ГУСТАВ РОБЕРТ КИРХГОФ – ОСНОВАТЕЛЬ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА И АСТРОФИЗИКИ

И. Б. Вавилова

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
ул. Академика Заболотного, 27, Киев ГСП 03680
e-mail: irivav@mao.kiev.ua

Статья посвящена истории открытия выдающимися немецкими учеными Г. Р. Кирхгофом и Р. В. Бунзеном метода спектрального анализа и открытия Г. Р. Кирхгофом законов спектроскопии. Эти исследования, выполненные в 1859–1862 годах в Гейдельбергском университете, стали экспериментальной основой для последующего развития естественных наук, прежде всего астрофизики. В статье рассматривается предистория исследований спектра от работ И. Ньютона до работ Й. Фраунгофера, Л. Фуко и В. Свана, как и анализируется дискуссия, развернувшаяся среди современников Г. Кирхгофа о приоритете открытий. Отдельная глава посвящена краткому изложению биографии Г. Кирхгофа и его научной деятельности.

“*Случайные открытия делают только подготовленные умы.*”
Б. Паскаль

Г. Р. КИРХГОФ. “О ФРАУНГОФЕРОВЫХ ЛИНИЯХ”, 1859 г.

“*Совершенно особое значение спектрально-аналитическим методам придает то обстоятельство, что они почти бесконечно раздвигают границы, которых до сих пор достигла химическая характеристика материи.*”
Г. Р. Кирхгоф, Р. В. Бунзен

“В связи с выполненным мною совместно с Бунзеном исследованием спектров окрашенных пламеней, благодаря которому стало возможным определить качественный состав сложных смесей по виду их спектров в пламени паяльной лампы, я сделал некоторые наблюдения, приводящие к неожиданному выводу о происхождении фраунгоферовых линий и позволяющие по ним заключить о вещественном составе атмосферы Солнца и, возможно, также ярких неподвижных звезд. Фраунгофер заметил, что в спектре пламени свечи есть две светлые линии, которые совпадают с двумя темными линиями D солнечного спектра. Точно такие же светлые линии, но еще более яркие, можно получить, если внести в пламя поваренную соль. Я получил солнечный спектр, но при этом солнечные лучи перед тем, как они попадали на щель, проходили через сильное пламя с поваренной солью. Если солнечный свет достаточно ослабить, то на месте обеих темных линий D появляются две светлые; но когда интенсивность света превышает некоторую определенную величину, две темные линии D проявляются с гораздо большей отчетливостью, чем в отсутствии пламени с поваренной солью...” Убедившись в справедливости этого открытия, Кирхгоф, по словам очевидцев, покинул лабораторию со словами “Das scheint mir eine fundamentale Geschichte” (“Тут, кажется, есть что-то фундаментально важное”). На следующий день он открыл эту взаимосвязь, о чем далее писал: “Из этих наблюдений я заключаю, что окрашенные пламена, в спектрах которых наблюдаются светлые резкие линии, так ослабляют проходящие через них лучи того же цвета, что на месте светлых линий появляются темные, если только за пламенем находится источник света достаточно большой интенсивности, в спектре которого эти линии обычно отсутствуют. Я далее заключаю, что темные линии солнечного спектра, не обязанные своим появлением земной атмосфере, возникают из-за присутствия в раскаленной атмосфере Солнца таких веществ, которые в спектре пламени на том же самом месте дают светлые линии. ... Таким образом, исследование спектров окрашенных пламеней приобрело новое и важное значение; совместно с Бунзеном я собираюсь его провести так широко, как только позволяют наши возможности...” [6, 35].

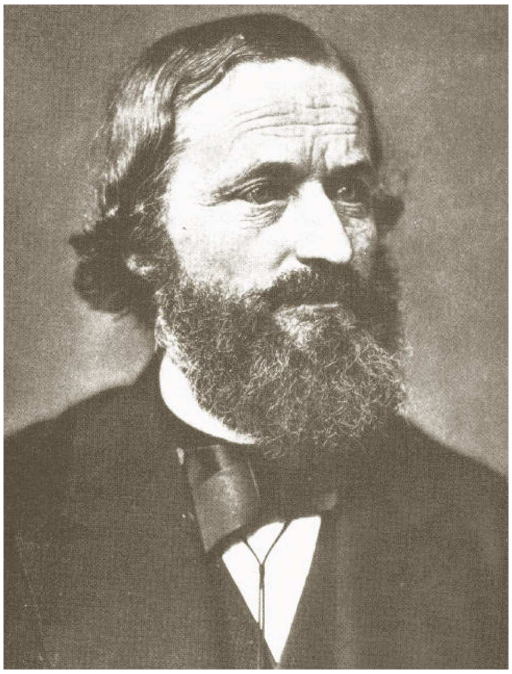


Рис. 1. Густав Роберт Кирхгоф (12 марта 1824 г. – 17 октября 1887 г.) – выдающийся немецкий физик

Рис. 2. Роберт Вильгельм Бунзен (31 марта 1811 г. – 16 августа 1899 г.) – выдающийся немецкий химик

В этой небольшой двухстраничной статье "О фраунгоферовых линиях", вышедшей в октябре 1859 года, Г. Р. Кирхгоф (рис. 1) проанализировал результаты первых исследований по спектральному анализу, предпринятых совместно с Р. В. Бунзеном (рис. 2). Она содержала в себе предварительный итог экспериментов, начатых в 1854 году, предвосхищала успехи дальнейших исследований и содержала сразу четыре открытия:

– каждый элемент имеет собственный линейчатый спектр, а, значит, строго определенный набор спектральных линий;
– спектральные линии можно использовать для анализа химического состава веществ не только на Земле, но и в звездах;
– Солнце состоит "из горячего ядра и сравнительно холодной газовой атмосферы";
– в химическом составе Солнца присутствует натрий.

После выхода в 1860–1861 годах двух работ Кирхгофа и Бунзена по "Химическому анализу посредством наблюдений спектров" [38, 39], а в 1862 году работ Кирхгофа по исследованию спектров Солнца и химических элементов [40, 41], стало очевидным, что в своих экспериментах эти выдающиеся ученые предложили и развили принципиально новый научный метод определения химического состава вещества по его спектру – *спектральный анализ*. Впоследствии этот метод дал мощнейший импульс развитию термодинамики, квантовой механики и химии, спектральному приборостроению. Кроме непосредственного значения для развития естественных наук, эти открытия несли в себе глубокий философский смысл, поскольку впервые было научно обосновано и экспериментально подтверждено, что Земля, Солнце, звезды, человек, фауна и флора состоят из одних и тех же химических элементов.

Был "найден путь определить химический состав солнечной атмосферы, и *этот путь открывает возможность делать некоторые заключения о химическом составе ярких неподвижных звезд*", – предвосхищенно писал в работе "О фраунгоферовых линиях" Кирхгоф, не предполагая, какого могущества достигнет разработанный ими метод. Спектральный анализ и открытые Кирхгофом законы спектроскопии заложили *экспериментальную основу астрофизики как новой области фундаментальных исследований*, результаты которых сегодня воочию демонстрируют уникальность этого метода, позволяющего комплексно анализировать физико-химические свойства объектов Вселенной во всем диапазоне электромагнитных волн.

