

ТРУДЫ ИНСТИТУТА  
ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

ИСТОРИЯ  
ФИЗИКО-  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ  
НАУК

---

**Т. Н. ГОРНШТЕЙН**  
**ГУСТАВ РОБЕРТ КИРХГОФ И ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ**  
**ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ**

*(История открытия Кирхгофом основного закона  
теплового излучения)*

Сто лет назад, в конце 1859 г., выдающийся немецкий физик Густав Роберт Кирхгоф открыл закон об отношении между испусканием и поглощением лучистой энергии.

Этот закон послужил теоретической основой развития открытого Кирхгофом совместно с Бунзеном спектрального анализа и определил путь развития во второй половине XIX века важнейшей области теоретической физики — теории излучения, сыграв большую роль в исторической подготовке теории квантов Планка.

### 1. ЖИЗНЬ И ТВОРЧЕСКИЙ ПУТЬ КИРХГОФА

Хотя имя Кирхгофа занимает почетное место в истории физики, о жизни его до сих пор известно очень мало. Не написана еще полная биография Кирхгофа. Сведения о жизни и личности Кирхгофа известны пока главным образом из немногих статей, некрологов и личных воспоминаний. Наиболее интересными являются статья А. Г. Столетова (1873 г.) и речь Больцмана (1887 г.). В 1925 г. Варбург опубликовал воспоминания о Кирхгофе и некоторые материалы из переписки Кирхгофа с родными и друзьями.

Густав Роберт Кирхгоф родился в Кенигсберге 12 марта 1824 г. Он был младшим сыном советника юстиции Карла-Фридриха Кирхгофа.

В детстве Кирхгоф был живым и разговорчивым мальчиком; присущий ему в зрелом возрасте замкнутый и молчаливый характер выработался в нем лишь впоследствии.

Густав Кирхгоф и его братья посещали Клейнгорскую гимназию в Кенигсберге; уже в гимназические годы определились способности Густава к математике и физике. Один из братьев Густава впоследствии работал врачом в Берлине, другой — советником суда. Между братьями велась оживленная переписка, из которой можно почерпнуть некоторые сведения о характере Густава.

Закончив в 18 лет гимназию, Кирхгоф в 1842 г. поступил на физико-математический факультет Кенигсбергского университета. Университет дал ему глубокое математическое образование. Среди его преподавателей были известные математики и физики: Рихело, Бессель, Якоби, Франц Нейман. Наибольшим авторитетом среди студентов в Кенигсбергском университете в то время пользовался Франц Нейман (1798—1895), а в Берлинском — Густав Магнус (1802—1870).

Эти два физика вошли в историю науки не только благодаря значению их личных работ, но и как основатели физических школ. Под их влиянием развивались такие выдающиеся ученые XIX в., как Гельмгольц, Кирхгоф и Клаузиус.

Магнус был центром притяжения главным образом для физиков-экспериментаторов. У него была домашняя лаборатория, которую он предоставил в общее пользование. С 1843 г. на квартире Магнуса собирался коллоквиум, который послужил основанием образованному в 1845 г. Берлинскому физическому обществу. Идею организации общества подал Дю-Буа-Реймон. Основная организационная роль принадлежала физико Карстену. Первыми членами общества были Гельмгольц, Вернер Сименс и Клаузиус.

Франц Нейман был «отцом и Нестором» математической физики; он постоянно подчеркивал значение математики, дающей ясное и точное знание. Под математической физикой в то время разумелась физика, оперирующая дифференциальными уравнениями на основе представления о непрерывности материи. Именно в таком виде она развивалась Францем Нейманом. Во Франции ее разрабатывали главным образом Фурье и Коши; в Англии в сороковых годах XIX в. — Стокс и В. Томсон.

Сам Нейман перешел от вопросов чистой математики к математической физике под влиянием работ Фурье. В течение 50 лет (с 1826 г.) он работал в Кенигсберге. Основанная Якоби и Францем Нейманом так называемая кенигсбергская школа была первой крупной, длительное время процветавшей школой, имевшей влияние далеко за пределами Кенигсберга.

В семинаре Неймана Кирхгоф сделал в 1845 г. свою первую



**Густав Роберт Кирхгоф (1824—1887)**

научную работу по электричеству. Влияние Неймана явно сказалось на изящной математической форме физических исследований Кирхгофа; он безусловно был самым выдающимся из учеников Неймана.

✱ Кирхгоф в молодости сомневался в своем призвании, но под влиянием Неймана твердо решил посвятить себя изучению математики и физики. В университетские годы он писал брату Отто: «Нейман является теперь моим главным учителем, что я констатирую с большим удовлетворением... Благодаря ему кончились мои колебания относительно того, какой науке себя посвятить. Я решил посвятить себя физике, несмотря на скучные наблюдения и скучные расчеты»<sup>1</sup>.

В 1846 г. Кирхгоф закончил Кенигсбергский университет. Философский факультет университета выхлопотал для него редко присуждавшуюся стипендию на поездку с научной целью в Париж. По-видимому, осуществлению этой командировки помешали политические события во Франции<sup>2</sup>.

В 1848 г. Кирхгоф защитил диссертацию при Берлинском университете и был зачислен приват-доцентом. В том же году он стал действительным членом молодого Берлинского физического общества.

Благодаря помощи Магнуса и Якоби через два года Кирхгоф был приглашен в качестве экстраординарного профессора физики в Бреславль. Кирхгоф попал в Бреславль в 1850 г., а через год туда приехал из Марбурга Роберт Вильгельм Бунзен (1811—1899). И хотя Бунзен уже через год перешел в Гейдельбергский университет, между учеными завязалась большая личная и научная дружба, продолжавшаяся в течение всей жизни.

Перейдя в 1852 г. в Гейдельбергский университет в качестве профессора химии, Бунзен постарался привлечь туда Кирхгофа. В 1854 г. ему удалось это сделать, так как после отъезда Жоли освободилось место профессора физики. Кирхгоф отказался от приглашения в Бонн на место Плюккера, в Берлин на место Магнуса и принял предложение Бунзена о переезде в Гейдельберг. Через четыре года туда приехал Гельмгольц (тогда — профессор физиологии), позже — математик Кенигсбергер. Постепенно образовалась гейдельбергская школа математической физики, продолжавшая традиции кенигсбергской школы. В Гейдельберге Кирхгоф работал 20 лет (до 1874 г.) и написал свои лучшие работы. Здесь

<sup>1</sup> Naturwiss., Н. 11, 1925, S. 208.

<sup>2</sup> Е. Варбург пишет, что Магнус и Якоби посоветовали Кирхгофу потратить деньги на жизнь в Берлине, и ничего не говорит о политических событиях того времени.

проходила его совместная деятельность с Бунзеном, приведшая к открытию спектрального анализа.

Вскоре после приезда в Гейдельберг Кирхгоф женился на дочери своего университетского преподавателя математики Ришело.

С 1863 г. значительно улучшилась обстановка работы Кирхгофа. В новом здании университета ему была отведена большая лаборатория и рядом квартира. Однако вскоре он повредил ногу и вынужден был долгое время пользоваться костылем. В 1869 г. его постигло большое несчастье: умерла жена. 2 июля 1869 г. Кирхгоф писал Дю-Буа-Раймону, с которым его связывала большая личная дружба: «Я имел в жизни много незаслуженного счастья; теперь ко мне пришло несчастье. Разрушена моя семья. Я хочу отвлечься научными занятиями, но работа удается плохо. Нож, которым я хочу резать, тупой»<sup>3</sup>. Однако, несмотря на жалобы на плохую работоспособность, Кирхгоф в этом же году написал три работы.

В 1872 г. он женился вторично.

Несмотря на ряд лестных приглашений, Кирхгоф не хотел покидать Гейдельберга, друзей, к которым был очень привязан. Но из-за недостатка средств Гейдельбергский университет приходил в упадок, и друзья Кирхгофа постепенно переезжали в другие университеты. Привязанность Кирхгофа к этому городу постепенно охладевала, и он откликнулся на приглашение (уже третье) переехать в столичный университет в Берлин.

В 1873 г. в Берлине приступили к строительству большой физической лаборатории. Однако из-за болезни глаз и острой боли в ноге экспериментальные занятия стали для Кирхгофа невозможными, и он ушел целиком в работы по математической физике.

В 1875 г. Кирхгоф стал профессором теоретической физики Берлинского университета, но уже в 1876 г. перестал читать лекции и стал заниматься исключительно исследовательской работой. В 1881 г. он был избран ректором Берлинского Университета, но по состоянию здоровья отказался. Однако в зимний период 1885/86 г., собрав последние силы, он прочел свой последний курс лекций.

В Берлине Кирхгоф прожил до самой смерти, которая наступила в 1887 г. от опухоли в мозгу.

Таковы основные вехи жизни Кирхгофа.

Русские физики высоко ценили научные труды Кирхгофа. Уже в 1863 г. он был избран членом-корреспондентом Петер-

<sup>3</sup> Naturwiss., Н. 11, 1925, S. 109.

бургской Академии наук по представлению Б. С. Якоби и Веселовского. С 1870 г. он был членом Берлинской Академии наук и корреспондентом Парижской Академии наук.

Преемником Кирхгофа по кафедре теоретической физики стал Макс Планк.

Вся жизнь Кирхгофа была посвящена работе. Больцман хорошо сказал: «В жизни Кирхгофа не было ничего выдающегося, что соответствовало бы необычайности его гения. Его жизнь была обычной жизнью немецкого профессора университета. Великие события происходили исключительно в его голове»<sup>4</sup>.

Кирхгоф уделял серьезное внимание преподавательской деятельности. Лекции его производили очень большое впечатление на слушателей и привлекали к нему учеников из всех стран.

Кирхгоф сочетал в себе математический талант с умением наблюдать и экспериментировать. Опыты его были точными и изящными, часто производились с приборами собственного изобретения. Он организовал практический семинар, целью которого было облегчить для слушателей переход от прочитанных курсов к самостоятельной работе. В этом семинаре участники его знакомились с классическими методами физических измерений. Результаты всех работающих сравнивались между собой и с результатами, уже принятыми в науке. Темата для работ служили, например, измерения длины волны света, теплоты, выделяющейся при растворении соли и др. Каждый слушатель в начале года выбирал определенный день в неделю, когда он работал в физическом кабинете над избранной темой и задачей.

Учениками Кирхгофа были многие выдающиеся физики и математики: Макс Планк, Ф. Клейн, Карл Пирсон, Артур Шустер и др. Современный крупный немецкий физик Макс Лауэ пишет, что своим решением посвятить себя физике он был обязан опубликованным лекциям Кирхгофа. Решающим фактором было «сознание того, как много можно высказать о природе при помощи математических методов»<sup>5</sup>. Макс Планк отмечает в своей автобиографии, что под руководством Кирхгофа он значительно расширил свой научный кругозор.

Все слушавшие Кирхгофа отмечали, что он не говорил ни одного лишнего слова и в короткое время сообщал богатейший материал. Однако тщательная обработанность лекций, «в которых

<sup>4</sup> L. Boltzmann. Populäre Schriften. Leipzig., 1905.

<sup>5</sup> М. Лауэ. История физики. Пер. с нем. М., Гостехиздат, 1956, стр. 174.

была взвешена и стояла на своем месте каждая фраза»<sup>6</sup>, была связана с некоторой сухостью и однообразием читаемого курса, на что указывали Планк, Клейн и др.

В отличие от лекций Гельмгольца, Кирхгоф в своих лекциях никогда ничего не говорил о себе, проявлял большую скромность. По словам Ф. Клейна, «он читал наизусть гладко обработанную рукопись и скорее позволил бы себе посреди лекции заглянуть в нее, чем дал бы повод обвинить себя в небольшом отступлении от нее»<sup>7</sup>.

Приезжали к Кирхгофу и русские физики. А. Г. Столетов писал, что во время своей поездки в Берлин он «имел счастье несколько лет пользоваться лекциями и частными беседами Кирхгофа и смог пристально всмотреться в личность знаменитого учителя... Простота обращения, неутомимая внимательность в отношении к учащимся, постоянная деятельность и самообладание мысли, дар сжатой, но отчетливой речи, — вот что нас поражало в Кирхгофе. Во всем сказывались сильная воля, чувство долга, высокое и чуждое высокомерия самолюбие, любовь к порядку, терпение, упорная работа»<sup>8</sup>. Для Кирхгофа, как об этом свидетельствуют все его ученики, была характерна исключительная научная добросовестность и правдивость. Он часто применял в своих лекциях слова «пожалуй», «вероятно», когда не был окончательно уверен в достоверности какого-либо положения.

В 1873 г. к Кирхгофу приезжал петербургский физик Боргман; в 1875—1876 гг. Умов во время своей поездки за границу знакомился с постановкой практических работ по физике у Кирхгофа. Он представил Кирхгофу свою статью «О стационарном движении электричества на проводящих поверхностях произвольного вида». Кирхгоф опубликовал в 1875 г. работу на эту тему, используя результаты Умова<sup>9</sup>, но изменив доказательство.

