое пластинкой  $P$ , находится на ней. Представим себе на месте этого зеркального изображения совпадающее с ним по форме отверстие, которое я назову отверстием 3. Пусть отверстие 2 закрыто черной площадкой, имеющей температуру всей системы, а отверстие 3 закрыто *сначала* точно такой же площадкой, которую я буду называть площадкой 3, а в *другом случае* — полностью отражающим вогнутым зеркалом, центр которого лежит в той точке, в которую пластинка  $P$

отбрасывает зеркальное изображение центра отверстия  $I$ . В обоих случаях имеет место тепловое равновесие. Следовательно, сумма интенсивностей лучей, который тело  $C$  лишается из-за удаления площадки  $Z$ , равна сумме интенсивностей лучей, которые будут к нему направляться при установке вогнутого зеркала. Пусть черный экран  $S_3$  (с температурой, равной температуре системы) поставлен так, что ни один из лучей, испускаемых площадкой  $Z$ , не достигает отверстия  $I$ . Тогда первая сумма представляет интенсивность лучей, которые вышли из площадки  $Z$ , отразились от пластинки  $P$  и прошли через отверстие  $I$ ; обозначим ее через  $Q$ . Вторая сумма состоит из двух частей. Первая часть — интенсивность лучей, исходящих из тела  $C$ , она равна

$\int_0^{\infty} d\lambda e r^2$ , где  $r$  — величина, зависящая от свойств пластинки  $P$  и длины волны  $\lambda$ . Вторая часть — интенсивность лучей, которые вышли из части черной стенки, соединяющей экраны  $S_1$  и  $S_2$ , прошли сквозь пластинку  $P$ , отразились от вогнутого зеркала и потом от пластинки  $P$ . Эту часть обозначим через  $R$ . Исследовать более подробно величину  $R$  нет необходимости. Достаточно заметить, что  $R$ , так же как и  $Q$ , не зависит от свойств тела  $C$ . Введенные величины связаны уравнением

$$\int_0^{\infty} d\lambda e r^2 + R = Q.$$

Если теперь заменить тело  $C$  каким-либо другим телом с той же самой температурой и обозначить для него через  $e'$  то, что мы для первого тела обозначали  $e$ , то будет также выполняться уравнение

$$\int_0^{\infty} d\lambda e' r^2 + R = Q.$$

Отсюда вытекает

$$\int_0^{\infty} d\lambda (e - e') r^2 = 0.$$

Предположим теперь, что коэффициент преломления пластинки  $P$  бесконечно мало отличается от единицы. Тогда из теории цветов тонких пленок следует

$$r = \rho \sin^2 \frac{p}{\lambda},$$

где  $\rho$  — величина, пропорциональная толщине пластинки  $P$  и не зависящая от  $\lambda$ , а  $p$  — величина, не зависящая от толщины пластинки. Вследствие этого выведенное уравнение принимает вид

$$\int_0^{\infty} d\lambda (e - e') \rho^2 \sin^4 \frac{p}{\lambda} = 0.$$

Так как это уравнение должно выполняться для любой толщины пластинки  $P$ , т. е. для любого значения  $p$ , то можно заключить, что для каждого значения  $\lambda$

$$e - e' = 0.$$

Чтобы доказать это, заменим в уравнении  $\sin^4(p/\lambda)$  на

$$\frac{1}{8} \left( \cos 4 \frac{p}{\lambda} - 4 \cos 2 \frac{p}{\lambda} + 3 \right)$$

и продифференцируем уравнение два раза по  $p$ . После этого получим

$$\int_0^{\infty} d\lambda \frac{(e - e') p^2}{\lambda^2} \left( \cos 4 \frac{p}{\lambda} - \cos 2 \frac{p}{\lambda} \right) = 0.$$

Введем теперь вместо  $\lambda$  новую величину  $\alpha$ , т. е.  $2/\lambda = \alpha$ , и положим  $(e - e') p^2 = f(\alpha)$ . Тогда

$$\int_0^{\infty} d\alpha f(\alpha) (\cos 2p\alpha - \cos p\alpha) = 0.$$

Примем во внимание, что если  $\varphi(\alpha)$  означает любую функцию  $\alpha$ , то

$$\int_0^{\infty} d\alpha \varphi(\alpha) \cos 2p\alpha = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} d\alpha \varphi(\alpha/2) \cos p\alpha$$

(в чем можно убедиться, если вместо  $\alpha$  подставить  $\alpha/2$ ). Тогда

$$\int_0^{\infty} d\alpha (f(\alpha/2) - 2f(\alpha)) \cos p\alpha = 0.$$

Умножим это уравнение на  $dpcosxp$ , где  $\bar{x}$  — произвольная величина, и проинтегрируем его от  $p = 0$  до  $p = \infty$ . Согласно преобразованию Фурье, которое выражается уравнением

$$\int_0^{\infty} dpcospx \int_0^{\infty} d\alpha \varphi(\alpha) \cos p\alpha = \frac{\pi}{2} \varphi(x),$$