Это ставит работу Кирхгофа "О фраунгоферовых линиях" 1859 года "в один ряд с основными завоеваниями физики всех времен, – писал известный российский историк науки Л. С. Полак. – Смелость и новизна его выводов тем более велика, что они резко противоречат мнению широко распространенной в то время позитивистской философии Огюста Конта" ([20], С. 365), который в 1842 году в своей работе "Курс позитивистской философии" в качестве примера непознаваемого привёл именно химический состав Солнца и звезд: "Мы понимаем, как определить их форму, расстояния до них, их массу и их движения, но мы никогда не можем ничего узнать об их химическом и минералогическом составе" ([15], книга II, глава I).

Статьей "О фраунгоферовых линиях" и в последующих статьях по спектральному анализу Г. Р. Кирхгоф не только скрупулезно проанализировал и подтвердил результаты Й. Фраунгофера. Сделав решающий шаг в отождествлении линий солнечного спектра, он отдал дань и открытию Фраунгофера, увековечив его имя в астрономической терминологии: и сейчас линии поглощения в спектре Солнца (выделено более тысячи) называются линиями Фраунгофера.

ИЗ ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

"*Талант – умение делать то, чего не могут другие;*
гений – способность разглядеть то, чего другие не видят."

Оценка значимости результатов экспериментов Кирхгофа и Бунзена по спектральному анализу невозможна без акцентирования внимания на двух важных аспектах. Первый из них, исторический, позволяет проследить хронологию исследований спектра, предшествовавших открытию спектрального анализа. Не менее интересный второй аспект, гуманистический (или, другими словами, человеческий фактор), дает возможность понять *неслучайность случайных открытий, которые делают только подготовленные умы*, – т. е. понять гениальность Г. Р. Кирхгофа, сумевшего "открыть" то, что "видели" его предшественники и современники.

Отметим несколько фактов в хронологии предистории открытий Кирхгофа и Бунзена.

Исследование спектров берет свое начало от знаменитых опытов И. Ньютона (1643–1727 гг.), причиной постановки которых стало несовершенство конструкции зрительной трубы-телескопа, впервые в 1610 году примененной Г. Галилеем (1564–1642 гг.) для наблюдений небесных объектов и чуть улучшенной в 1611 году Й. Кеплером (1571–1630 гг.). В 1660-х годах, пытаясь понять природу искажения изображений в зрительной трубе, вызванного хроматической аберрацией, Ньютон в своих опытах со стеклянными призмами (рис. 3) по разложению белого света на лучи разных цветов впервые показал, что *цвет является свойством света, т. е. разные цвета имеют разную степень преломляемости* [18]. Ошибочное заключение, что хроматическая аберрация линз зрительной трубы неустранима, как известно, "привело" И. Ньютона к тому, что в 1668 году он изобрел телескоп-рефлектор. С полным правом Ньютона можно считать изобретателем *первого спектроскопа* (призма с коллиматором, щелью и линзой) и автором *первой спектральной таблицы границ между цветами солнечного света*, составленной им в результате опытов по интерференции света ("кольца Ньютона"). Из-за известной полемики с Р. Гуком (1635–1703 гг.), Ньютон лишь в 1704 году в книге "Оптика" изложил свои многолетние фундаментальные исследования по геометрической оптике, дисперсии, интерференции, дифракции и поляризации света По образному выражению С. И. Вавилова, именно Ньютон превратил "теорию света из бессистемного набора фактов в науку с богатым качественным и количественным содержанием, экспериментально хорошо обоснованным" ([3], глава 8).

Тем не менее, в отличие от работ Ньютона по динамике тел и теории тяготения, вызвавших бурное развитие физики, астрономии и математики, прошло около 100 лет со времени его работы по оптике, когда исследования свойств света, в том числе за границами видимого диапазона электромагнитных волн, вновь заинтересовали ученых.

В 1800 году У. Гершель (1738–1822 гг.), исследуя солнечный спектр при помощи чувствительных термометров, расположенных на специальной установке, за границей красной области спектра обнаружил *тепловой диапазон* (позже названный *инфракрасным*) этого спектра (рис. 4). Он обнаружил тепловые лучи и возле фиолетового конца спектра, но не придал этому явлению значения. Буквально через год, в 1801 году, в опытах по почернению бумаги из хлористого серебра немецкий физик Дж. Риттер (1776–1810 гг.) открыл *ультрафиолетовое излучение* Солнца. Тем самым эти ученые впервые расширили представления о свете за пределы видимой области электромагнитных волн.

Тогда же, в 1801 году, английский физик У. Х. Волластон (1766–1828 гг.), независимо от Риттера, открыл *ультрафиолетовый диапазон* электромагнитного излучения, а в 1802 году, используя идею опытов Ньютона со стеклянными призмами, тщательнее других рассмотрел *солнечный спектр и впервые*

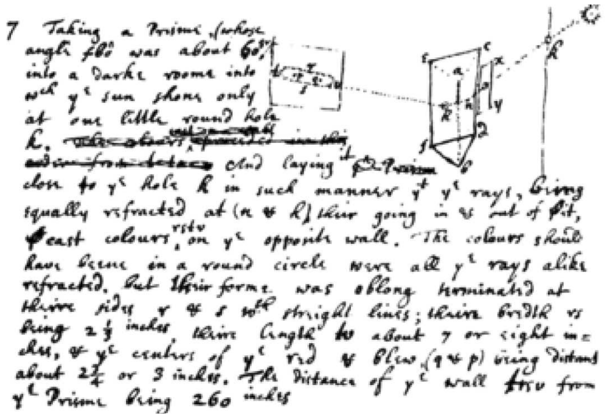


Рис. 3. Фрагмент рукописи “Оптика” И. Ньютона 1704 г.

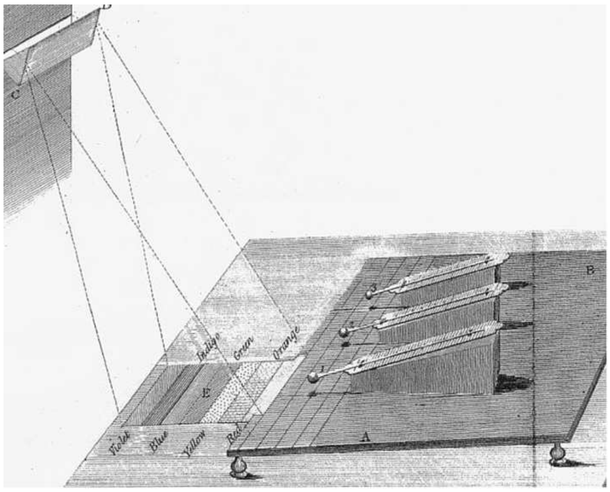


Рис. 4. Установка В. Гершеля, с помощью которой в 1800 году он открыл инфракрасный диапазон электромагнитного спектра [31]

обнаружил в нем 7 линий поглощения (рис. 5), которые без видимого для него порядка пересекали спектр в разных местах, отделяя друг от друга цветные полосы спектра. Волланстон оставил это открытие без объяснения, полагая, что появление темных линий было вызвано особенностями призмы или источника света либо другими побочными причинами [57].