В своих лекциях Кирхгоф стремился воспитать слушателей в духе того научного мировоззрения, которого сам придерживался; в них содержатся также высказывания о научном методе, которым он руководился в своих исследованиях по физике.

Кирхгоф начинал свои лекции всегда с основ механики, утверждая, что основная задача естествознания — сведение

<sup>6</sup> М. Планк. Сб. статей. М., 1958, стр. 12.

<sup>7</sup> Ф. Клейн. Лекции по истории математики в XIX столетии. М., ОНТИ, 1935, стр. 262.

<sup>8</sup> А. Г. Столетов. Г. Р. Кирхгоф. Природа, № 2, 1873, стр. 178.

<sup>9</sup> В своих письмах Умов выражал недовольство этим поступком Кирхгофа.



всех явлений природы к механике. «Эта цель естествознания, — говорил он, — 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»<sup>10</sup>.

Механистическое мировоззрение было в известной степени реакцией против идеалистической натурфилософии Шеллинга и Гегеля. Естествоиспытатели боролись за точное, основанное на опытах знание природы, за обращение к фактам.

Широкую известность не только среди естествоиспытателей, но и философов приобрело высказывание Кирхгофа о научном методе, сделанное им в лекциях по механике (1876 г.): «Механика есть наука о движении. Мы определяем ее задачу, как полное и возможно более простое описание тех движений, которые встречаются в природе»<sup>11</sup>.

Это утверждение Кирхгофа вызвало самые противоречивые толкования со стороны представителей различных физических школ и философских направлений. Позитивисты истолковали мысль Кирхгофа в идеалистическом духе. По их мнению, он определил задачу всякой науки, как «чистое описание чувственных восприятий», в полном согласии с высказанным в 1872 г. взглядом Маха относительно «экономного описания» фактов опыта. Даннеман называет Кирхгофа «родоначальником философии чистого опыта». Такой взгляд широко распространился среди махистов. Имя Кирхгофа до сих пор ставят в один ряд с именами Маха, Авенариуса и Пирсона.

Но приведенное утверждение Кирхгофа ничего общего не имеет с философией чистого опыта, которая «очищает» опыт от материи, от объективной реальности. Кирхгоф здесь явно говорит о «происходящих в природе движениях» и сразу же после определения задачи механики пишет: «Движение есть изменение места со временем. То, что движется, есть материя». Природа и материя всегда понимались им в чисто материалистическом духе, а не как совокупность ощущений.

Незаконные притязания позитивистов в отношении Кирхгофа четко вскрыл Ленин: «Ну, разве же это не образец путаницы? «Экономия мысли», из которой Мах в 1872 г. выводил существование *одних только* ощущений (точка зрения, которую он сам впоследствии должен был признать идеалистической),...

<sup>10</sup> G. R. Kirchhoff. Ueber das Ziel der Naturwissenschaften. Akadem. Vortrag, 1865.

<sup>11</sup> G. R. Kirchhoff. Vorlesungen über Mathematischen Physik. Leipzig, 1876, S. 1.

приравняется к простейшему описанию (объективной реальности, в существовании которой Кирхгоф и не думал сомневаться!)»<sup>12</sup>.

Признавая объективное существование изучаемой в науке реальности и объективную истинность человеческого познания, Кирхгоф несомненно стоял на материалистических позициях, и его имя никоим образом не может быть поставлено в один ряд с именами позитивистов: Маха, Авенариуса, Пирсона и др., как это до сих пор можно встретить в физической и философской литературе. Имя Кирхгофа занимает по достоинству свое место в ряду выдающихся физиков-материалистов: Фарадея, Максвелла, Больцмана, Вина и Планка.

Чтобы правильно понять ставшее знаменитым высказывание Кирхгофа о научном методе, надо взять его прежде всего в том контексте, в котором оно было дано. Не случайно Кирхгоф говорил о задаче *описания*, а не *объяснения* явлений в лекциях по механике. Несомненно, что он стремился уйти от тех трудностей, которые неизбежно возникают при попытке дать первые определения механики. В предисловии к лекциям по механике Кирхгоф подчеркивает, что его исходный пункт отличается от общепринятого. Обычно механику определяют как науку о силах, а силы считают причинами, вызывающими движения. Указывая, что это определение механики сыграло положительную роль в процессе ее развития, Кирхгоф считал, однако, что в понятии силы содержится неясность. Он писал: «Здесь мы должны заниматься тем, *каковы* явления, а не указывать их *причины*... Предполагая понятия пространства, времени и материи, можно достичь чисто математического рассмотрения общих уравнений механики. Мы освобождаемся здесь от неясности понятия силы, которая выступает лишь как средство упрощения. Каждое предложение механики, в котором речь идет о силах, может быть переведено в уравнения»<sup>13</sup>.

Кирхгоф стремился устранить из механики все антропоморфные представления, опирающиеся на интуицию. Больцман дал следующую характеристику научного метода Кирхгофа: «Одной из главных целей, которую преследовал Кирхгоф в своих сочинениях и лекциях, было построение теоретической физики из возможно более ясных принципов и усовершенствование ее методов. Благодаря многолетней работе он преобра-

<sup>12</sup> В. И. Ленин. Сочинения, изд. 4-е, т. 14, стр. 158.

<sup>13</sup> G. R. Kirchhoff. Vorlesungen über Mathematischen Physik. Vorwort, S. III.

зил метод физики таким образом, что получил инструмент, работающий по строгим правилам и ведущий всегда простейшим и вернейшим образом к разрешению задачи... При этом, наряду с указанием значения математической последовательности, всегда выступает четкий взгляд Кирхгофа на физическую реализацию»<sup>14</sup>.

Математик Ф. Клейн говорит о том, что от Кирхгофа ведет свое начало особый стиль, который в течение нескольких десятилетий господствовал в математической физике и который обусловил «наружный рассудочный холод» лекций Кирхгофа. Исключение из физики натурфилософских гипотез и всяких антропоморфных представлений было, по словам Клейна, высшим законом этого стиля. «Но мы были бы несправедливыми к Кирхгофу, — писал Клейн, — если бы отказали ему совершенно в участии эмоций и фантазии; об этом свидетельствуют его гениальная и плодотворная исследовательская работа»<sup>15</sup>. Действительно, основной чертой научного метода Кирхгофа является широкое пользование смелыми *мысленными экспериментами*.

Кирхгоф блестяще умел «оперировать понятиями», являясь одним из самых выдающихся теоретиков в физике той эпохи. Энгельс отмечает, что Кирхгоф «способен не только вычислять, но и диалектически мыслить»<sup>16</sup>. Это сказано по поводу рассуждений Кирхгофа в механике, но эта оценка относится также в полной мере к другим работам Кирхгофа, в частности по тепловому излучению, где особенно ярко выступают сильные стороны научного метода Кирхгофа.

Кирхгоф также широко применял аналогии и модели для определения существенных черт рассматриваемых явлений. Ярким примером является открытие им аналогии между вращением твердого тела вокруг неподвижной точки, с одной стороны, и изгибанием и закручиванием тонкой проволоки, с другой стороны.

Исследования Кирхгофа по физике многогранны. Его большой заслугой явилось развитие математической теории электрических и магнитных явлений. Он дебютировал в физике работой, сделанной еще на студенческой скамье в 1845 г. «О распределении гальванического тока в пластинке». В 1847 и 1849 гг.

<sup>14</sup> Gesammelte Abhandlungen von G. Kirchhoff. Nachtrag. Herausgegeben von L. Boltzmann, Leipzig, 1891, Vorwort.

<sup>15</sup> Ф. Клейн. Лекции о развитии математики в XIX столетии. ОНТИ, 1935, стр. 262.

<sup>16</sup> Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., Госполитиздат, 1952, стр. 70.

появились его знаменитые работы о законах ветвления токов, обобщившие закон Ома.

В 1857 г. Кирхгоф пошел дальше Вебера, разобрав вопрос о распределении переменных токов в трехмерном пространстве. Исходя из законов Вебера, он написал уравнение движения токов. Во время этих исследований в 1857 г. Кирхгоф сделал как бы мимоходом важное открытие: он нашел, что постоянная  $c$  в законе Вебера, имеющая размерность скорости, если ее разделить на  $\sqrt{2}$ , дает численно скорость света. Но Кирхгоф не предвидел того исключительного значения, которое приобрело впоследствии это соотношение в работах Максвелла, опиравшегося при создании теории электромагнетизма в числе других и на работы Кирхгофа.

Второй областью исследований Кирхгофа была теория упругости твердых тел, имеющая обширное приложение в практической механике и акустике. Здесь Кирхгоф дал две классические работы. В одной из них (1850 г.) он развил общую теорию равновесия и колебаний тонкой упругой пластинки, в другой (1859 г.) — теорию равновесия и колебания тонкого призматического стержня или проволоки. Результаты, полученные Кирхгофом, имели важное значение для развития теории упругости.

В следующем, 1858 г., Кирхгоф опубликовал три статьи по механической теории теплоты<sup>17</sup>. 7 января 1858 г. он писал Дю-Буа-Раймону: «Неделю назад я послал Поггендорфу статью, которая относится к механической теории теплоты и которая мне доставила много радости. Я просил Поггендорфа тотчас же напечатать ее, так как я боюсь, что кто-нибудь сорвет те зрелые плоды, которые я взрастил»<sup>18</sup>.

Кирхгоф впервые обосновал термодинамику растворов. Занятия механической теорией теплоты и глубокое понимание двух основных начал термодинамики помогли ему найти доказательство основного закона теплового излучения, который он открыл в 1859 г. во время своих исследований в спектроскопии.

В 1882 г. Кирхгоф издал собрание своих сочинений (37 работ), но после этого он сделал еще ряд исследований (в частности, дал математическое обобщение волновой теории зон Френеля).

<sup>17</sup> Poggendorf Ann., Bd. 103, 104, 1858, S. 77, 206, 612.

<sup>18</sup> Naturwiss., H. 11, 1925, S. 211.

## 2. ИСТОРИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ОТКРЫТИЯ ЗАКОНА КИРХГОФА

### а) Исследования по тепловому излучению

Вопрос о связи между испусканием и поглощением был впервые поставлен в конце XVIII в. в исследованиях над так называемой лучистой теплотой. Исходя из опытов немецкого химика Шееле, который впервые ввел понятие и термин «лучистая теплота», а также экспериментов женеваского физика М. Пикте, — Пьер Прево в 1791 г. создал учение о теплообмене на основе «подвижного» равновесия<sup>19</sup>.

Изменение испускательной способности тел необходимо связано с изменением поглощательной способности, иначе тело не находилось бы в тепловом равновесии с окружающей средой. В первой половине XIX в. это положение было подтверждено многочисленными опытами над свойствами открытых в 1800 г. В. Гершелем инфракрасных лучей (согласно господствовавшей тогда терминологии — «невидимой лучистой теплоты»). Было произведено большое количество измерений *испускательной способности* тел (Лесли, Меллони, Кноблаухом, Провоста и Дезэном). Обнаруженные различия в результатах объяснялись, с одной стороны, тем, что испускательная способность тел оказалась сильно зависящей от природы вещества, свойств поверхности, слоя вещества и температуры. С другой стороны, применявшиеся методы измерений давали большие ошибки, условия опыта не задавались достаточно точно. Однако все же удалось расположить различные тела в ряд по величине их испускательной способности.

Те же исследователи измеряли также *поглощательную способность* тел и распределили тела в ряд и по этой величине. Явно обнаружилось, что оба установленных ряда подобны друг другу: *тела, которые сильнее поглощают, сильнее испускают, и наоборот*. Среди физиков распространился взгляд, что испускательная и поглощательная способности тел не только пропорциональны, но и равны.

Все эти экспериментальные исследования, однако, касались только интегрального излучения; они не доказывали равенства испускательной и поглощательной способностей *для отдельных длин волн* теплового излучения. Меллони первый ясно показал, что тепловые лучи, как и световые, имеют различные «цвета», т. е. различные длины волн.

---

<sup>19</sup> О работе Прево см.: Т. Н. Г о р н ш т е й н. Труды Ин-та истор. естеств. и техн. АН СССР, т. 28, 1959.

Современник Кирхгофа английский физик Бальфур Стюарт (1828—1887) впервые сделал серьезную попытку дать отношение между «испусканием и поглощением теплоты» невидимых тепловых лучей *любой длины волны*. В марте 1858 г. работа Стюарта была доложена его учителем Форбсом Эдинбургскому Королевскому обществу и в том же году опубликована под названием: «Отчет о некоторых экспериментах по лучистой теплоте, содержащий расширение теории обменов Прево»<sup>20</sup>.

О главной задаче этой работы Стюарт позднее писал: «Я имел в виду прежде всего теоретическое расширение закона обменов Прево, но я хотел основать теорию на экспериментах, а не выводить эксперименты из теории»<sup>21</sup>. Стюарт высоко ценил учение Прево о подвижном равновесии и популяризировал его в ряде своих работ.