получаем

$$f(x/2) = 2f(x), \text{ или } f(\alpha/2) = 2f(\alpha).$$

Отсюда следует, что функция  $f(\alpha)$  либо равна нулю при всех значениях  $\alpha$ , либо должна становиться бесконечно большой, если  $\alpha \rightarrow 0$ . Если  $\alpha \rightarrow 0$ , то  $\lambda \rightarrow \infty$ . Вспомнив значение  $f(\alpha)$  и учтя, что  $p$  — правильная дробь и что ни  $e$ , ни  $e'$  не могут обращаться в бесконечность, когда  $\lambda$  бесконечно возрастает, легко понять, что второй случай не может иметь места и что для всех значений  $\lambda$  должно выполняться равенство  $e = e'$ . <...>

§ 11. Обратимся снова к рис. 101, только пусть теперь тело  $C$  будет не черное, а любое. Тогда точно так же в обоих представ-

ленных там случаях будет иметь место тепловое равновесие и живая сила, которой тело  $C$  лишается при удалении черной площадки  $3$ , будет равна живой силе, которая подводится к телу  $C$  с помощью заменившего эту площадку вогнутого зеркала. Используемые в § 3 обозначения сохраняют здесь прежний смысл; обозначения  $E$  и  $A$  применяются в том же смысле, что и в § 1. Живая сила, которой лишается тело  $C$  при удалении поверхности  $3$ , с учетом сказанного в § 7 будет определяться выражением

$$\int_0^{\infty} d\lambda e r A.$$

Живая сила, которую тело  $C$  приобретает через посредство вогнутого зеркала, состоит из трех частей. Первая часть — это живая сила лучей, испускаемых самим телом  $C$ :

$$\int_0^{\infty} d\lambda E r^2 A.$$

Вторая часть — это живая сила лучей, которые вышли из противоположной зеркалу черной стенки, прошли сквозь пластинку  $P$ , претерпели одно отражение от вогнутого зеркала и второе от пластинки. Она, согласно § 9, равна

$$\int_0^{\infty} d\lambda e r (1 - r) A.$$

Наконец, третья часть — это живая сила лучей, которые из различных точек черной оболочки, окружающей тело  $C$ , упали на него, были им отброшены на площадку  $2$  вследствие отражений и преломлений и возвращены обратно через отверстие  $1$  в результате одного отражения от пластинки  $P$ , второго — от вогнутого зеркала и третьего — снова от пластинки  $P$ . Если использовать обозначение  $M$ , разъясненное в § 10, то эта часть живой силы равна

$$\int_0^{\infty} d\lambda M r^2 A.$$

Может возникнуть сомнение в правильности выражений для первой и третьей частей, если тело  $C$  расположено как раз так, что конечная часть пучка лучей, посылаемого площадкой  $2$  через отверстие  $1$  к телу  $C$ , отражается им обратно к площадке  $2$ . Поэтому такие случаи мы пока исключим.

Согласно § 10,  $M = M'$  и, по определению,

$$M' = e(1 - A).$$

Тогда для третьей части имеем

$$\int_0^{\infty} d\lambda e (1 - A) r^2 A,$$

и в результате получаем уравнение

$$\int_0^{\infty} d\lambda (E - Ae) A r^2 = 0.$$

Проводя те же рассуждения, как и в § 3 по поводу аналогичного уравнения, можно прийти к выводу, что для каждого значения  $\lambda$   $E/A = e$ , или, если подставить значение  $e$  из § 5,

$$\frac{E}{A} = I \frac{\omega_1 \omega_2}{s^2}.$$

Таким образом, утверждение, которое требовалось доказать, доказано в предположении, что из пучка лучей, попадающих от площадки 2 через отверстие 1 на тело  $C$ , ни одна конечной величины часть не возвращается назад телом  $C$  к площадке 2. Это утверждение справедливо и без такого ограничения, что явствует из следующего. Если упомянутое предположение не выполняется, то надо только бесконечно мало повернуть тело  $C$ , чтобы оно выполнялось, а при такого рода повороте величины  $E$  и  $A$  претерпят лишь бесконечно малые изменения.

Величина, обозначенная через  $I$ , как замечено в § 5, есть функция длины волны и температуры. Нахождение этой функции представляет задачу огромной важности. На пути экспериментального определения функции  $I$  стоят большие трудности. Несмотря на это, существует надежда определить ее опытным путем, так как она, без сомнения, имеет простую форму, как и все полученные до настоящего времени функции, не зависящие от свойств отдельных тел. Только после решения такой задачи можно будет полностью увидеть плодотворность доказанного утверждения; но уже и сейчас из него можно сделать важные заключения.