В 1811 году французский астроном Ф. Д. Араго (1786–1853 гг.) использовал построенный им полярископ для изучения поляризации электромагнитного излучения, что привело его к открытию явления *хроматической поляризации света и выводу о газообразном состоянии солнечной атмосферы.*

В 1814–1815 годах немецкий физик и конструктор оптических систем Й. Фраунгофер (1787–1826 гг.), работая над задачей использования спектральных линий в качестве стандартов для определения коэффициента рефракции разных видов оптического стекла, открыл 824 линии поглощения в солнечном спектре. Он не смог объяснить природу этого явления, но дал названия линиям (сильные линии получили буквенные обозначения от A до K, а более слабые были обозначены оставшимися буквами) и указал точное местоположение 574 линий в спектре Солнца (рис. 6). Он также обнаружил, что “положение двойной линии D солнечного спектра близко к положению яркой двойной желтой линии в спектре пламени” [29, 30]. Продолжая исследования темных линий солнечного спектра, он пришел к выводу, что причина их появления лежит не в дифракции света, а в самой природе света. Он нашел, что “спектры Луны и планет содержат те же самые темные линии, что и солнечный свет, тогда как спектры неподвижных звезд отличаются от спектра Солнца”, и предложил спектральную классификацию звезд – синие, красные, “солнечные”. Фраунгофер впервые показал, что “темные линии представляют характерную особенность солнечного света независимо от того, достигает ли он нас непосредственно или уже после отражения от планеты”. Долгое время открытие Фраунгофера не привлекало внимания физиков, – возможно потому, что автора не интересовала математическая сторона вопроса и он не участвовал в дискуссии о природе света. Продолжив эти исследования (после переезда в 1818 году из Бенедиктбейрена в Мюнхен) уже с оптическими решетками, Фраунгофер обнаружил, что в дифракционном спектре темные линии находятся в том же порядке и с той же интенсивностью, что и в призматическом, – это позволило определить ему длины волн цветов намного точнее, чем в работах Юнга и Ньютона, поскольку темные линии служили ему реперными. Математической обработке его наблюдения были подвергнуты М. Швердом (1792–1871 гг.), который изложил свои взгляды на волнообразную природу света в монографии “Явления дифракции, выведенные аналитически из фундаментальных законов волновой теории”, вышедшей в свет в 1835 г. ([16], С. 442–444; [48]). Таким образом, именно Й. Фраунгофер этими работами сделал после Ньютона новый значимый шаг в развитии спектроскопии, подготовив почву для открытия Кирхгофа и Бунзена.

Из важных исследований того времени по исследованию спектров отметим также опыты английских ученых. В 1832–1833 годах шотландский физик Д. Брюстер (1781–1868 гг.) обнаружил, что при приближении Солнца к горизонту в его спектре появляются новые темные линии переменной интенсивности – “атмосферные линии” (позже, в 1862 году, наличие в спектре Солнца линий, вызванных

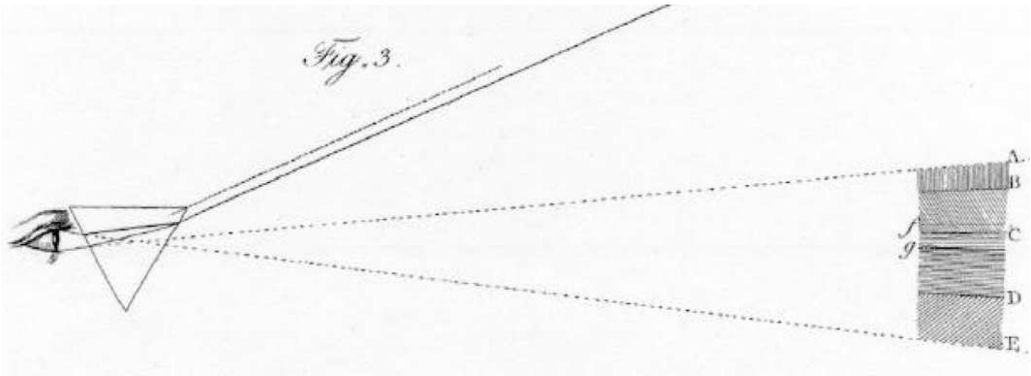


Рис. 5. Призма У. Х. Волластона, с помощью которой в 1801 году он впервые наблюдал линии поглощения в солнечном спектре [57]

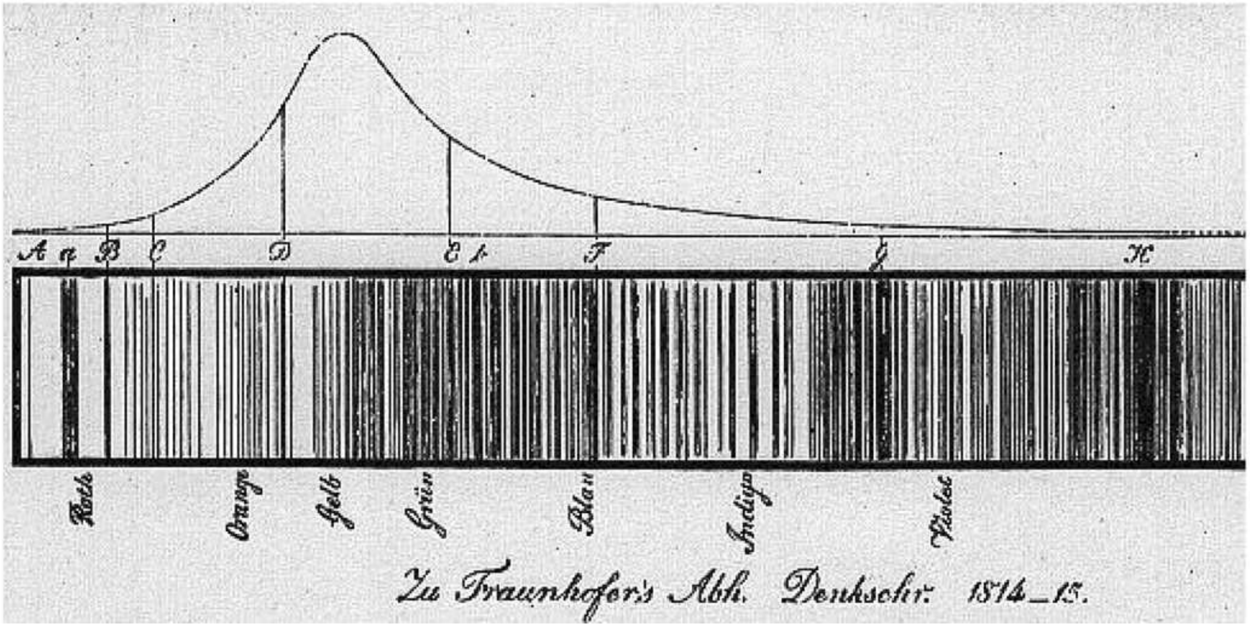


Рис. 6. Спектр Солнца, расшифрованный Й. Фраунгофером в 1814–1815 гг. [30]

поглощением света в земной атмосфере (*теллурические линии*), уже зная результаты экспериментов Кирхгофа и Бунзена, подтвердил французский астроном П. Ж.-С. Жансен (1824–1907 гг.)). В 1834 году после многочисленных опытов с пламенем спирта, в котором были растворены различные соли, Ф. Тальбот (1800–1877 гг.) пришел к выводу, что "*когда в спектре пламени появляются какие-нибудь определенные линии, они характеризуют металл, содержащийся в пламени*". Это доказал в 1842 году Брюстер, который обнаружил в спектре пламени селитры светлые линии на месте фраунгоферовых, указывающие на присутствие калия в солнечном свете [27]. В 1845 году У. А. Миллер (1817–1870 гг.) в развитие опытов Дж. Гершеля исследовал спектр солнечных лучей после их прохождения через различные газы (пары йода, брома) и обнаружил в спектрах темные линии, откуда заключил, что наблюдаемые линии – это линии поглощения, соответствующие только окрашенным, а не бесцветным парам газов. В 1855 году шведскому ученому А. Ангстрему (1814–1874 гг.), спустя 20 лет после того, как Ч. Уитстон (1802–1875 гг.) пришел к выводу, что линии спектра электрической искры зависят лишь от материала электродов и не зависят от газа, в котором проскакивает искра, удалось показать, что, понижая давление газа, можно исключить влияние электродов и получить чистый спектр газа.