Если устанавливается тепловое равновесие, при котором два тела поддерживаются при постоянной температуре, то могут быть сделаны два предположения относительно этого равновесия. Первое заключается в том, что оба тела после установления равновесия перестают излучать друг на друга. Это — *статическое* равновесие, которое утверждалось физиками до Прево. Согласно второму предположению, которое сделал Прево, устанавливается динамическое равновесие, при котором каждое тело продолжает излучать теплоту и обратно получает от другого тела столько же теплоты, сколько оно излучает. При обоих предположениях окончательный результат один и тот же — равенство температуры данных двух тел. Но существует коренное различие в физическом механизме, посредством которого это достигается. Стюарт образно говорил, что поведение двух тел равной температуры, согласно предположению о статическом равновесии, можно сравнить с положением человека, который не становится ни богаче, ни беднее, когда он не отдает и не получает денег. Согласно второму предположению о динамическом равновесии, человек тоже не богатеет и не беднеет в конечном счете, однако он все время отдает деньги, и столько же получает обратно.

После опубликования первой статьи Прево о подвижном равновесии (1791) Лесли доказал экспериментально, что хорошие отражатели «лучистой теплоты», как, например, металлы, являются плохими излучателями. Прево в своей книге «Лучи-

<sup>20</sup> B. Stewart. An account of some Experiments on Radiant Heat involving an extension of Prévost's theory of Exchanges. Edinb. Trans., vol. 22, 1858.

<sup>21</sup> B. Stewart. On the light radiated by heated bodies. Proc. Roy. Soc., vol. 10, 1860, p. 20.

стый теплород» (1809 г.) смог легко показать, что результат Лесли вытекает из его теории обменов.

Стюарт поставил задачу расширить теорию обменов Превю в следующих направлениях: 1) доказать необходимость теплового равновесия и соответствующего ему отношения между испусканием и поглощением для любого вида невидимых тепловых лучей; 2) доказать существование внутреннего излучения. С этой целью Стюарт поставил ряд очень простых опытов, которые можно разбить на следующие группы.

1. С помощью термостолба и гальванометра Стюарт сравнивал испускание тепловых лучей сажей, стеклом, квасцами, селенитом, слюдой и каменной солью при температуре  $100^{\circ}$ . На основании этих опытов он пришел к выводу: «Излучательная способность тонких полированных пластинок различных веществ меняется пропорционально их поглощательной способности; излучение пластинки каменной соли давало только 15% излучения сажи при той же температуре»<sup>22</sup>.

2. Затем Стюарт сравнивал излучение пластинок различной толщины из тех же веществ. Оказалось, что толстое и тонкое стекло излучали неодинаково; у слюды получалось отношение между толстой и тонкой пластинкой  $100 : 89$ ; у каменной соли —  $100 : 81 : 64$  по мере перехода ко все более тонким пластинкам. Итак, излучение из толстых пластинок «диатерманных» веществ (прозрачных для невидимых тепловых лучей) больше, чем из тонких пластинок. Стюарт видел в этом экспериментальное доказательство факта внутреннего излучения.

3. Сравнивалось лучеиспускание пластинок одинаковой толщины из различных веществ также в отношении «качества» излучения (т. е. лучей различной длины), причем определялась способность прохождения лучей от определенных веществ сквозь пластинки из тех же веществ. В этих опытах ярко выразилась характерная особенность каменной соли, которая оказалась гораздо менее прозрачной для лучей от пластинки из каменной же соли, нагретой до  $100^{\circ}$ , чем, например, для лучей, испускаемых поверхностью сажи при той же температуре.

4. Наконец, в последней группе опытов Стюарт сравнивал в отношении «качества» излучения пластинки из различных веществ (стекла, слюды и др.) *неодинаковой толщины*. И на этот раз он измерял способность прохождения лучей определенного вещества сквозь пластинку из того же вещества. Оказалось, что тепловое излучение от *толстых* пластинок всегда проходило

<sup>22</sup> Edinb. Trans., vol. 22, 1858, p. 6.

легче сквозь пластинку из того же вещества, чем излучение от *тонких* пластинок.

Итак, Стюарт экспериментально доказал факт «внутреннего излучения», который он считал необходимым следствием из учения о подвижном равновесии. В учении Прево не было применено понятие «внутреннего излучения», и Стюарт, действительно, расширил в этом отношении учение Прево. Но главной исторической заслугой Стюарта был его следующий вывод из экспериментальных результатов и учения Прево: «Рассматривая теплоту любой температуры, состоящую из гетерогенных лучей, мы можем высказать закон следующим образом: поглощение пластинки равно ее излучению, и это имеет место для любого рода лучей теплоты»<sup>23</sup>. Иначе говоря, испускательная и поглощательная способности всякого вещества должны быть пропорциональными друг другу (или равными, если измерены надлежащей единицей).

Впоследствии возникла острая дискуссия относительно того, насколько положение Стюарта предвосхитило закон об отношении между испусканием и поглощением Кирхгофа, открытый им в октябре 1859 г., т. е. более чем через год после работы Стюарта. Надо прежде всего отметить, что Кирхгоф не был знаком еще тогда с исследованиями Стюарта. Позднее, в 1863 г., изучив работы Стюарта, он признал «очень интересными» его опыты и считал, что Стюарт «с полным правом» сделал вывод о «внутреннем излучении». Что же касается вывода об отношении между испусканием и поглощением, то Кирхгоф писал: «Это заключение не может быть строгим уже потому, что из опытов, которые знают только «больше» или «меньше», не может быть выведено никакое равенство. Закон, к которому ведет этот вывод, нельзя рассматривать *доказанным*, а только как гипотезу, которая нуждается в более точном испытании и в большем уточнении выступающих в ней выражений»<sup>24</sup>.

Мы увидим в дальнейшем, что Кирхгоф дал строгое математическое доказательство своего закона. Кроме того, он не ограничивался только теорией подвижного равновесия Прево, хотя бы и расширенной, — в то время, когда уже возникла механическая теория теплоты и было сформулировано второе начало термодинамики. Лишь за два года до смерти, в 1880 г., Стюарт в своей работе, опубликованной в журнале «Nature», признал ограниченность той теоретической основы, которая послужила ему для вывода закона об отношении между испу-

<sup>23</sup> Edinb. Trans., vol. 22, 1858, p. 58.

<sup>24</sup> Poggendorf Ann., Bd. 118, 1863, S. 105.



сканием и поглощением. «Изложенная здесь теория обменов, — писал он, — была основана на том факте, что в полости постоянной температуры все тела принимают температуру стенок полости. Это — экспериментальное основание, на котором строились наши рассуждения, и мы не пытались искать более глубокий принцип. Теперь мы кратко укажем, что таковой принцип имеется, что этот закон конечного равенства температур является следствием теории энергии, согласно которой нельзя получить работу из теплоты при постоянной температуре. Если бы конечным результатом в полости было различие температур, тогда было бы возможным превращение теплоты в работу, — *perpetuum mobile*. Утверждение, что это невозможно, является одной из аксиом физики»<sup>25</sup>.

Существенное различие между доказательством закона Стюартом и Кирхгофом состоит в том, что Стюарт «не пытался искать более глубокий принцип», а Кирхгоф сразу понял необходимость этого.

Исследования Стюарта в 1858 г. касались только невидимых тепловых лучей. Естественно было распространить полученные Стюартом выводы и на видимый свет. В феврале 1860 г., т. е. уже после опубликования работы Кирхгофа, Стюарт сообщил Лондонскому Королевскому обществу результаты своих исследований.

В этой работе Стюарт впервые упоминает о Кирхгофе, заявляя следующее: «Идея применения этих взглядов к свету явилась независимо друг от друга у профессора Кирхгофа и у меня. Кирхгоф несколько ранее меня опубликовал свое исследование, и мне необходимо о нем упомянуть»<sup>26</sup>. Надо отметить, что в то время как Кирхгоф решительно признавал тождество природы светового и теплового излучений, Стюарт в 1858—1860 гг. занимал в этом вопросе еще довольно неопределенную позицию. Он сообщал о результатах некоторых своих опытов над видимым светом. Цветные стекла, как лучше поглощающие свет, также сильнее излучают его, чем бесцветные. Хорошо отражающие вещества (металлы) меньше поглощают и испускают свет, чем плохие отражатели. Относительно доказательства Кирхгофа Стюарт говорит, что оно полнее, чем его доказательство, но имеет тот недостаток, что не принимает во внимание внутреннее излучение.

Стюарт считал, что Кирхгоф не оценил должным образом его работу. «Я не могу, — писал он, — принципиально

<sup>25</sup> B. Stewart. On radiant heat and light. Nature, vol. 5, 1885.

<sup>26</sup> B. Stewart. On the theory of exchanges and its recent extension. Rep. Brit. Assoc., 1861, p. 101.

согласиться с тем, что ученый, доказавший новый закон и имеющий предшественника, который из тех же посылок сделал тот же вывод, обесценивает его труды в силу того, что его решение более полное... Разве сам Кирхгоф не предъявит такие же требования к тому, кто в будущем даст (если это возможно) более простое и убедительное доказательство, чем данное Кирхгофом»<sup>27</sup>.

Нельзя не согласиться, однако, с общей оценкой Кирхгофом доказательства, которое дал своему положению Стюарт.

Вместе с тем Кирхгоф считал именно Стюарта своим ближайшим предшественником. В дальнейшем историческая заслуга Стюарта была почти забыта. Незаслуженное забвение его работ на континенте отмечал Релэй в своей классической работе, посвященной закону теплового излучения<sup>28</sup>, в которой он называет закон Кирхгофа «законом Стюарта — Кирхгофа». Другой английский физик Артур Шустер, ученик Стюарта, писал: «Труд Стюарта по теории обменов занимает высокое место в истории физики»<sup>29</sup>.

Действительно, труды Стюарта имели в свое время большое значение для выяснения свойств теплового излучения; они были самой высокой ступенью в этой области до исследования Кирхгофа.

## б) Развитие спектроскопии до Кирхгофа

Бальфур Стюарт сделал свой вывод об отношении между испусканием и поглощением на основе опытов над невидимым тепловым излучением, не видя при этом никакой связи установленного им положения с достигнутыми в то время успехами спектроскопии. Кирхгоф шел другим путем. Непосредственным поводом к открытию им закона излучения послужила актуальнейшая проблема спектроскопии — загадка происхождения фраунгоферовых линий.

Как возникла и в каком состоянии была эта проблема до открытия Кирхгофа?

Не останавливаясь на широко известных работах основателя спектроскопии Ньютона, отметим только, что Ньютон не указал различия спектров применявшихся им источников света — Солнца и свечей. Он не увидел в спектре свечи яркой

<sup>27</sup> В. Stewart. Reply to some remarks by G. Kirchhoff in his paper: «On the history of spectrum analysis». Phil. Mag., vol. 25, 1863, p. 360.

<sup>28</sup> Phil. Mag., 1901, p. 98.

<sup>29</sup> А. Шустер. Прогресс физики. Петроград, 1915, стр. 24.

желтой линии, а в спектре Солнца — тонких темных линий. Одни историки физики объясняют это низким качеством призм, применявшихся Ньютоном, другие — слишком широкой щелью, с которой Ньютон проводил свои опыты.

Более ста лет вслед за Ньютоном солнечный спектр считали непрерывным. Учение о спектрах в XVIII в. почти не развивалось. Единственным достижением было сообщение, сделанное в 1752 г. Медицинскому обществу в Эдинбурге шотландцем Томасом Мельвилем (1726—1753). Изучая спектры различных солей (квасцы, поташ и др.), введенных в пламя спиртовой лампы, он впервые увидел яркую желтую полосу. «Испускаются все виды лучей, — писал он, — но не в равных количествах: желтый — значительно более сильный, чем все остальные цвета, вместе взятые»<sup>30</sup>. Мельвиль безусловно сделал шаг вперед в изучении спектров, так как произвел по существу первые наблюдения *спектров испускания*. Ранняя смерть — через год после опубликования — прервала его плодотворные исследования.

В начале XIX в. были расширены границы спектра благодаря открытию В. Гершелем (1800 г.) инфракрасных лучей и Ритгером (1801 г.) — ультрафиолетовых лучей.

Через год английский химик и врач Волластон впервые наблюдал темные линии солнечного спектра. Произошло это таким образом. Вопрос о том, сколько существует цветов и как их отделить друг от друга, занимал многие умы в начале XIX в. Волластон рассуждал так: если различных цветов в солнечном спектре только семь, как думал Ньютон, то можно получить эти цвета в отдельности, сделав более узкой щель, через которую падает на призму солнечный свет. И вот Волластон пропустил свет через щель шириной в 1 линию ( $1\frac{1}{4}$  мм): тогда цвета в спектре не накладывались друг на друга, как это было в большинстве опытов Ньютона, где применялось круглое отверстие. Кроме того, призма у Волластона была более высокого качества, чем у Ньютона. И вот на цветной полосе полученного спектра он обнаружил семь темных вертикальных линий, которые он обозначил буквами А, В, С и т. д.

«Я не могу закончить этих наблюдений над дисперсией света, — писал Волластон, — не заметив, что цветов, получающихся при разложении луча белого света, не семь, и не три, как некоторые полагали. При очень узкой щели можно ясно

<sup>30</sup> Th. Melvill. Physical and literary essays. Edinburgh, 1752.