§ 12. Если взять определенное тело (например, платиновую проволоку) и постепенно его нагревать, то оно будет испускать лучи с длинами волн, большими, чем у видимых лучей, до тех пор, пока не достигнет определенной температуры. При определенной температуре появляются лучи с длиной волны, соответствующей крайнему красному цвету. При все большем и большем повышении температуры добавляются лучи все меньших и меньших длин волн таким образом, что при каждой температуре возникают лучи соответствующей длины волны, в то время как интенсивность лучей более длинных волн растет. Если применить доказанное утверждение к данному случаю, то увидим, что функция  $I$  для некоторой длины волны равна нулю для всех температур ниже определенной температуры, соответствующей данной длине волны, и возрастает при более высоких температурах. Отсюда следует, если применить это утверждение и к другим телам, что все тела при постепенном повышении их температуры начинают испускать лучи одной и той же длины волны при одной и той же температуре, т. е. при одной и той же температуре накаляются докрасна, при более высокой, но одинаковой для всех



начинают испускать желтые лучи и т. д. Интенсивность же лучей определенной длины волны, которые различные тела испускают при одинаковой температуре, может, однако, сильно различаться. Она пропорциональна поглотительной способности тел для лучей данной длины волны. Поэтому при одинаковых температурах металл светится ярче, чем стекло, а последнее ярче, чем газ. Тело, которое при самых высоких температурах остается совершенно прозрачным, никогда не будет светиться. Я помещал в согнутое из платиновой проволоки кольцо диаметром примерно 5 мм немного фосфорнокислого натрия и накаливал его в слабо светящем пламени бунзеновской горелки. Соль расплавлялась, образовывала жидкую линзу и оставалась при этом полностью прозрачной, но она также и совсем не светилась, в то время как соприкасавшееся с ней кольцо испускало ярчайший свет. <...>

§ 16. В заключение приведем здесь еще одно следствие из доказанного утверждения. Если некоторое пространство окружено телами одинаковой температуры и через эти тела лучи не могут проникать, то каждый пучок лучей внутри этого пространства будет по своим свойствам и интенсивности таким, как если бы он был испущен абсолютно черным телом той же температуры, т. е. он не зависит от свойств и формы тел и определяется только температурой. Со справедливостью этого утверждения легко согласиться, если учесть, что пучок лучей, имеющий ту же самую форму, что и выбранный, но противоположное направление, после бесконечного числа отражений от предполагаемых тел полностью поглощается. Внутри непрозрачного раскаленного тела определенной температуры сохраняется вследствие этого также всегда одинаковая яркость, какими бы ни были в остальном свойства этого тела.

*Гейдельберг, январь 1860*

---

#### Комментарий

Перевод с немецкого статьи Р. Бунзена и Г. Кирхгофа выполнен Р. Б. Сегалем и Л. С. Полаком. Название на языке оригинала: *Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen* (1860).

Перевод с немецкого статьи Р. Кирхгофа выполнен Л. Г. Мищенко при участии А. Е. Рубинского. Отрывки из нее воспроизводятся по изданию: Шепф Х.-Г. От Кирхгофа до Планка. М., 1981, с. 124—143. Название на языке оригинала: *Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme* (1860).

<sup>1</sup> Речь идет о так называемой «горелке Бунзена», описанной в 1856 г.

<sup>2</sup> Имеется в виду статья Г. Кирхгофа, написанная в 1860 г.

<sup>3</sup> Друммондовым (известковым или астральным) светом называется яркое свечение, возникающее при нагреве конуса из мела в пламени гремучего

газа (смеси кислорода и водорода). В прошлом использовался для освещения маяков. Назван по имени изобретателя Друммонда, предложившего этот способ освещения в 1826 г.

- <sup>4</sup> Речь идет об опытах французских физиков Ф. Провостэ и П. Десэна по исследованию теплового излучения нагретых тел, поставленных в 1840—1850 гг.

---

## Литература

- [1] Собрание сочинений Р. Бунзена:  
Bunsen R. *Gesammelte Abhandlungen*. Bd. 1—3. Leipzig, 1904.
- [2] Lockemann G. Robert Wilhelm Bunsen. *Lebensbild eines deutschen Naturforschers*. Stuttgart, 1949.
- [3] Роберт Вильгельм Бунзен. — В кн.: *Биографии великих химиков*. М., 1981, с. 231—236.
- [4] Сочинения Г. Кирхгофа:
  - а) Kirchhoff G. R. *Gesammelte Abhandlungen*. Leipzig, 1882. (Nachtrag., Leipzig, 1891).
  - б) Kirchhoff G. R. *Vorlesungen über mathematische Physik*. Bd. 1—4. Leipzig, 1876—1894.
- [5] Столетов А. Г. Г. Р. Кирхгоф. — В кн.: Столетов А. Г. *Собрание сочинений*. Т. 2. М.—Л., 1941, с. 31—52.
- [6] Горнштейн Т. Н. Густав Роберт Кирхгоф и его исследования по тепловому излучению. — *Труды института истории естествознания и техники АН СССР*. 1960. Т. 34. С. 110—156.

**Голин Г. М., Филонович С. Р.**

Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. — М.: Высш. шк., 1989. — 576 с.: ил. ISBN 5-06-000058-3