Впервые взаимосвязь между линиями поглощения и линиями испускания в 1849 году наблюдал французский ученый Ж.-Б. Л. Фуко (1819–1868 гг.), обнаружив в спектре электрической дуги между угольными электродами многочисленные яркие линии, среди которых выделялась линия D натрия. Пропустив сквозь дугу интенсивный пучок солнечного света, он заметил, что линия D натрия стала темной, и заключил, что дуга, испускающая линию D, поглощает ее, когда излучение исходит из другого источника ([28], см. также ([24]). В 1857 году наблюдения за двойной желтой D-линией провел В. Сван (1828–1914 гг.) и установил, что эта линия в спектре пламени спиртовки возникает в присутствии металла натрия [54]. Как и Брюстер, Фуко и многие другие ученые, Сван не осознал значения этого открытия. Но его исследование 1857 года, безусловно, стало дополнительным аргументом для Кирхгофа и Бунзена незамедлительно применить разрабатываемый ими новый метод химического анализа вещества, в первую очередь, к фраунгоферовой линии натрия.

Предистория исследований спектров свидетельствует: понадобилось около 150 лет (достаточно много с позиции темпов сегодняшнего прогресса науки) от экспериментов Ньютона с призмами до опытов с фраунгоферовой натриевой линией, чтобы именно Г. Р. Кирхгоф с Р. В. Бунзеном сумели совершить решающий шаг – *открыть метод спектрального анализа*.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ Г. Р. КИРХГОФА И Р. В. БУНЗЕНА ПО СПЕКТРАЛЬНОМУ АНАЛИЗУ

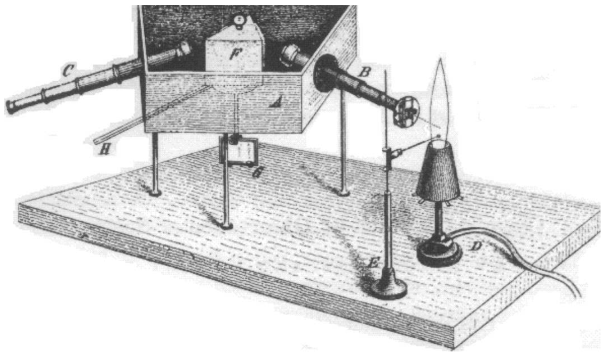
“*Открытие спектрального анализа вызвало восхищение всех людей и возбудило их фантазию в большей мере, чем какое-либо другое открытие, потому что оно позволило заглянуть в миры, представлявшиеся нам совершенно недоступными.*”

Г. Гельмгольц

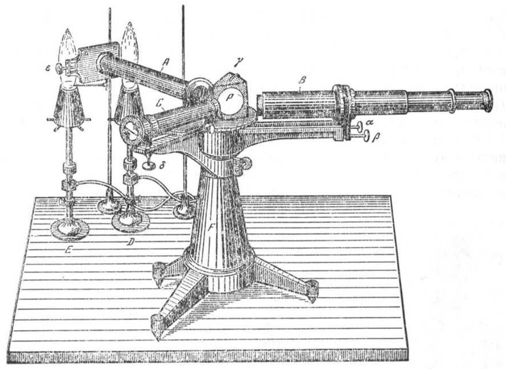
Анализ *специальных исследований Кирхгофа и Бунзена по обоснованию нового метода определения химического состава веществ*, начатых в Гейдельбергском университете в 1854 году, воочию демонстрирует, что они были детально и глубоко продуманы как в вопросах возможной теоретической интерпретации результатов, так и в постановке экспериментов со спектрами окрашенных разными солями пламеней.

“Кирхгоф принадлежал к тому поколению ученых 40–70-х годов XIX ст., когда возникла фигура физика-теоретика, однако еще не отделившаяся полностью от экспериментальных исследований. Г. Гельмгольц, Л. Больцман, Дж. Максвелл, В. Томсон, Г. Кирхгоф, Г. Герц и многие другие разрабатывали основы теоретической физики, создавали методы математической физики и проводили эксперименты, достаточно сложные для их времени и имевшие в большинстве случаев принципиальное значение. Только в следующем поколении физик-теоретик отдалился от реального экспериментирования настолько, что стало необходимым различать физиков-теоретиков и физиков-экспериментаторов” ([20], С. 354). Подтверждением этих слов служит первая часть статьи Кирхгофа “Солнечный спектр” 1862 года [9, 40], в которой он тщательно описывает придуманную им призменную систему и методики измерения расстояний между линиями спектров и построения изображений спектров. Еще более детальным описанием сопровождаются первые эксперименты и результаты по спектральному анализу металлов и их соединений, приведенные в работах Кирхгофа и Бунзена 1860–1861 годов [7, 8, 38, 39], в которых весомая часть принадлежит Р. В. Бунзену, инициировавшему эти работы.

В середине 1850-х годов Бунзен, тогда уже общепризнанный лидер в области получения чистых препаратов химических элементов, проводил опыты по оценке химического состава солей в зависимости от цвета пламени горелки, но вскоре убедился, что разные вещества могут давать схожие по цвету окраски пламени. После переезда в Гейдельберг, Кирхгоф подключился к экспериментам Бунзена со щелочными и щелочноземельными металлами и предложил, что более информативным методом может служить анализ не окраски пламени, а линейчатого спектра испускания этих веществ. В то время было известно четыре способа возбуждения спектров металлов горением вещества – дуга, искра, трубка Гейслера и пламя горелки (их было несколько типов). Они выбрали *бунзеновскую горелку*, в которой газ смешивался с воздухом для получения более эффективного горения и более горячего пламени. “Образец вносили в пламя в виде твердого шарика на платиновой проволочке. Авторы видели недостатки этого способа – появление сплошного спектра, всегда возникающего при нагреве твердых тел, а также невозможность проводить длительные наблюдения. Преимуществом же было то, что образец можно было внести в самую горячую часть пламени. Точность определения положений спектральных линий была невысока. Так, дублет натрия оказался в этой серии опытов одной линией. Более грубая ошибка была допущена при анализе спектра калия, которую Кирхгоф исправил в работе [10, 41]” (см. детальнее в [11], С. 398). Тем не менее, именно выбор бунзеновской горелки, а также уникальные свойства щелочных металлов (низкие потенциалы



а



б

Рис. 7. Спектроскопы Кирхгофа и Бунзена, с помощью которых в 1859–1862 гг. был разработан метод спектрального анализа [38, 39]

возбуждения металлов и легкая термическая диссоциация их галоидных солей) предопределили успех их экспериментов.