заметить четыре главных деления призматического спектра, которые до сих пор не были наблюдаемы и описаны»<sup>31</sup>.

Волластон принял темные линии солнечного спектра за естественные границы цветов этого спектра. Считая, однако, темные линии непостоянными, изменяющимися в зависимости от рода призмы и источника света, он закончил свою статью следующими словами: «Впрочем, бесцельно подробнее описывать явления, которые изменяются в зависимости от яркости света и объяснение которых я не могу взять на себя»<sup>32</sup>.

Так Волластон не понял значения своего открытия и остановился в самом начале пути. Представление, которое он составил себе о темных солнечных линиях как о границах цветов, оказалось ложным. Открытие Волластона не обратило на себя внимания и скоро было забыто.

В 1814 г. немецкий оптик Фраунгофер, не знавший ничего о работе Волластона, вторично открыл темные линии солнечного спектра во время своих опытов по отделению цветов спектра. Сделав еще более узкую щель и применив более совершенную призму из очень чистого стекла, Фраунгофер открыл в солнечном спектре множество темных линий, из которых 576 он измерил, зарисовал и главнейшие из них обозначил буквами. Установив постоянство расположения этих линий в спектре Солнца, Фраунгофер использовал их как ориентиры и смог точно измерять показатели преломления.

В отличие от Волластона, Фраунгофер пришел к твердому выводу: «Во всяком случае, эти линии не составляют границы между отдельными цветами; переход одного цвета в другой совершенно незаметен»<sup>33</sup>. Многочисленные опыты убедили его также в том, что темные линии не происходят от недостатков призмы, а связаны с природой света Солнца. Пропуская сквозь узкую щель свет лампы или свечи, Фраунгофер не видел темных линий и вывел отсюда заключение, что в солнечном свете не хватает некоторых цветных лучей.

Найдя, что в солнечном спектре темные линии появляются всегда на одних и тех же местах, Фраунгофер решил исследо-

<sup>31</sup> W. Wollaston. A method of examining refractive and dispersive powers by prismatic reflection, Phil. Trans. Roy. Soc., 1802, June, p. 365.

<sup>32</sup> Там же, стр. 380. С. И. Вавилов предполагает, что Ньютон тоже мог видеть фраунгоферовы линии, но, так же как и Волластон, не придавал им значения, считая их какими-то непостоянными образованиями.

<sup>33</sup> J. Fraunhofer. Bestimmung der Brechungen und Farbenzerstreungs. Vermögen verschieden Glasarten in bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre. Denkschr. der Königl. Akad. der Wissensch. zu München, 1815, S. 203.

вать свет других небесных тел. Оказалось, что в спектре света Луны и Венеры темные линии расположены так же, как в солнечном спектре, и поэтому Фраунгофер заключил, что эти небесные тела светят отраженным солнечным светом. В спектре неподвижных звезд он тоже обнаружил темные линии, но они занимали иное положение, чем в солнечном спектре. Отсюда Фраунгофер сделал следующий вывод: если бы эти темные линии происходили вследствие того, что некоторые лучи задерживаются, проходя сквозь земную атмосферу, то они были бы одинаково расположены в любом спектре, откуда бы ни шел свет. Но так как в спектрах Солнца и «неподвижных звезд» эти темные линии различны, то должно существовать какое-то различие между светом Солнца и неподвижных звезд еще до того, как этот свет доходит до нас.

В восьмой части Мюнхенских мемуаров за 1821—1822 гг. была опубликована работа Фраунгофера, посвященная вопросам дифракции света, которым почти в это же время (в 1819 г.) Био и Френель дали объяснение. Фраунгофер с замечательным искусством изготовил дифракционные решетки, имевшие свыше 1000 штрихов на 1 мм. Оказалось, что в дифракционных спектрах получаются те же темные линии и в той же последовательности, как и в призматических спектрах. Это укрепило убеждение Фраунгофера в том, что причина появления этих линий не зависит от условий опыта. Фраунгофер не задавался, вопросом объяснения отсутствия некоторых лучей в спектре Солнца.

Не понял также Фраунгофер значения сделанного им первые наблюдения о совпадении положения двух желтых линий в свете ламп и свечей с положением темной двойной линии D солнечного спектра. Его как оптика в первую очередь интересовала научно-техническая задача изготовления хороших ахроматических объективов, что требовало тщательного количественного изучения дисперсии. Но его исследования, особенно вторая работа, привлекли внимание физиков, начавших постепенно осознавать важное теоретическое и практическое значение открытия темных линий в спектрах источников света.

Ректор Эдинбургского университета Давид Брюкстер близко подошел к открытию спектрального анализа, так как сформулировал основное положение абсорбционного спектрального анализа *о постоянной связи природы тела, его химического строения с характером спектра поглощения*. Уже в 1822 г. он пишет об открытии «общего принципа химического анализа, в котором простые и сложные тела характеризовались бы своим действием на определенные части солнечного спектра»<sup>34</sup>.

<sup>34</sup> Phil. Trans. Soc. Edinb., vol. IX, 1822, p. 433.

Джон Гершель, сын знаменитого астронома Вильяма Гершеля, начиная с 1822 г. описывал в своих работах пламя различных «горячих тел». Он первый описал спектры испускания хлористых металлов (стронция, калия и меди) и борной кислоты. В письме к Брюстеру в 1822 г. Гершель уже явно говорил о различии светлых линий спектров у различных газов и высказывал мысль о том, что возможно было бы открывать незначительные количества элементов, замечая светлые линии, которые они производят, когда приведены в состояние раскаленных паров. В статье «Свет» в 1827 г. он писал: «Соли натрия дают обильный и совершенно однородный желтый цвет, а соли калия — прекрасный светло-фиолетовый цвет... Цвета, сообщаемые пламени различными основаниями, представляют во многих случаях скорый и хороший способ открытия весьма малых количеств их»<sup>35</sup>.

Та же мысль о возможности эмиссионного спектрального анализа была высказана Тальботом, который писал: «Всякий раз, когда призма покажет существование луча какого-нибудь однородного света в пламени, я предполагаю образование или присутствие какого-нибудь определенного химического соединения... Один взгляд на пламя сквозь призму может указать вещества, для открытия которых потребовался бы сложный химический анализ»<sup>36</sup>.

Кирхгоф в своей замечательной работе «К истории спектрального анализа и анализа солнечной атмосферы» (1863 г.)<sup>37</sup> отдает должное Джону Гершелю и Тальботу в связи с указанной ими возможностью качественного химического спектрального анализа. Но в то же время он справедливо отмечает явные противоречия в работах Гершеля и Тальбота. Камнем преткновения явились вездесущие желтые линии натрия, сыгравшие такую выдающуюся роль в истории спектроскопии. Тальбота и Гершеля явно смущало это постоянное появление двойной желтой линии, и они сомневались в том, нужно ли ее приписывать *только натрию*. Тальбот, например, считал, что желтую линию может вызывать кристаллизационная вода. Он пишет: «Эту желтую линию можно наблюдать при сгорании самых различных тел, как, например, бумаги, дерева, слоновой кости, спиртового раствора хлористого натрия и т. д.; все эти

<sup>35</sup> J. Herschel. On light. Phil. Trans. Soc. Edinb., vol. XII, 1827, p. 455.

<sup>36</sup> Brewster's Journal of science, vol. V, 1826.

<sup>37</sup> Zur Geschichte der spectral Analyse und der Analyse der Sonnenatmosphäre. Poggendorf Ann., Bd. 118, 1863.

вещества имеют единственно общее с солями натрия — воду»<sup>38</sup>. В другом месте он говорит, что желтая линия вызывается сжиганием серы. Неуверенность в том, что желтая линия всегда характеризует избирательно только спектры натрия и его солей, конечно, сильно ослабила позицию Гершеля и Тальбота относительно возможности применения спектрального анализа как средства тонкого химического анализа.

Кирхгоф высоко ценил открытое Брюстером совпадение положения светлых линий в спектре пламени от селитры с положением фраунгоферовых линий А, а и В. Брюстер сознавал, что «существует закономерная зависимость между этими двумя рядами явлений», но не смог дать объяснения этому явлению. Большая заслуга Брюстера заключается в открытии им в 1836 г. темных линий в солнечном спектре, возникающих в результате поглощающего действия земной атмосферы. Положение и интенсивность этих линий, названных им «атмосферными», меняются в зависимости от положения Солнца: яснее всего они обнаруживаются, когда Солнце склоняется к горизонту. В 1866 г. Жансен получил искусственные атмосферные линии (вслед за ним их стали называть теллурическими линиями), рассматривая сквозь призму на расстоянии 21 км большой костер из сосновых деревьев.

Большое значение имели исследования спектра электрической искры, которые давали возможность наблюдать спектры таких тугоплавких веществ, как железо. Основание этим опытам положил Уитстон, который сообщил в 1835 г. на съезде Британской ассоциации в Дублине результаты своих экспериментов над спектрами обыкновенной электрической искры. Еще Фраунгофер нашел, что спектр обыкновенной электрической искры испещрен многими светлыми линиями. Уитстон заметил, что число, положение и цвет этих линий меняются в зависимости от металлов, употребляемых в качестве электродов. Вид спектров настолько различен, что этим способом можно легко различать металлы друг от друга.

В 1849 г. французский физик Фуко нашел, что в спектре электрической дуги, горящей между угольными электродами, постоянно имеется желтая линия, которая совпадает по своему положению с линией D солнечного спектра. Пропуская через дугу солнечный свет, он нашел, что при этом D-линии делаются темнее.

Часто можно встретить, особенно в работах французских ученых, утверждение, что Фуко первый открыл явление обра-

<sup>38</sup> Phil. Mag., vol. 4, 3 ser., p. 115.

щения спектральных линий. Фуко действительно первый наблюдал совпадение линий в дуговом спектре, но дал ему неправильное толкование: он считал это явление обусловленным особенностями дуги. Сам Фуко, который умер в 1868 г., т. е. через 9 лет после открытия Кирхгофа, никогда не претендовал на приоритет. Его открытие привлекло мало внимания и не было известно Кирхгофу. «Ни Фуко, ни другие физики, — писал последний, — не объяснили и не обобщили этих опытов. Они не были мне известны, когда в 1859 г. я начал совместно с Бунзеном исследования спектров цветного пламени»<sup>39</sup>.

Большое значение Кирхгоф придавал работе Свана, который твердо убедился в том, что желтая линия характеризует присутствие в пламени натрия. Его классическая работа о призматических спектрах углеводородов (1856 г.) заканчивается следующими словами: «Когда мы обращаем внимание на почти универсальное распространение соли натрия и замечательную ее энергию в производимости желтой линии, то кажется очень вероятным, что желтая линия, которая появляется в спектрах почти всякого пламени, всегда происходит от присутствия малых количеств натрия»<sup>40</sup>. Сван отмечает идентичность светлых линий спектров различных соединений углеводородов, доказывающую, что положение линий в спектре не изменяется с изменением соотношения углерода и водорода.

Кирхгоф отмечал, что эта работа Свана дала ответ на много раз ставившийся вопрос о том, зависят ли светлые линии раскаленного пара исключительно от отдельных химических составных частей газа. Вместе с тем Кирхгоф замечает, что Сван не ответил на вопрос достаточно определенным и общим образом, так как ограничился исследованиями только спектров углеводородов (к исследованию желтой линии Свана привело ее частое появление в этих спектрах).

Вскоре после этого наблюдатели спектров искры заметили некоторые группы линий, общие спектрам всех металлов. Эти линии были связаны с присутствием кислорода и азота в непосредственной близости от электродов. Говоря об исследователях спектра искры (Уитстон, Массон, Онгстрём, ван дер Вилляген и Плюккер), Кирхгоф указывал, что все эти опыты дают опору для убеждения в том, что светлые линии спектра светящегося газа обусловлены исключительно отдельными химическими составными частями его. Но никто не дал доказательства этого взгляда. Конечно, в то время были мало известны

<sup>39</sup> G. R. Kirchhoff. Zur Geschichte der Spectralanalyse. Poggendorf Ann., Bd. 118, 1863.

<sup>40</sup> Edinb. Trans., april 1856.



процессы, происходящие в электрической искре: условия были слишком сложные, запутанные; смущало, например, различные цвета электрического света в разных частях гейслеровой трубки. При тех же электродах и неизменяемых химических свойствах газа, через который происходил разряд, ван дер Виллиген получал различные спектры, когда он изменял плотность газа. Это могло поколебать взгляд об исключительном соответствии спектра раскаленного газа определенному химическому составу.

Не был вполне убежден в неизменности спектра данного вещества и шведский ученый А. Онгстрём (1814—1874). «Уже Уитстон заметил, — писал он, — что когда берутся полюсы из двух различных металлов, спектр содержит линии обоих металлов. Поэтому было интересно исследовать, дает ли соединение тех же металлов, особенно химическое, также линии обоих металлов или это соединение отличается выступлением новых линий. Обнаруживается, что имеет место первый случай. Единственное различие состояло просто в том, что не хватало определенных линий или они обнаруживались с большой трудностью; но когда они обнаруживались, то всегда появлялись на тех же местах, как у отдельных металлов... Линии в голубой части были смещены к фиолетовой области, но в высшей степени незначительно»<sup>41</sup>. Кирхгоф замечает по поводу этого смещения: «Если бы подобное смещение, даже очень малое, действительно имело место, то из этого надо было бы заключить: или что светлые линии электрической искры следуют другим законам, чем линии раскаленного газа, или что линии раскаленного газа не обусловлены исключительно отдельными химическими элементами»<sup>42</sup>. Кирхгоф имел полное право сказать: «Мне представляется, что никто до Бунзена и меня не поставил четко этот вопрос»<sup>43</sup>.

Вопрос о приоритете Кирхгофа кажется ныне решенным, но в XIX в. он возбуждал большие споры. Мы уже видели, что французы стремились отдать пальму первенства в открытии обращения спектральных линий Фуко. Онгстрём жаловался, что его заслуги не оценены по достоинству. Претендентом на открытие закона Кирхгофа объявил себя также и Тиндаль. Указав на то, что близко подошли к закону Кирхгофа Фуко, Онгстрём, Стокс и Томсон, он писал в 1861 г.: «Что касается меня, то исследования над поглощением и испусканием теплоты газами и парами привели бы меня в 1859 г. к закону, на котором

<sup>41</sup> Poggendorf Ann., Bd. 94, 1855, S. 150.

<sup>42</sup> Poggendorf Ann., Bd. 118, 1863, S. 108.

<sup>43</sup> Там же.

основаны все воззрения Кирхгофа, если бы я случайно не отвлекся от опытов. Вообще Кирхгоф кое-что позаимствовал от меня»<sup>44</sup>.

В 1859 г., вскоре после опубликования первого сообщения Кирхгофа об обращении спектральных линий, Кирхгоф получил письмо от В. Томсона (лорда Кельвина), в котором последний рассказывал свою беседу со Стоксом о наблюдениях Миллером совпадения темной линии солнечного спектра D с двойной светлой линией спектра поваренной соли в спиртовом пламени<sup>45</sup>. Томсон заметил, что здесь должна быть какая-то закономерная связь. Стокс согласился и на основе теории резонанса дал объяснение этому явлению: «Пар натрия должен иметь в силу своего молекулярного строения стремление колебаться в периодах, соответствующих степени преломления двойной линии D. Поэтому присутствие натрия в источнике света должно вызывать свет такого же свойства; но, с другой стороны, пары натрия, находящиеся в атмосфере вокруг источника света, должны иметь большое стремление удержать в себе, т. е. поглотить, свет этого источника и благодаря ему повисить свою температуру. В атмосфере вокруг Солнца происходит то же самое: там тоже должны быть пары натрия, которые, согласно этому механическому объяснению, должны быть особенно непрозрачными именно для света натрия и препятствовать проникновению через окружающую атмосферу солнечного света. Испытание этой теории должно заключаться в том, чтобы узнать, действительно ли имеют пары натрия приписываемую им поглотительную способность. Кажется, какой-то французский ученый нашел это опытным путем, но я нигде не мог найти каких-либо указаний»<sup>46</sup>.

Томсон утверждает, что он эту «механическую теорию» Стокса излагал в своих лекциях несколько лет, всегда указывая, что химия Солнца и звезд должна изучаться путем исследования земных веществ, дающих светлые линии в спектрах искусственного пламени, соответствующие темным линиям

<sup>44</sup> Phil. Trans., vol. 151, 1861, p. 34.

<sup>45</sup> Б. Меньшуткин в своей статье «Краткий очерк открытия спектрального анализа», говоря об этом письме Томсона Кирхгофу, допустил ошибку, утверждая, что Томсон разговаривал с Миллером. На самом же деле Томсон говорил со Стоксом, который упоминал Миллера. Все объяснение Стокса Меньшуткин совершенно ошибочно приписал Миллеру (см. «Краткий очерк истории открытия спектрального анализа», Одесса, 1895, стр. 20).

<sup>46</sup> Здесь, по-видимому, Стокс имеет в виду опыты Фуко в 1849 г. Это высказывание лишней раз свидетельствует о том, как мало были известны опыты Фуко в то время.

спектров Солнца и звезд. В 1862 г. Томсон опять указал на то, что в университете Глазго уже 8 или 9 лет излагались принципы Стокса насчет химии Солнца и звезд в публичных лекциях по натурфилософии и утверждалось наличие натрия в солнечной атмосфере. При этом Томсон признал, что Кирхгоф и Бунзен сделали свое открытие *независимо* от Стокса.

Что же отвечал Кирхгоф на письмо Томсона относительно его указаний на приоритет Стокса? В 1863 г. в своей работе «Об истории спектрального анализа и анализа солнечной атмосферы» Кирхгоф подчеркивает устный характер рассуждений Стокса и противоречие этого, указанного самим Томсоном, факта с заявлением Томсона о том, что «благодаря принципам Стокса относительно химии Солнца и неподвижных звезд было достоверно показано, что натрий находится в солнечной атмосфере»<sup>47</sup>. Кирхгоф заканчивает этими словами свою статью об истории спектрального анализа, не считая нужным даже комментировать далее письмо Томсона.

После ответа Кирхгофа Томсон все же продолжал в ряде своих публичных выступлений приписывать заслугу объяснения происхождения фраунгоферовых линий Стоксу. Но сам Стокс решительно отклонил от себя эту честь. В 1910 г. была опубликована очень интересная его переписка с Томсоном, из которой, между прочим, видно, что Томсон настаивал на опубликовании Стоксом его взглядов. Но Стокс отказался, утверждая, что они являются лишь «недоказуемой гипотезой». Лишь после открытия Кирхгофа Стокс в 1860 г. опубликовал работу, в которой стремился истолковать обращение спектральных линий в духе оптического резонанса<sup>48</sup>.

Больше прав на приоритет в объяснении происхождения фраунгоферовых линий на основе оптического резонанса имел опубликовавший уже в 1853 г. эту идею Онгстрём (Швеция)<sup>49</sup>. Так думал и Кирхгоф, как это видно из следующего высказывания относительно роли его предшественников в открытии закона: «Этот закон уже предугадывался многими; особенно близко к нему подошли Онгстрём и Бальфур Стюарт. Но никто не высказал этот закон с достаточной ясностью и не дал ему строгого доказательства»<sup>50</sup>.

<sup>47</sup> Poggendorf Ann., Bd 118, 1863, S. 111.

<sup>48</sup> G. G. Stokes. On the simultaneous emission and absorption of rays of the same definite refrangibility. Phil. Mag., vol (4) 19, 1860.

<sup>49</sup> Работа Онгстрёма появилась впервые в 1853 г. на шведском языке, но получила известность лишь в 1855 г., когда она была опубликована в немецком и английском журналах.

<sup>50</sup> G. Kirchhoff. Die Untersuchungen über das Sonnenspectrum und die Spectren der chemischen Elemente. Berlin, 1862, Vorwort.

Заслуга Онгстрёма в исследованиях по спектральному анализу очень большая: он значительно расширил по сравнению с Уитстоном и Массоном сведения об искровых спектрах, показал, что они составлены из спектров газов и спектров металлов. Он первый ясно понял основное различие между спектрами твердых и газообразных тел.

Подобно Стоксу Онгстрём высказывал мысль о том, что молекулы тел по закону созвучия (резонанса) поглощают преимущественно такие колебания эфира, в которые они сами легче всего приходят на основании своих молекулярных сил. Приведя в своей работе положение Эйлера: «Тело поглощает все те ряды колебаний, которые может само испускать», Онгстрём утверждал: «Тело в раскаленном состоянии должно излучать все лучи, поглощаемые им при обыкновенной температуре»<sup>51</sup>. При этом он отмечал, что доказать это положение очень трудно, так как раскаленное тело находится в совершенно особых условиях упругости, а поглощательная способность испытывается при обыкновенной температуре, когда условия упругости совсем другие.

Кирхгоф указал, что мысль Онгстрёма в той форме, как она им высказана, неправильна: тело в раскаленном состоянии должно испускать как раз те виды лучей света, которые оно поглощает *при той же самой температуре*. Итак, Онгстрём был первым, кто опубликовал идею оптического резонанса, применив к колебаниям молекул положение Эйлера о резонансе. Но правильно допуская постоянство отношения между испусканием и поглощением, он не достиг ясности в этом вопросе, так как полагал, что надо сравнивать поглощение при низкой температуре с испусканием при более высокой температуре.

Кайзер в своем труде по спектроскопии считает, что Онгстрём вовсе не следует положению Эйлера: у последнего *нет речи о поглощении, при котором тела отнимают энергию у приходящей световой волны*. Согласно взгляду Эйлера, при резонансе кинетическая энергия движения света не ослабляется. Онгстрём же предполагал, что молекулы поглощают свет и превращают полученную энергию в теплоту. По мнению Кайзера, Онгстрём тем самым оставлял почву акустической аналогии, и тогда вообще становится неоправданным применение принципа резонанса. «Акустический резонанс,— писал Кайзер,— никогда не выражается в *уничтожении* энергии определенной длины волны, а напротив, в усилении ее в определенном месте: комплекс волн, проходящий через резонатор, будет давать позади

<sup>51</sup> Poggendorf Ann., Bd. 94, 1855, S. 144.

резонатора соответствующий тон слабее, но резонатор испускает тон по всем направлениям, и поэтому действительной потери звуковой энергии не будет. Конечно, ничтожная доля энергии будет превращена в теплоту благодаря трению о стенки, вязкости (*zähigkeit*), непрерывности струн и т. д.... Резонанс и поглощение, т. е. превращение энергии в теплоту, таким образом, до известной степени исключают друг друга»<sup>52</sup>. Воззрение Стокса, приведенное выше, Кайзер считает вполне совпадающим с пониманием Эйлера.

У Кирхгофа ничего нет о резонансе; он не пользовался для объяснения обращения спектральных линий наглядной акустической аналогией, видимо, потому, что не хотел входить в те трудности молекулярной теории, в которые вовлекала эта аналогия. Как мы увидим в дальнейшем, он пошел другим путем.

Английский химик Крук оспаривал приоритет в пользу лондонского химика В. Миллера. В 1861 г. в журнальной статье он писал: «Профессор Миллер предварил на 16 лет замечательное открытие, приписываемое Кирхгофу о непрозрачности цветного пламени к свету его собственного цвета»<sup>53</sup>. В действительности же дело обстояло следующим образом. В. Миллер с 1845 г. занимался исследованиями спектров поглощения и испускания пламени, окрашенного различными солями металлов. Он описал спектры хлористой меди, борной кислоты, азотнокислого стронция, поваренной соли и хлористого бария. Отчетливого изображения спектров он не получал, так как его метод наблюдения (он растворял в спирте соответствующие соли и исследовал пламя горящего раствора) не обеспечивал этого. Сам Крук указывал на несовершенство его рисунков спектров. Когда он показывал рисунки Миллера специалистам, то последние не могли различить спектров стронция, кальция и бария. Кирхгоф писал: «Господин Миллер имел заслугу опубликования первых рисунков спектров пламени, но эти рисунки малого достигли»<sup>54</sup>.

В заключение своей работы Миллер писал: «Интересно заметить в связи с размышлениями о поглощающем действии солнечной атмосферы, что если бы солнечный свет проходил сквозь пламя, обнаруживающее хорошо заметные черные линии, то эти линии опять появились бы в сложном спектре при условии, что дневной свет не был бы слишком интенсивным по сравнению со светом цветного пламени. Это можно увидеть

<sup>52</sup> H. K a u s e r. Handbuch der Spectroskopie, Bd. 2, S. 7.

<sup>53</sup> Chemical News, vol. 4, 1861, p. 293.

<sup>54</sup> Poggendorf Ann., Bd. 118, 1863, S. 100.

в красном свете нитрата стронция и менее совершенно в зеленом свете хлористой меди. Поэтому предполагается, что существуют светящиеся атмосферы, в которых не только недостает некоторых лучей, но которые оказывают положительное поглощающее влияние на другие виды света»<sup>55</sup>. В том же журнале «Chemical News» за 19 апреля 1862 г. Миллер повторяет это свое высказывание, совершенно не упоминая уже опубликованных работ Кирхгофа.

По поводу опытов и выводов Миллера, которые Крукс считал замечательным открытием, Кирхгоф писал: «Нужно только с некоторой внимательностью прочесть слова Миллера, чтобы понять, что вывод, к которому он пришел, является прямой противоположностью моего вывода, причем нельзя не усмотреть, что его заключение — неправильное. Если заставляют проходить *слабый* свет через цветное пламя, то поглощение этого пламени становится незаметным: его светлые линии делаются еще ярче, чем окружение, потому что в них прибавляется к дневному свету также еще свет пламени»<sup>56</sup>.

Действительно, Миллер утверждал, что солнечный свет не может пройти через темные части спектра пламени, что те части солнечного спектра, которые соответствуют темным частям спектра пламени, поглощаются пламенем. Если бы Миллер говорил о светлых частях спектра пламени, то тогда он действительно высказал бы положение, намного позже данное Кирхгофом. Но на самом деле и наблюдение, и вывод Миллера были неправильными и свидетельствовали о полной неясности его представлений относительно прерывных спектров: он считал темные промежутки между светлыми линиями результатом поглощения.