Для анализов спектров Кирхгоф и Бунзен сконструировали свой первый призменный спектроскоп, в основных деталях повторявший спектроскоп Свана. Сегодня ученые используют высокотехнологичные компьютерные спектрометры и спектрографы, позволяющие изучать состав любых веществ практически без ошибок. Тем более интересно, как выглядел первый спектроскоп Кирхгофа–Бунзена, благодаря которому были открыты метод спектрального анализа и законы спектроскопии. Он изображен на (рис. 7, *а*): зачерненный изнутри ящик в виде трапеции A покоился на трех ножках; его боковые стенки, расположенные под углом 58°, несли две зрительные трубы B и C; полая стеклянная призма с плоскопараллельными стенками F наполнялась сильно преломляющей (под углом 60°) жидкостью – сернистым углеродом; трубка B на одном конце, обращенном к пламени горелки Бунзена D, была снабжена щелью, а на другом конце – собирательной линзой, делавшей параллельными лучи, идущие от щели; лучи преломлялись призмой, и полученный спектр рассматривался зрительной трубой C с восьмикратным увеличением; несколько ниже места, где ось трубы В проходила через пламя, находился согнутый в маленькую петлю конец очень тонкой платиновой проволоки, поддерживаемый подставкой E; именно на этой петле расплавлялась капля исследуемого, предварительно обезвоженного, хлористого соединения; рукоятка H позволяла поворачивать призму и зеркало G. Благодаря вращению призмы, можно было проводить изображение спектра пламени мимо вертикальной нити зрительной трубы C и совмещать с этой нитью любой участок спектра, каждой точке которого соответствовал сделанный по шкале отсчет. Внимательно изучая спектры различных паров, нагреваемых "в практически бесцветном пламени бунзеновской горелки, Кирхгоф и Бунзен обнаружили, что нагретые пары давали эмиссионный спектр – яркие линии на темном фоне. Характер этих линий зависел от того, какие элементы присутствовали в парах. Каждый элемент имел свою собственную, только ему одному свойственную систему ярких линий, и два разных элемента никогда не показывали одинаковых линий в одинаковых местах спектра." Прежде всего Кирхгоф и Бунзен определили спектры распространенных щелочных и щелочно-земельных металлов (натрия, лития, калия, стронция, кальция, бария), тем самым показав, "что линии спектров, полученных от раскаленных паров различных соединений металлов, можно использовать для самого надежного и самого тонкого химического анализа" [7, 38].

"Совершенно особое значение спектрально-аналитическим методам придает то обстоятельство, – писали Кирхгоф и Бунзен в этой работе, – что они почти бесконечно раздвигают границы, которых до сих пор достигла химическая характеристика материи. Они обещают дать нам драгоценные сведения о распространении и распределении веществ в геологических формациях... Не менее важную роль должен сыграть спектральный анализ в открытии до сих пор неизвестных элементов." Первыми элементами, открытыми Кирхгофом и Бунзеном при помощи спектрального анализа, стали цезий (в 1860 году) и рубидий (в 1861 году), которые они за их цвет назвали древнеримскими обозначениями цветов (caecius – голубой, цвет неба; rubidus – темно-красный, *лат.*), ссылаясь на сочинение "Аттические ночи. II. 26" Геллия Авла, римского писателя II в. н. э. Сырьем для получения синей спектральной линии цезия послужила вода, взятая из минеральных источников Дюркхайма (Бавария), а для темно-красной линии рубидия – минерал лепидолит из Саксонии (см. также популярную статью [17]).

Метод получения, химические характеристики и распространенность ^{55}Cs и ^{37}Rb, исследованных при помощи усовершенствованного спектроскопа (рис. 7, *б*), Кирхгоф и Бунзен изложили в совместной работе 1861 года [8, 39], что стало первым успехом аналитической химии. Отметим, что схема усовершенствованного ними спектроскопа оставалась общепринятой вплоть до 1920-х годов, поскольку в ней реализовалась основная идея анализа спектров того времени – отождествление линий по ориентированию в спектре. Этот спектроскоп содержал несколько принципиальных новшеств: полая призма была заменена на массивную стеклянную; кроме коллиматора и зрительной трубы появилась третья труба, которая на конце, обращенном к призме, имела собирательную линзу, а на другом конце закрывалась стеклянной пластинкой со шкалой делений, позволяющей точно определять положения спектральных линий; впервые появилось и устройство, позволявшее одновременно наблюдать и сравнивать спектры двух источников света. Скорее всего, эта статья, в основном, была написана Бунзеном, как и приоритет открытий цезия и рубидия принадлежал в большей степени ему (возможно поэтому Кирхгоф не включил ее в собрание своих трудов 1882 года). Отметим, что при помощи спектрального анализа уже в 1861 году английский химик В. Крукс открыл таллий, а в 1863 году немецкие химики Ф. Райх и Т. Рихтер – индий.

Анализируя последующие работы Кирхгофа по солнечному спектру, выполненные им на основе метода спектрального анализа, необходимо остановиться на еще одном открытии, которое он сделал в 1859 году.

Под влиянием работ У. Томсона (1824–1907 гг.), Р. Клаузиуса (1822–1888 гг.) и Г. Гельмгольца (1821–1894 гг.) Кирхгоф заинтересовался термодинамикой. И уже в декабре 1959 года на заседании Берлинской академии наук сформулировал открытый им на основе второго начала термодинамики *основной закон равновесного температурного излучения*. Выведенные им фундаментальные законы спектроскопии:

– горячее твердое тело порождает непрерывный спектр;
– газообразное тело порождает линейчатый спектр;
– “для лучей любого рода отношение испускательной способности к поглощательной способности при одной и той же температуре одинаково для всех тел”, т. е. не зависит от природы излучающих тел и является единой для всех тел функцией только длины волны излучения и температуры тела,

он применил к химическому анализу солнечного света и изложил в 1862 г. в работе “Солнечный спектр” [9, 40]. В этой же работе он ввел понятие *абсолютно чёрного тела* и предложил его модель – полость с небольшим отверстием.

Термодинамическое объяснение явления обращения спектральных линий с трудом воспринималось современниками и, отчасти, справедливо. Несмотря на то, что с этой работы[1] берет начало новая область физических знаний – *термодинамика излучения*, выводы, сделанные в ней, носили в себе оттенок *физической интуиции*, как и в доказательствах присутствовал дух недавнего его открытия обращения спектральных линий. Кирхгоф доказал теорему, что испускаемое абсолютно черным телом излучение одинаково для всех черных тел, т. е. представляет собой универсальную функцию длины волны и температуры. К строгому математическому объяснению этих явлений Кирхгоф вернулся лишь в 1880-х годах. До работы Н. Бора 1913 года, предложившего модель атома, закон Кирхгофа служил единственной основой спектрального анализа (см., например, [2, 4, 5, 14, 16, 21, 22, 49]).