Можно вполне согласиться с выводами Кирхгофа относительно его предшественников, ибо они соответствуют исторической истине, которая затемнялась национальным пристрастием, особенно со стороны французских и английских физиков.

Итак, историческая подготовка закона Кирхгофа шла в двух относительно независимых друг от друга направлениях. Одно направление имело своей основой теорию обменов Прево, основное положение и следствия которой были подтверждены экспериментальными исследованиями по тепловому излучению в первой половине XIX в. Другое направление — это исследо-

<sup>55</sup> Poggendorf Ann., Bd. 69, 1846, S. 407.

<sup>56</sup> Poggendorf Ann., Bd. 118, 1863, S. 101.

вания в области спектроскопии, первой задачей которой после работ Фраунгофера являлась правильная интерпретация физического значения фраунгоферовых линий.

### 3. ОТКРЫТИЕ КИРХГОФОМ ЯВЛЕНИЯ ОБРАЩЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Первая работа Кирхгофа по оптике была посвящена фраунгоферовым линиям<sup>57</sup>. Его чрезвычайно заинтересовала загадка происхождения этих линий, причина появления их в солнечном спектре. Факты совпадений светлых линий спектров различных веществ и темных линий солнечного спектра не могли не обратить на себя внимания такого исследователя, как Кирхгоф. Он понимал, что эти совпадения — не случайность, а свидетельствуют о какой-то закономерной связи. Но о какой именно? Мы видели, что в современной Кирхгофу литературе были лишь смутные догадки и противоречивые высказывания. Необходимо было поставить точные эксперименты и дать их глубокий теоретический анализ.

Естественно, что нужно было прежде всего твердо убедиться экспериментальным путем в *тождественности положения* темных линий солнечного спектра и светлых линий раскаленных до парообразного состояния тел. Именно такого рода исследования и были произведены Кирхгофом совместно с Бунзеном. О том, как началась совместная работа этих двух ученых, В. Оствальд сообщает на основании своих бесед с Бунзеном, пережившим Кирхгофа на 12 лет, следующее.

С 1856 г. Бунзен усиленно занимался исследованиями окрашенного различными солями металлов (самого по себе бесцветного) пламени изобретенной им горелки. По-видимому, он предвидел, что на этом пути можно получить новое средство химического анализа. Однако он сталкивался с большими трудностями, когда приходилось различать часто кажущиеся одинаковыми цвета одновременно присутствовавших в пламени нескольких металлов. Воспользовавшись цветными стеклами и поглощающими определенными цветами жидкостями, он получил некоторые ценные результаты<sup>58</sup>.

<sup>57</sup> G. R. Kirchhoff. Über den Winkel der optischen Axen des Aragonits für die verschiedenen Fraunhoferschen Linien. Poggendorf Ann., Bd 108, 1858. В этой статье имеется описание прибора для определения по осевым углам различных фраунгоферовых линий (прибор близок по своему устройству к спектральному аппарату).

<sup>58</sup> Картмелл, например, под руководством Бунзена в 1858 г. различал калий от лития, рассматривая пламя через кобальтовое стекло или раствор индго.

Однажды во время беседы об этих опытах со своим молодым другом Кирхгофом Бунзен услышал от него, что можно иным путем гораздо проще и лучше достигнуть цели. Кирхгоф предложил поместить окрашенное пламя перед спектроскопом и путем спектрального разложения пространственно разделить цвета в спектрах различных металлов. «Этот простой шаг уже открывал прямую дорогу спектральному анализу в том виде, как его тогда себе представляли Бунзен и Кирхгоф», — пишет Оствальд <sup>59</sup>.

Кирхгоф стал помогать Бунзену в опытах, осуществлявших поданную им мысль <sup>60</sup>. Кирхгоф и Бунзен исследовали пары различных веществ, отмечая цветные линии на спектре каждого из них. Ориентиром для отметки положений, занимаемых светлыми линиями в спектрах, служили фраунгоферовы линии солнечного спектра, которые Кирхгоф считал «незаменимым средством для определения точного положения спектральных линий». Для наблюдения фраунгоферовых линий с достаточной четкостью необходимо было иметь хорошую призму из флинтстекла. Когда Кирхгоф получил такую призму, отшлифованную самим Фраунгофером, он поставил вместе с Бунзеном ряд опытов для выяснения отношения желтых линий натрия к фраунгоферовым линиям D. В этих опытах спектроскоп был установлен таким образом, что одна половина щели освещалась Солнцем, а другая — исследуемым светящимся газом. Благодаря такому устройству сверху появлялся солнечный спектр, а под ним — спектр исследуемого газа. Тогда сразу удавалось установить прежде всего, что желтые линии спектра натрия занимают такое же положение, как темная линия D солнечного спектра. Во всех дальнейших опытах получалось постоянное замечательное совпадение между положением некоторых темных линий солнечного спектра и светлых линий в спектрах исследуемых тел. *Всегда* светлые линии от исследуемых тел находили себе соответственные темные линии в солнечном спектре. Если же ограничивались только различными земными спектрами, то их светлые линии не совпадали между собой. Кирхгоф твердо убедился в точности этих экспериментальных результатов.

Во время совместных опытов с Бунзеном Кирхгоф сделал некоторые наблюдения, которые, как он пишет, «дали неужи-

<sup>59</sup> Ostwald's Klassiker, № 72, Vorwort.

<sup>60</sup> Подобно тому, как раньше говорили, что «величайшим открытием Дэви был Фарадей», теперь утверждали, что «величайшим открытием Бунзена был Кирхгоф».



данное объяснение происхождения фраунгоферовых линий»<sup>61</sup>. Вот как это произошло.

Получив солнечный спектр и отыскав в нем линию D, Кирхгоф ввел в поле зрения сильный пламя, содержащее поваренную соль. Он ожидал на основании предыдущих опытов, что вместо двойной темной линии D появятся две светлые линии. И это ожидание действительно оправдалось, когда Кирхгоф воспользовался *ослабленным* солнечным светом. «Бунзеновская горелка показала линии натрия на солнечном спектре с превосходящей ожидания яркостью», — писал он впоследствии в своей работе «Исследования солнечного спектра и спектров химических элементов»<sup>62</sup>.

Но когда Кирхгоф пропустил сквозь пламя натрия полный, не ослабленный как прежде солнечный свет, ожидая появления еще более ярких линий натрия, — случилось нечто совсем непредвиденное: к своему большому удивлению он увидел, что темные линии D в солнечном спектре вовсе не превратились в светлые линии, но, напротив, стали еще резче, еще отчетливее.

По словам Больцмана, когда Кирхгоф сделал это наблюдение, он вышел из лаборатории со словами: «Тут, кажется, кроется что-то важное». Пораженный новым неожиданным явлением, Кирхгоф сначала не мог дать ему объяснения. Лишь на другой день, после 20 часов непрерывного размышления, он понял суть дела: *пламя поглотило часть желтого солнечного света*. Любое тело поглощает лучи именно того рода, который оно испускает. Это положение, экспериментально установленное уже в опытах над «тепловым излучением», Кирхгоф применил для объяснения нового опытного факта. Установление внутренней связи между двумя на первый взгляд непосредственно не связанными рядами явлений привело к разгадке тайны происхождения фраунгоферовых линий: темные линии D солнечного спектра образуются потому, что солнечный свет, прежде чем он доходит до нас, проходит через пары натрия в солнечной атмосфере, которые и оставляют на сплошном спектре солнечного диска свои следы в виде фраунгоферовых линий.

Проверку этой своей мысли Кирхгоф произвел посредством другого опыта. Как известно, от раскаленных твердых тел получается непрерывный спектр, не имеющий темных линий. Если бы удалось получить темную линию, пропуская свет от

<sup>61</sup> G. R. Kirchoff. Über die Fraunhofer'schen Linien, 1859; Ostwald's Klassiker, № 100, 1898, S. 3.

<sup>62</sup> G. R. Kirchoff. Untersuchungen über das Sonnenspectrum und die Spectren der chemischen Elemente, 2 Ausgabe. Berlin, Dümmler, 1862, S. 9.

раскаленного твердого тела сквозь светящиеся пары натрия, то это было бы подобием фраунгоферовых линий солнечного спектра, их искусственным созданием. Для этого Кирхгоф раскалывал негашеную известь, которая дает белый свет (т. е. он воспользовался друммондовым светом вместо пламени бунзеновской горелки). Когда в его спектроскопе получался сплошной спектр, то на пути между раскаленной известью и призмой Кирхгоф помещал пламя, окрашенное натрием. Опыт вполне удался: в спектре на месте натриевых линий выступили искусственно образованные темные линии. То же получалось впоследствии, когда Кирхгоф применил в качестве источника света раскаленную платиновую проволоку. Искусственное воспроизведение фраунгоферовых линий доказывало истинность взглядов Кирхгофа на их происхождение. Это был *exerimentum crucis* для испытания теоретического рассуждения Кирхгофа. Биограф Бунзена Локкеман сообщает, что во время аналогичного опыта со сплошным спектром от пламени раскаленных частиц угля эмоциональное напряжение обоих исследователей дошло до предела. Бунзен воскликнул в состоянии экстаза: «Кирхгоф, я, кажется, сойду с ума от восторга, если теперь действительно появятся темные линии!»

В последующих их опытах в пламя бунзеновской горелки вносился хлористый литий. Спектр обнаруживал очень отчетливую светлую линию, которая занимала положение между фраунгоферовыми линиями В и С. Если сквозь пламя падал на щель солнечный свет небольшой интенсивности, то светлая линия выступала в этом же месте на темном фоне. Но при увеличении силы солнечного света на том же месте появлялась темная линия, имевшая совершенно тот же характер, как фраунгоферовы линии.

Из своих опытов Кирхгоф сделал выводы, чрезвычайно важные для дальнейшего развития как спектроскопии, так и учения о тепловом излучении.

6 октября 1859 г. на заседании Берлинской Академии наук Кирхгоф сделал короткое, написанное на двух страницах сообщение об этих опытах под названием «О фраунгоферовых линиях». «Я заключаю из этих наблюдений, — говорил он, — что источники цветного пламени, в спектрах которых выступают светлые резкие линии, ослабляют проходящие через них лучи того же цвета в такой степени, что на месте светлых линий выступают темные линии, как только позади пламени поставлен достаточно сильный источник света, в спектре которого недостает этих линий. Я заключил далее, что темные линии солнечного спектра, не вызванные земной атмосферой,

возникают вследствие присутствия в раскаленной атмосфере Солнца тех же веществ, которые дают в спектре пламени на том же месте светлые линии»<sup>63</sup>.

Это было рождением астроспектроскопии. Макс Планк писал по поводу сообщения Кирхгофа: «Это — знаменитая работа, открывшая эпоху спектральных исследований»<sup>64</sup>.

Так решилась загадка происхождения фраунгоферовых линий: темные линии солнечного спектра указывали на то, что известные лучи солнечного света поглощались раскаленными газами, находящимися между Солнцем и Землей. Это поглощение должно было происходить вблизи Солнца. В свете, исходящем из звезд, как указывал еще Фраунгофер, темные линии расположены совершенно иначе: это свидетельствует о том, что там свет проходит через газы иного рода. Итак, по линиям спектра мы можем сказать, какие пары или газы составляют атмосферу Солнца и звезд.

На основании явлений солнечных пятен В. Гершель предполагал, что Солнце состоит из темного ядра, окруженного светящейся сферой. В результате своих опытов Кирхгоф сделал другое заключение. Солнце представляет собой раскаленное твердое или жидкое тело, которое дает непрерывный спектр, как все раскаленные твердые и жидкие тела. Если даже солнечное «ядро» состоит из газа, то этот газ настолько плотен, что дает непрерывный спектр. Ядро Солнца окружено атмосферной оболочкой из различных газов, которые поглощают определенные лучи света и мешают им дойти до Земли. Температура этой оболочки ниже, чем «ядра», и состоит из веществ, испарившихся из «ядра». Поэтому эти пары поглощают лучи света, которые они сами испускают, но с меньшей интенсивностью, чем «ядро». Части спектра, соответствующие этим лучам света, должны поэтому казаться темными. Это и есть фраунгоферовы линии.

Если известно, какие пары или газы испускают как раз те лучи, которых не хватает в солнечном спектре, то из этого можно заключить, какие вещества имеются на Солнце. Так, Кирхгоф заключил, что на Солнце есть натрий, поскольку темные D-линии точно совпадают со светлыми линиями натрия, а мы не знаем никакого другого вещества, которое дает точно такие же линии. Разнообразие природы велико: каждое вещество характеризуется своими спектральными линиями.

Кирхгоф считал особенно важной эту открывшуюся воз-

<sup>63</sup> Ostwald's Klassiker, № 100, S. 4.

<sup>64</sup> Ostwald's Klassiker, № 37, Anmerkung № 1.