Итак, следующей работой, которую предпринял Кирхгоф в начале 1860-х годов, стало основательное исследование спектра Солнца. Для этого он сконструировал сильно рассеивающий спектроскоп с четырьмя флинтглассовыми призмами (рис. 8), изготовленный в оптических мастерских К. А. Штейнгеля. Опираясь на открытые ним законы спектроскопии, Кирхгоф доказал, что на Солнце присутствует значительное количество “земных” элементов [9, 10, 40, 41]. Среди выявленных линий большинство принадлежало металлам (натрий, кальций, литий, барий, железо, никель, etc). Сравнение эмиссионных линий спектров различных газов, полученных в лабораторных условиях, и нескольких тысяч линий поглощения солнечного спектра дало возможность Кирхгофу распознать спектр Солнца (рис. 9).

Эти открытия позволили Кирхгофу по-новому подойти к проблеме физической природы Солнца. Детально рассматривая принятые в то время представления о холодном темном солнечном ядре и раскаленной внешней оболочке и аргументируя их несостоятельность, он предложил *первую научно обоснованную физическую модель Солнца* как раскаленного шара с очень высокой температурой, окруженного менее горячей атмосферой, в которой земные элементы находятся в газообразном состоянии:

[1] В связи с этой статьей необходимо привести биобиблиографическое пояснение. Статья “О взаимосвязи между излучением и поглощением света и тепла”, написанная на основе этого доклада [36], была включена Кирхгофом лишь в 1882 году в подготовленный им том собраний трудов. Но тогда, в январе 1860 года, он подал в печать другую (отредактированную) статью под тем же названием [37] (см. ее перевод [13] и дискуссию о роли этой работы в развитии квантово-механических представлений о природе света в книге Х. Г. Шёпфа “От Кирхгофа до Планка” [23]). И уже эту работу дополнительно доложил как открытие законов спектроскопии на заседании Берлинской академии наук в 1861 году. Переработанный вариант этой статьи, выполненный им в 1862 году, Кирхгоф также включил в собрание трудов 1882 года. Обе статьи [45, 46] составили книжку серии “Классики точных наук”, основанной Б. Оствальдом (см. комментарий в [11], С. 393).

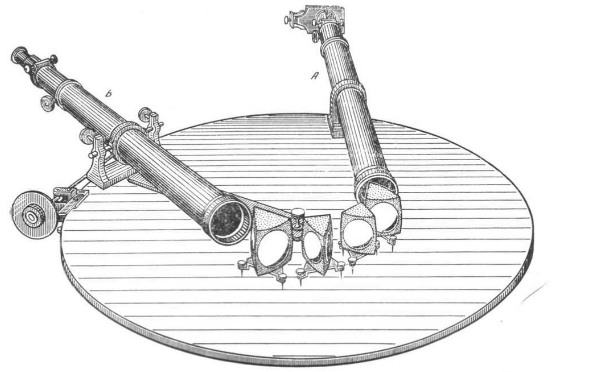


Рис. 8. Спектроскоп Кирхгофа, с помощью которого в 1862 г. был проанализирован спектр Солнца [40]

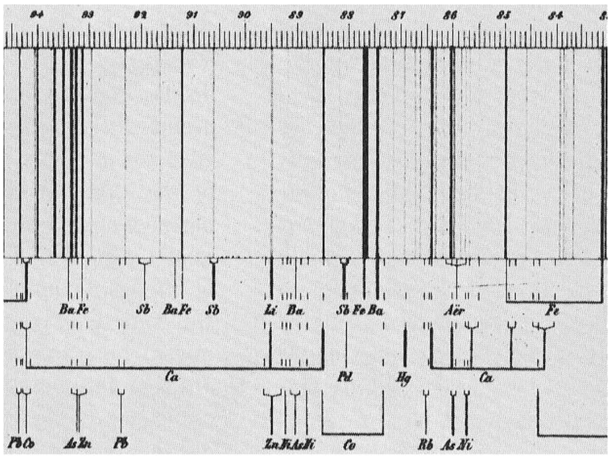


Рис. 9. Фрагмент спектра Солнца, расшифрованного в 1862 г. Кирхгофом [40]

темные линии поглощения солнечного спектра свидетельствуют о поглощении разными элементами в солнечной атмосфере непрерывного спектра, который переизлучается. Эту составляющую атмосферы Солнца (фотосферу) Кирхгоф назвал "обращающимся" слоем, т.е. слоем, в котором и происходит "обращение" линий. Поскольку этот слой испускает непрерывный спектр, в котором присутствуют линии поглощения, Кирхгоф заключил, что его температура ниже, чем в атмосфере, а температурный градиент Солнца увеличивается в направлении к центру. Так же и солнечные пятна, которые он в своей модели сравнивал с "облаками", имеют более низкую температуру в сравнении с окружающими областями [40]. Эту гипотезу Кирхгофа вскоре подтвердила экспедиция Французской академии наук во главе с Жансеном, которая в 1868 году в Индии во время полного солнечного затмения наблюдала обращение спектральных линий Солнца. Заглядывая вперед предложенной Кирхгофом физической модели Солнца, необходимо отметить, что уже в 1870-х годах итальянский астроном А. Секки и французский астроном О. Фай выдвинули гипотезу полностью газового химического состава Солнца, а его непрерывный спектр объяснили "сжатием газа в светящемся теле Солнца".

Как известно, открытие метода спектрального анализа Кирхгофом и Бунзеном и последующие открытия Кирхгофа, применившего этот метод для отождествления спектра солнечной атмосферы, вызвали бурную научную полемику в 1860–1863 годах. Инициатором дискуссии выступил проф. У. Томсон (лорд Кельвин), который подчеркивал, что ряд выводов касательно этих открытий уже были сделаны ранее, в т. ч. Сваном и Миллером.

О глубоких знаниях Кирхгофом работ предшественников по изучению спектров свидетельствует анализ, который он приводит в своих работах. Кроме уже упомянутых в предыдущем разделе работ Фраунгофера, Брюстера, Свана и Араго, он дает оценку работам Дж. Гершеля и В. Ф. Тальбота 1820–1830-х годов по изучению спектров цветных пламен; работе Б. Стюарта по тепловому излучению и поглощению частично теплопрозрачных пластинок. Он приводит имена химиков и термохимиков (Г. Э. Роско, Э. Картмелл, А. Миллер, Ч. Уитстон, Ю. Плюккер, ван дер Виллиген и др.), чьи результаты расчетов различных фотохимических реакций, как и методики получения спектров электрической искры с использованием окрашенных пламеней в газовой горелке, в т. ч. ее модификации, помогли Кирхгофу и Бунзену усовершенствовать метод спектрального анализа.

Более того, ответам на развернувшуюся полемику Кирхгоф в 1863 году посвятил отдельную статью "К истории спектрального анализа и анализа солнечной атмосферы" [42], последнюю из его цикла работ по спектральному анализу. В ней он проявил уникальные качества и как историка науки, – без примеси субъективности, но и с уважением к собственным работам расставив приоритеты в открытиях как своих предшественников, так и современников. "Появление статьи было вызвано достаточно многочисленными попытками, особенно в английской научной литературе, преуменьшить роль Бунзена и Кирхгофа в создании качественного спектрального анализа, а также в установлении Кирхгофом закона теплового излучения и обоснования, таким образом, возможности определить химический состав небесных тел по их спектрам" ([11], С. 398). Важными для объективного понимания, почему именно Г. Р. Кирхгофу принадлежит приоритет открытия спектрального анализа (развитого совместно с Р. В. Бунзеном), которое "висело в воздухе", могут служить следующие выдержки из этой его работы.

О работах В. Свана: “Впервые вопрос о том, обязана ли почти всегда появляющаяся желтая линия исключительно соединениям натрия, удалось решить опытным путем Свану в связи с его классической работой [54] и в совместном сочинении моем и Бунзена [7, 38]... Непосредственной целью обсуждаемой работы (Свана) было сравнение спектров различных углеводородных пламен... Благодаря этой работе, Сван внес весьма ценный вклад в решение многократно выдвигаемого здесь вопроса, *зависят ли светлые линии светящегося газа только от его химического состава*; но он не ответил на вопрос во всей его общности и со всей определенностью; он его даже не поставил; он хотел ограничить свое исследование спектрами углеводородов; при этом он был вынужден исследовать желтую линию вследствие очень частого ее появления также и в этих спектрах. *По-видимому, до Бунзена и меня никто этот вопрос ясно себе не представлял; ответить на него было важнейшей целью нашей совместной работы; благодаря опытам, видоизменявшимся самым разнообразным образом и в большей части новым, мы пришли к выводу, явившемуся основным условием для создания химического анализа посредством наблюдения спектров*.”

Отстаивая свой приоритет в работах по анализу солнечной атмосферы, Кирхгоф полемизирует с Ангстремом и Стоксом: “Сущность развитой мной теории химии Солнца составляет утверждение, которое, выраженное кратко, гласит: *для всякого рода лучей (тепловых или световых) отношение излучательной способности к поглощательной способности для всех тел при одинаковой температуре одинаково.* Из этого утверждения легко следует, что раскаленное тело, испускающее только световые лучи некоторой длины волны, также и поглощает только световые лучи той же длины волны, отсюда получается, каким образом по темным линиям солнечного спектра можно определить состав солнечной атмосферы” ([12], С. 109). Ангстрем в своей работе 1853 года [26] отмечал, что “в накаленном состоянии тело должно излучать именно все те виды лучей, которое оно при обычной температуре поглощает”. Сделав совершенно правильный вывод (впоследствии практически такими же словами сформулированный Кирхгофом), Ангстрем в объяснениях увлекся понятием разницы состояния упругости накаленного тела и состояния, в котором определяется поглощательная способность тела, и соответственно привлек для этого популярные в то время механические представления о колебательных движениях тел, воспринимаемых средой в некоторой гармонической последовательности. Это дало право Кирхгофу справедливо заключить, что “утверждение, являющееся основой химического анализа солнечной атмосферы, Ангстрем предчувствовал, но, конечно, только неопределенно”, как и заметить, что выводы Ангстрема “лежат в основе той мысли, которой позднее при обсуждении моей первой публикации об обращении спектров пламен (“О фраунгоферовых линиях”) Стокс придал правильное направление” [53] (*авт.* – в этой работе Стокс сравнил поглощение пламенем тех лучей, которое оно испускает, с собственными резонансами тела, способного звучать).

Вывод Кирхгофа был незамедлительным: “Теория резонанса и теория возникновения и поглощения световых и тепловых лучей до сих пор слишком мало разработаны, чтобы с их помощью в настоящее время можно было доказать выводы Стокса”. Отвечая на письмо У. Томсона о приоритете Стокса ([11], С. 113–114), он справедливо аргументирует: “...много лет назад Стокс в разговоре высказал идею, что, по-видимому, по темным линиям солнечного спектра можно было бы заключить о химических свойствах солнечной атмосферы. То, что эта идея верна, ... – это впервые было доказано моими теоретическими исследованиями и опытами, поставленными частично мною совместно с Бунзеном, частично одним мною; и именно поэтому ранее (на промежутке времени в 10 лет) никем ничего касающегося высказанной Стоксом идеи опубликовано не было.”

Наиболее близко к открытию спектрального анализа, по мнению самого Г. Р. Кигхгофа, подошел Ж.-Б. Л. Фуко (1819–1868 гг.), французский физик и астроном. В 1849 году Фуко наблюдал обращение натриевой фраунгоферовой линии, но, тем не менее, очень расплывчато объяснил как ее существование, так и ее применение для анализа химического состава Солнца и звезд [28]. Во время развернувшейся вокруг приоритета открытия метода спектрального анализа полемики Фуко признал, что для открытия спектрального анализ его опытам не хватило последнего решающего шага. Почему такой выдающийся физик как “Фуко не имел смелости сделать в отчетливой форме окончательный вывод, остается до сих пор психологической загадкой” ([20], С. 365).

Открытие спектрального анализа и с его помощью новых химических элементов, как и распознавание спектра фраунгоферовых линий произвели колоссальное впечатление на современников. За этими открытиями последовал всплеск работ по аналитической химии и химии Солнца, физике газов, жидкостей и твердого тела. Известный химик Г. Роско, в то время сотрудник Бунзена, вспоминал [52]: “Я никогда не забуду то изумление, которое я испытал, когда в задней комнате старого Физического института я посмотрел в установленный там спектроскоп Кирхгофа и увидел совпадение ярких линий спектра железа с темными фраунгоферовыми линиями солнечного спектра. *Осознание, что наше земное железо присутствует также в солнечной атмосфере, напрашивалось принудительно само собой*.”

КРАТКИЙ ОЧЕРК ЖИЗНИ И НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ Г. Р. КИРХГОФА

"В жизни Кирхгофа не было ничего выдающегося,
что соответствовало бы необычности его гения.
Его жизнь была обычной жизнью немецкого профессора университета.
Великие события происходили исключительно в его голове."

Л. Больцман

Густав Роберт Кирхгоф (Gustav Robert Kirchhoff) родился 12 марта 1824 года в Восточной Пруссии, в г. Кенингсберге (сейчас – г. Калининград, Российская Федерация), в семье советника юстиции Фредерика Кирхгофа и Джоанны Генриетты Виттке. Густав был их младшим сыном, живым и общительным мальчиком, небольшого роста и с тонкими чертами лица. Патриотические традиции служения государству и интеллектуальные ценности, сложившиеся в семье, бурный подъем развития науки в Германии – все это предопределило академическое будущее Густава. Родители желали научной карьеры для сына, тем более, что уже в детстве Густав проявлял прекрасные способности к занятиям точными науками.

После успешного окончания Кляйнгорской гимназии, Густав Кирхгоф в 1842 году поступил на физико-математический факультет Кенигсбергского университета, где в то время преподавали Нейман, Якоби, Бессель, Гаусс, Ришело. Безусловным авторитетом для него стал проф. Ф. Нейман, – он воспитал в Кирхгофе высокую культуру знаний в области математической физики и распознал в нем талант глубокого исследователя. Под руководством Неймана в 1845 году Кирхгоф выполнил свою первую научную работу о прохождении электричества через пластинки [32], и, продолжая заниматься в развитие законов Ома исследованиями по электростатике, в 1845–1847 годах открыл закономерности протекания тока в разветвлённых цепях [33, 34]. В 1847 году он защитил эти исследования (сейчас известные как "правила Кирхгофа") как дипломную работу и получил свою первую ученую степень. Забегая вперед в хронологии событий в жизни Кирхгофа, отметим, что продолжением его студенческих работ по электричеству стали впоследствии исследование 1849 года по индукции токов, где он показал тождественность электроскопической силы электрическому потенциалу, исследование 1853 года по индуцированному магнетизму, а также работа 1857 года, в которой Кирхгоф изложил свои взгляды на распространение переменного тока по проводам и совпадение скорости распространения электрических волн в проводе со скоростью света в воздухе, результаты которой во многом предвосхитили идеи Дж. Максвелла.