возможность изучения химического состава Солнца и звезд. 11 мая 1860 г. он писал брату о том, что усердно занимается химией, так как мечтает дать химический анализ Солнца, а затем и неподвижных звезд: «Я имел счастье найти ключ к решению этой задачи»<sup>65</sup>.

В том же письме Кирхгоф рассказывал факт, характерный для отношения к его новым идеям в то время. Однажды он услышал от мало знакомого ему профессора философии о том, что «какой-то сумасшедший человек» хочет открыть на Солнце натрий. Кирхгоф привел в большое смущение профессора, так как не устоял от искушения признаться в том, что он и есть этот «сумасшедший человек». Впрочем, скептицизму собеседника Кирхгофа не приходится особенно удивляться: возможно, что этот философ был последователем Огюста Конта, который всего за два года до открытия Кирхгофа утверждал, что человек никогда не сможет узнать состав небесных тел.

Так открытие Кирхгофа нанесло удар агностицизму.

Помимо теоретического сомнения в новых идеях, некоторые современники Кирхгофа считали исследования химического состава небесных тел практически бесполезными.

Значение открытия Кирхгофа сразу понял Фарадей. Он говорил, что если бы люди прибыли на Солнце и взяли бы там немного вещества, чтобы проанализировать его в земной лаборатории, то результат не был бы более точным, чем тот, который получается посредством спектрального анализа.

15 ноября 1859 г. Бунзен писал Роско, с которым он проводил до своих занятий спектральным анализом совместные фотохимические исследования: «В данное время я и Кирхгоф заняты общей работой, которая нам буквально не дает покоя. Кирхгоф сделал чудесное, совершенно неожиданное открытие: он нашел причину появления темных линий в солнечном спектре, усилил их в этом спектре и произвел идентичные по положению фраунгоферовым линиям темные линии в спектре, в котором их не было. Тем самым открылась дорога для определения вещественного состава Солнца и неподвижных звезд с такой же достоверностью, с какой мы определяем серную кислоту и хлор при помощи наших реагентов. Посредством этого метода можно и на Земле различать вещества с такой же точностью, как на Солнце; я, например, могу доказать наличие лития в 20 г воды. Для узнавания некоторых веществ этот метод надо предпочесть всем до сих пор известным»<sup>66</sup>.

<sup>65</sup> Naturwiss., Н. 11, 1925, S. 209.

<sup>66</sup> G. Lockemann. Robert Wilhelm Bunsen. Stuttgart, 1949, S. 145.

Исследования спектров окрашенного пламени приобрели теперь новый большой интерес. Кирхгоф и Бунзен решили продолжать эти исследования, расширяя и углубляя их. Вскоре после своего первого сообщения Кирхгоф исследовал зеленую часть спектра электрической искры между железными электродами и нашел в ней большое число светлых линий, совпадавших с темными линиями солнечного спектра. Когда для получения искры были взяты другие металлы, например медные электроды, то недоставало именно тех светлых линий, которые появлялись при железных электродах. Отсюда Кирхгоф сделал вывод, что среди составных частей раскаленной солнечной атмосферы находится железо,— вывод, который напрашивался сам собой в связи с тем, что железо входит в состав метеоров и очень распространено на земле.

Из темных линий солнечного спектра, которые совпадают со светлыми линиями спектра железа, Кирхгоф описывает только немногие, ссылаясь на рисунок солнечного спектра, данный Фраунгофером. К ним принадлежит линия E, некоторые менее отчетливые линии, примыкающие к E в фиолетовом конце спектра, и одна линия, которая находится между двумя отчетливыми линиями B и C, и которую Фраунгофер обозначил через b.

Величественная задача, которую поставили Кирхгоф и Бунзен — химический анализ Солнца и звезд,— могла быть успешно решена только при условии изучения спектров земных веществ.

Еще до исследований Кирхгофа и Бунзена физики предполагали, что спектральные линии характеризуют раскаленное в пламени вещество. Но лишь Кирхгоф объяснил и доказал это явление.

Спектр зависит от природы вещества. Это положение — основа применения спектроскопии к химическому анализу. Рождением на свет спектрального химического анализа следует считать появление в 1860 г. совместного труда Кирхгофа и Бунзена «Химический анализ путем спектральных наблюдений». «Известно,— пишут они,— что некоторые вещества, будучи введены в пламя, дают в спектре последнего некоторые вполне определенные светлые линии. Пользуясь этими линиями, можно основать особый метод качественного анализа, который ведет в области химии к решению задач, до сих пор считавшихся недоступными... Эти линии появляются тем яснее, чем выше температура и слабее освещающая сила пламени»<sup>67</sup>.

<sup>67</sup> G. R. Kirchhoff und Bunsen. Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. Poggendorf Ann., Bd. 110. 1860.

Вся работа содержит подробное описание спектров тел, исследованных Кирхгофом и Бунзеном. Они наблюдали спектры испускания водных окисей, бромистых и иодистых соединений, сернокислых и углекислых солей натрия, бария, калия, лития, спектр пламени сернистого углеводорода при  $2195^\circ$ , светильного газа при температуре  $2350^\circ$ , окиси углерода при  $3042^\circ$ , водорода при  $3259^\circ$ .

Уже на первых порах (в 1860 г.) спектральный анализ дал возможность открыть существование новых элементов — цезия<sup>68</sup> и рубидия (названия даны в соответствии с цветом голубой линии цезия и рубиновой — рубидия). Через год Крукс открыл таллий, дающий красивую зеленую линию, в 1864 г. был открыт индий, в 1875 г. — гелий.

Гельмгольд характеризовал открытие спектрального анализа, как «один из самых блестящих примеров слияния теоретической проницательности с искусством эксперимента».

Совместная работа Кирхгофа и Бунзена была очень благоприятным обстоятельством для развития физики, так как вряд ли такое соединение химических и физических наблюдений могло быть произведено одним человеком. Нередко в истории физики ставился вопрос, какая доля в открытии спектрального анализа принадлежит Кирхгофу и какая — Бунзену. Ответ на этот вопрос важен не столько для указания авторства, сколько для понимания происхождения и связи идей и экспериментов, связанных с великим открытием обращения спектральных линий.

Из фактической истории этого открытия видно, что инициатива постановки опытов со спектрами окрашенного различными солями пламени принадлежала Бунзену, привыкшему обращать внимание на цвета элементов. Важную роль в совместных исследованиях Кирхгофа и Бунзена играло получение химически чистых элементов. Их предшественники имели дело с недостаточно чистыми элементами, и поэтому в разных местах спектра возникали лишние линии или группы линий нескольких элементов: тем самым затемнялось основное положение спектрального анализа о том, что каждый элемент имеет линии, характерные только для него одного. Получение чистых элементов и вообще химическая сторона исследования принадлежала

<sup>68</sup> В 1860 г. Кирхгоф и Бунзен, исследуя в спектроскопе маточный рассол Дюркгеймской минеральной воды, заметили несколько линий, которых они до этого не видели, хотя тщательно измерили и срисовали спектры всех тогда известных тел. С огромным терпением они выпарили 4200 кг и получили 7 г хлористого соединения нового металла, названного ими цезием (слово caesius по латыни значит голубой).

главным образом Бунзену, блестящее экспериментальное мастерство которого сыграло несомненно большую роль в открытии спектрального анализа. Заслуга же теоретического обобщения совместных экспериментальных исследований принадлежала исключительно Кирхгофу.

Описанные Кирхгофом в работе «О фраунгоферовых линиях» опыты показали, что обращение линий происходит только тогда, когда поглощающее пламя слабое. Чтобы искусственно вызвать темные D-линии в спектре друммондового света, Кирхгоф воспользовался не сильным пламенем бунзеновской горелки, а слабым спиртовым пламенем. В это время Кирхгоф знал условия обращения спектральных линий только экспериментально, а не теоретически. Он не мог еще доказать все сделанные им заключения, но лишь утверждал их высокую вероятность.

Указание Кирхгофом условия обращения линий возбуждали в первые годы после открытия сомнения и казались мало понятными. Так, например, на заседании Лондонского химического общества 20 июня 1861 г. при обсуждении доклада Роско о спектральном анализе Джон Гершель сказал по поводу распространившегося в то время объяснения обращения спектральных линий как явления оптического резонанса: «Мне всегда трудно было понять обычное объяснение. Мне казалось, что если пользоваться сравнением со звучащей струной, то, напротив, должна повышаться интенсивность колебаний». Вслед за Гершелем Фарадей тоже сказал: «Мне всегда казалось очень трудным понимание необходимости того, что здесь происходит ослабление вместо возрастания возбуждения». По поводу этих замечаний Гершеля и Фарадея докладчик Роско сказал: «На этот вопрос трудно ответить, и я не чувствую себя в силах дать соответствующее объяснение. Совершенно верно, что подобие со звучащей струной не совсем точно, потому что в одном случае колебания возбуждаются, а в другом — погашаются».

Но Кирхгоф не удовлетворился объяснением обращения спектральных линий на основе оптического резонанса по аналогии со звуковыми явлениями, как это предлагали его предшественники — Стокс и Онгстрём, продолжавшие и после открытия Кирхгофа развивать эту точку зрения. Кирхгоф понял, что здесь он напал на след важного общего закона теплового излучения. В этом существенное различие его хода мыслей по сравнению с предшественниками.

#### 4. ОТКРЫТИЕ КИРХГОФОМ ЗАКОНА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

27 октября 1859 г. на заседании Берлинской Академии наук Кирхгоф сделал второе сообщение, в котором представил обращение спектральных линий как частный случай общего закона, устанавливающего зависимость между испусканием и поглощением лучистой энергии.

Свой доклад Кирхгоф начал следующими словами: «Несколько недель назад я имел честь доложить в академии о наблюдениях, кажущихся мне интересными, потому что они открывают возможность выводов о химическом составе солнечной атмосферы. Исходя из этих наблюдений, мне удалось достигнуть теперь путем очень простого теоретического рассуждения общего закона, который мне представляется важным во многих отношениях... Этот закон касается свойства, относящегося к испусканию теплоты и света всех тел»<sup>69</sup>.

Что же случилось за три недели, прошедшие после первого сообщения Кирхгофа о фраунгоферовых линиях? Что помогло ему сформулировать общий закон и дать его доказательство? Новые опыты? Нет! Новый важный шаг в теоретическом мышлении: установление связи экспериментально наблюдаемых оптических явлений с основными положениями механической теории теплоты (термодинамики, по современной терминологии).

Продолжая совместные опыты с Бунзеном, Кирхгоф не переставал думать над теоретическим выводом обращения спектральных линий. Его занятия механической теорией теплоты с ее основным понятием теплового равновесия привел и его к пониманию того, что пропорциональность между поглощением и излучением лучистой энергии в отношении каждой отдельной длины волны должна иметь место тогда, когда устанавливается тепловое равновесие.

Закон Кирхгофа связал две различные области физики — оптику и термодинамику. Исследования Кирхгофа положили основание новому отделу физики, осуществляющему эту связь — термодинамике излучения. Применение термодинамики к излучению оказалось чрезвычайно плодотворным как для развития самой термодинамики, так и для развития учения об излучении.

Связь между лучеиспускающей и лучепоглощающей способностями тел, впервые данная в качественной форме в теории подвижного равновесия Прево, получила количественное выражение и новое теоретическое обоснование в законе

<sup>69</sup> G. R. Kirchhoff. Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme. Ostwald's Klassiker, № 100, 1859, S. 6.



Кирхгофа о постоянстве отношения испускательной и поглощательной способности тел.

В своем втором сообщении Кирхгоф дал следующее доказательство этого закона<sup>10</sup>. Когда в бесцветное пламя бунзеновской горелки вводится хлористый натрий или хлористый литий, то образуется атомарный натрий (или литий), который испускает свет только одной определенной длины волны и поглощает свет только той же самой длины волны. Именно в такой форме можно выразить результат опытов, описанных в первом сообщении Кирхгофа. Относится ли это также к испусканию и поглощению тепловых лучей? Неизвестно, — говорит Кирхгоф, — но возможно представить себе существование такого тела, которое излучает и поглощает лучи только одной какой-нибудь определенной длины, и это относится как к светлым, так и к темным тепловым лучам. Наряду с этим допущением, он предполагает также существование идеального зеркала, отражающего все попадающие на него лучи. Сделав эти два допущения, Кирхгоф пишет: «Теперь можно очень легко доказать из общих основных законов механической теории теплоты, что для лучей одной и той же длины волны при одной и той же температуре отношение между способностями излучения и поглощения во всех телах одинаково»<sup>11</sup>.

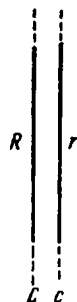


Рис. 1

Рассмотрим две бесконечные плоские пластинки  $c$  и  $C$ , расположенные параллельно на небольшом расстоянии друг от друга (рис. 1).  $C$  с внешней стороны эти пластинки являются абсолютными зеркалами и полностью теплоизолированы, поэтому внутри между пластинками устанавливается тепловое равновесие.

Исследуем поведение пластинки  $c$ , внутренняя сторона которой для лучей длиной волны  $\lambda$  имеет поглощательную способность  $a$  и излучательную  $e$ .

Для этого пластинку  $C$  выберем такой, чтобы ее внутренняя сторона излучала и поглощала лишь лучи с той же длиной волны  $\lambda$ , причем поглощательная и излучательная способность ее были бы соответственно  $A$  и  $E$ .

Из всего количества лучей  $E$ , которое испускает тело  $C$ , другое тело  $c$  поглощает количество  $aE$  и отражает обратно к телу  $C(1-a)E$ . Тело  $C$  из этого количества поглощает

<sup>10</sup> Мы придерживаемся при изложении доказательства закона терминология, применявшейся Кирхгофом.

<sup>11</sup> Ostwald's, Klassiker, № 100, 1859, S. 7.

$A(1-a)E$  и отражает  $(1-A)(1-a)E$  к телу  $c$ , которое отсюда поглощает  $a(1-A)(1-a)E$ . Если продолжить такого рода рассуждения, то ясно, что из количества лучей  $E$  тело  $c$  получает следующее количество лучей, которое для краткости назовем  $K$ :

$$K = aE(1 + k + k^2 + k^3 + \dots) = \frac{aE}{1-k},$$

где  $k = (1-A)(1-a)$ .

Кроме того, часть излучения, испускаемого самим телом  $c$ , возвращается к нему после отражения от  $C$ . Эта часть равна  $(1-A)e$ . Как показывает рассуждение, подобное проведенному выше, в результате этого процесса тело  $c$  дополнительно поглощает количество излучения

$$\frac{a(1-A)e}{1-k}.$$

Условием постоянства температуры тела  $c$  является уравнение

$$e = \frac{aE}{1-k} + \frac{a(1-A)e}{1-k};$$

отсюда получается уравнение:

$$\frac{e}{a} = \frac{E}{A},$$

что и требовалось доказать.

Итак, для лучей одной и той же длины волны при той же температуре отношение способности испускания к способности поглощения для всех тел одно и то же. «Общее для всех тел отношение испускательной способности к поглощательной способности ( $e : a$ ) является функцией длины волны и температуры», — пишет Кирхгоф<sup>72</sup>.

Изложенное доказательство закона часто приводилось в классических работах и учебниках. Но уже в декабре 1859 г. Кирхгоф заменяет это доказательство другим, более сложным, но зато более полным и строгим<sup>73</sup>. Закон Кирхгофа здесь полу-

<sup>72</sup> Ostwald's Klassiker, № 100, 1859, S. 9.

<sup>73</sup> Второе доказательство закона Кирхгофа впервые было опубликовано в 109 томе *Annalen Poggendorfs* за 1860 г. То же доказательство, но с более четкими формулировками допущений и определений было дано Кирхгофом в приложении к его работе «Исследования солнечного спектра и спектров химических элементов», опубликованной в 1861 г. в трудах Берлинской Академии наук, а в 1862 г. вышедшей отдельным оттиском. В этой же второй редакции Кирхгоф поместил доказательство закона и в собрании сочинений в 1882 г. Однако там не хватает некоторых кажущихся нам ценными замечаний Кирхгофа. Планк в Ostwald's Klassiker опубликовал доказательство из работы о солнечном спектре.

чил еще более общее значение: он относится не только к любой длине волны, но принимается еще во внимание поляризация. Чтобы изолировать отдельные длины волн, Кирхгоф использовал представление о тонкой интерференционной пластинке, не применяя теперь уже представление о теле, которое испускает и поглощает лучи только одной длины волны.

Об этом втором доказательстве закона Кирхгофа встречаются различные мнения. Признавая его строгость и полную, многие физики считали его излишне сложным и запутанным. Кайзер писал в своем курсе спектроскопии: «Я не сомневаюсь в правильности закона Кирхгофа, но я желал бы заменить доказательство другим, которое не представляло бы таких логических трудностей»<sup>74</sup>.

Однако Больцман именно об этой работе Кирхгофа писал: «Кто сомневается в том, что могут быть художественно прекрасными математические произведения, тот пусть прочтет его статью о поглощении и испускании»<sup>75</sup>. Лоренц также говорил о «математическом изяществе» теории излучения Кирхгофа и о наслаждении, которое он испытывал при ее изучении. Но какого бы мнения ни придерживаться о доказательстве Кирхгофа, несомненно одно: оно имело огромное историческое значение. В этом можно убедиться уже при анализе тех допущений и предпосылок, из которых исходил Кирхгоф и которые, по его словам, «образуют основу доказательства и определяют границы значимости закона»<sup>76</sup>.

Первой предпосылкой Кирхгоф объявляет доказанное в результате сложного и долгого исторического пути тождество природы тепловых и световых лучей. «Тепловые лучи, — пишет Кирхгоф в первом параграфе, — по своей природе подобны лучам света; они образуют особый класс световых лучей. Невидимые тепловые лучи отличаются от световых лучей только значением частоты колебаний или длины волны. Все тепловые лучи при своем распространении подчиняются тем же законам, какие известны для световых лучей»<sup>77</sup>. Придерживаясь завоевавшей к этому времени признанию волновой теории света, Кирхгоф считает свет колебаниями эфира. Он продолжал придерживаться этого взгляда и после опубликования работы Максвелла

<sup>74</sup> H. K a u s e r. Handbuch der Spectroscopie, Bd II. Leipzig, 1902. S. 271.

<sup>75</sup> L. B o l t z m a n n. Populäre Schriften. Leipzig, 1905.

<sup>76</sup> G. R. K i r c h h o f f. Untersuchungen über das Sonnenspectrum. Berlin, 1862, S. 15.

<sup>77</sup> G. R. K i r c h h o f f. Ueber das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht. Ostwald's Klassiker, № 100, 1859, S. 12.

Гельмгольцем в его «Физиологической оптике»: он называет абсолютно черным тело, которое не отражает падающего на него света. Очень тонкий слой тела будет отражать очень мало света, однако на основании только этого тело еще не является черным.

Все дальнейшее развитие учения о тепловом излучении показало огромное значение введенного Кирхгофом понятия абсолютно черного тела. Сам Кирхгоф понимал важность сделанного им шага, утверждая, что законы общего значения могут быть получены только для тела такого рода, теоретическое определение которого было дано им при выводе его закона. Физики сначала мало обращали внимания на это замечательное высказывание Кирхгофа. Лишь в конце XIX в. поняли, что абсолютно черное тело является стандартным излучателем: было доказано, что «черное» излучение (термин Тизена) обладает вполне определенным распределением энергии в спектре, совершенно одинаковым у всех абсолютно черных тел.

Кирхгоф указал также на возможность осуществления искусственного абсолютно черного тела, модель которого была осуществлена в 1895 г. Луммером и Принсгеймом.

Взяв за основу свойства излучения абсолютно черного тела, Кирхгоф смог изучить характерные особенности теплового излучения, систематизировать их и строго вывести свой общий закон, относящийся к природе теплового излучения. Без такой идеализации задача была бы гораздо более сложной: ведь свойства излучения различных твердых и жидких тел значительно различаются в зависимости от их природы, состояния поверхности. Кирхгоф подчеркивал, что допущение существования абсолютно черного тела является «существенным вспомогательным средством» доказательства его закона.

Вместе с тем ряд физиков указывали на логические трудности, заключающиеся в понятии абсолютно черного тела. Планк в 1898 г. в примечании к опубликованной им работе Кирхгофа указывает, что еще не дано такое определение абсолютно черного тела, которое можно было бы применить к волнам произвольной длины. «Трудность заключается в том, — пишет Планк, — что падающие на тело волны в общем случае не являются независимыми от самого тела. Кирхгоф в этой работе явно допускает, что длины волн исчезающе малы по отношению к радиусам кривизны всех поверхностей тел»<sup>81</sup>.

<sup>81</sup> Ostwald's Klassiker, № 100, S. 38, Anmerkung № 6. Планк пишет здесь также о том, что «до сих пор (1898 г. — Т. Г.) не удалось дать точное определение абсолютно черного тела, которое могло бы применяться к произвольно длинным волнам». Через год в работе «О необратимых процессах излучения» он указал на целесообразность различения черных тел

Вильгельм Вин в своей классической работе 1894 г. «Температура и энтропия излучения» и затем на первом Международном конгрессе физиков в Париже (1900 г.) в докладе «Теоретические законы излучения» дал следующее определение абсолютно черного излучения: «Можно сказать с полной достоверностью, что не существует тел, вполне черных для всех длин волн. Как указал уже Кирхгоф, излучение, которое мы считаем свойственным черному телу, устанавливается само собой в замкнутой полости, в которой испускаемые лучи не могут распространяться свободно и отражаются внутрь изотермическими стенками. Даже в том случае, когда поглощательная или испускательная способность стенок очень слабая, последовательные отражения заканчиваются полным поглощением каждого пучка лучей, и таким образом удовлетворяются условия, предьявляемые к абсолютно черным телам. Можно, следовательно, определить излучение черного тела как излучение, которое устанавливается само собой в замкнутой полости со стенками, имеющими одинаковую температуру. Всякое излучение другого состава автоматически превращается в излучение черного тела, которое с этого момента не обнаруживает больше никакого изменения. Можно, следовательно, определить излучение черного тела, как *состояние устойчивого равновесия*, соответствующее данной температуре»<sup>82</sup>.

Вин считает, что данное им определение излучения черного тела имеет большие преимущества по сравнению с первоначальным определением Кирхгофа, согласно которому допускается возможность тела, поглощающего *все* падающие на него лучи.

Противоположностью абсолютно черного тела являются предположенные Кирхгофом абсолютно прозрачное и абсолютно отражающее тела. Абсолютно прозрачное тело пропускает все падающие на него лучи в неизменном виде, ничего не поглощая. Абсолютно отражающее тело — совершенное зеркало<sup>83</sup> — отражает без всякого ослабления все падающие лучи и само ничего не излучает. Если бы такое зеркало, отражая все лучи,

---

и черных поверхностей, не отражающих излучения. Кайзер, Принсгейм, Вин и другие физики усматривали также логическую трудность понятия абсолютно черного тела в том, что оно должно поглощать все длины волн от нуля до бесконечности.

<sup>82</sup> Rapports présentés au Congrès Internationale de Physique, t. II. Paris, 1900, p. 24.

<sup>83</sup> Понятие совершенного зеркала были применено еще в 1826 г. Фурье в его работе «Математические законы равновесия лучистой теплоты» (J. B. I. Fourier. Des lois mathématiques de l'équilibre de la chaleur rayonnante. Mém. de l'Acad. roy. de sci., t. 5, 1826, p. 202.).

кроме того, излучало бы само, то оно охлаждалось бы и тем самым нарушало бы тепловое равновесие.

Основываясь на этих предпосылках, Кирхгоф проводит доказательство своего закона. Ход этого второго доказательства Кирхгофа подробно изложен в книге А. Г. Лоренца «Лекции по теоретической физике, ч. I. Теория излучения» (переведенной на русский язык, ОНТИ, 1935), к которой мы и отсылаем читателя.

Доказательство Кирхгофом открытого им закона вызвало много возражений. История дискуссии вокруг доказательства Кирхгофа и анализ различных новых доказательств имеют большой интерес, так как позволяют глубже уяснить логические основы закона. Вопрос этот не освещен в литературе по истории физики, и автор намеревается посвятить этой теме специальную статью.

Универсальная функция Кирхгофа, характеризующая испускательную способность абсолютно черного тела, стала объектом многочисленных теоретических и экспериментальных исследований. В связи с развитием спектрального анализа и применением тепловых источников света задача нахождения аналитического выражения функции Кирхгофа приобретала все большее теоретическое и практическое значение. Замечательна сила научного предвидения Кирхгофа, который писал: «Знание этой функции представляет большой интерес; экспериментальное исследование стоит перед огромными трудностями, но можно надеяться, что эта функция будет определена опытным путем, поскольку она бесспорно имеет простую форму, как все до сих пор известные функции, не зависящие от свойств отдельных тел. Лишь когда будет решена эта задача, обнаружится вся плодотворность доказанного закона»<sup>84</sup>. Однако решить эту задачу в рамках классической физики было невозможно. Лишь 14 декабря 1900 г. М. Планк произвел революцию в физике, открыв закон теплового излучения на основе гипотезы квантов<sup>85</sup>.

<sup>84</sup> Poggendorf Ann., Bd. 109, 1860, S. 292. Как мы видели, сам Кирхгоф относительно вида этой функции сделал лишь предположение о том, что при низких температурах ее значение приближается к 0 для видимых лучей, но отличается от 0 для более длинных волн.

<sup>85</sup> По мере дальнейшего развития квантовой физики закон Кирхгофа получал все более глубокую физическую интерпретацию, и совершенствовалась его математическая формулировка. В 1954 г. Б. Степанов дал математическое выражение закона Кирхгофа, учитывающее обнаруженное в 1917 г. «вынужденное испускание» (Изв. АН Белорусской ССР, 1954). О квантовом понимании закона Кирхгофа см.: Г. Л а н д с б е р г. Оптика. М., 1957, стр. 642; работы С. Фриша «Усп. физ. наук», т. 43, 1951, стр. 529; «Вест. Ленингр. ун-та», т. 8, 1953, стр. 139.