Революционные события, прокатившееся в 1848 году по Европе, не позволили Кирхгофу уехать на стажировку во Францию, но не помешали защитить диссертацию в Берлинском университете, получить там должность приват-доцента и начать успешную научную карьеру. Успех его первых работ по электричеству не прошел незамеченным, – в 1848 году Кирхгоф стал членом молодежного Берлинского физического общества, что дало ему возможность познакомиться ближе с выдающимися физиками Г. Гельмгольцем и Р. Клаузиусом, а также В. Сименсом, известным новатором в области приборостроения. В Берлине Кирхгоф выполнил свои первые теоретические работы по теории упругости, в т. ч. им была дана общая теория равновесия и колебаний тонкой упругой мембраны.

Благодаря протекции профессоров Магнуса и Якоби, в 1850 году Кирхгоф был приглашен экстраординарным профессором физики в Университет г. Бреславля (ныне Вроцлав, Польша), где ему удалось решить одну из интересных задач матфизики по деформации эластичных пластинок, сформулированную Пуассоном и Навье. В 1851 году в Бреслау из Марбурга приехал Роберт Вильгельм Бунзен (1811–1899 гг.), – с этого времени между учеными завязалась большая личная и научная дружба.

Роберт Вильгельм Бунзен (Bunsen) (31 марта 1811 г., Гёттинген, – 16 августа 1899 г., Гейдельберг), немецкий химик, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (1862 г.). В 1831 году окончил Гёттингенский университет, посвятив докторскую диссертацию разработке новых измерительных приборов. С 1838 года – профессор университета в Марбурге, в 1852–1889 годах – в Гейдельберге. Занимался экспериментальными исследованиями, главным образом в области неорганической, аналитической и физической химии. Первой крупной работой Бунзена в 1837–1843 годах стало исследование ряда органических соединений мышьяка. Результатом этой трудной и опасной работы (при взрыве в лаборатории он потерял глаз и тяжело отравился) стало получение Бунзеном производных сложного радикала какодила (диметиларсин), что считались веским доводом в пользу правоты теории радикалов. В Марбурге он занимался исследованиями в области электрохимии, а также изучением реакций в газовых смесях, в т. ч. в 1846 году проводил минералогические и геохимические исследования в Исландии, изучая деятельность гейзеров. Изобретя в 1841 году угольно-цинковый гальванический элемент, он получил в 1852 году с его помощью металлический магний, а в 1854–1855 годах – литий, кальций, стронций и барий путём электролиза их расплавленных хлоридов. Исследуя в 1838 и 1845 гг.

процессы выплавки чугуна в доменных печах и состав доменных газов, Бунзен разработал точные методы газового анализа, описанные им в труде "Газометрические методы" (1857 г.). "Одним анализом, однако, не исчерпывалась его научная работа. Он сделал много крупных открытий и изобрел немало ценнейших приборов. Но, как говорил один из друзей Бунзена, самым большим его открытием было "открытие" Густава Кирхгофа" [17].

В 1852 году Бунзен принял приглашение возглавить химическую лабораторию в Гейдельбергском университете и, уехав, начал хлопотать о переводе Кирхгофа в Гейдельберг. Такая возможность появилась в 1854 году после того, как с уходом Ж. Жолли освободилась должность профессора физики. Говоря о неслучайности случайных событий в жизни, отметим, что Кирхгоф охотно принял решение переехать в Гейдельберг, отказавшись от приглашений на должность профессора Боннского университета на место Ю. Плюккера и Берлинского университета на место Г. Магнуса. "Теперь оба ученых были уже неразлучны всю жизнь. Почти ежедневно они совершали длительные прогулки по холмистым окрестностям Гейдельберга, вдвоем или еще с кем-нибудь из местных профессоров. Во время этих прогулок Кирхгоф и Бунзен подробно рассказывали друг другу о своих экспериментах и научных работах" [17]. В это время Бунзен был поглощен исследованиями изменения цвета химических элементов при нагревании, используя подкрашенные стеклянные пластинки. И Кирхгоф, вовлеченный в дискуссии с Бунзеном, заинтересовался идеями исследований цвета света, преломленного сквозь стеклянную призму.

Через пять лет работы в Гейдельбергском университете, в 1859 году, исследования Кирхгофа и Бунзена привели к открытию спектрального анализа и открытию Кирхгофом законов спектроскопии, принесшие ему всемирную славу. В это время Кирхгофу было всего лишь 35 лет. Что помогало ему совершать гениальные открытия? На наш взгляд это:

– блестящая университетская подготовка в математической физике;
– способность ума переключаться на, казалось бы, отдаленные друг от друга области исследования;
– высокая научная эрудиция, истоки которой и в преподавательской деятельности, и в интеллектуальном круге общения с выдающимися учеными;
– будучи теоретиком, он до педантичности дорожил деталями экспериментов.

Определенным прологом к последующей научной деятельности Кирхгофа может служить его работа "О цели естествознания" [43], написанная им 22 ноября 1865 году в виде доклада как проректора Гейдельбергского университета. В ней он приводит рассуждения о роли основных физический понятий (механическая сила, электрическая сила, сила тяготения, теплота, движение материи, etc.): "...необходимо признать, что о состоянии, в котором находится материя, так же как и о силах, действующих между ее частицами, в настоящее время мы обладаем очень малыми знаниями. Наше понимание явлений природы, даже тех, которые происходят в мире неорганических веществ, до сих пор очень несовершенно. В еще большей степени это справедливо для более сложных процессов, имеющих место в растениях и в теле животных. И здесь, и там настоящее понимание не может быть достигнуто до тех пор, пока не удастся все свести к механике. Полностью эта цель естествознания не будет достигнута никогда." Несмотря на определенный агностицизм высказывания в духе механистической философской доктрины своего времени, Кирхгоф, тем не менее, оканчивает доклад словами: "Но уже сам факт, что цель поставлена, дает некоторое удовлетворение, а в приближении к ней заключается наивысшее наслаждение, которое может дать изучение явлений природы" ([11], С. 344).

Переезд в Гейдельберг ознаменовался и важным изменением в личной жизни Густава Кирхгофа, – в 1857 году он женился на Кларе Ришело, дочери профессора Ришело из Кенигсбергского университета, младшей его на 14 лет. Впоследствии у них родились трое сыновей и две дочери. Но 1860-е годы привнесли испытания в личную жизнь Г. Кирхгофа. В 1863 г. он попал в аварию, в результате которой всю оставшуюся жизнь ходил с палочкой, а в последние годы жизни передвигался на коляске. После скоропостижной смерти жены в 1969 году, оставшись один с малолетними детьми, он писал своему другу П. Дюбуа-Реймону: "Я имел в жизни много незаслуженного счастья, теперь ко мне пришло несчастье: я хочу отвлечься научными занятиями, но работа удается плохо. Нож, которым я хочу резать, тупой..." В 1872 г. Кирхгоф женился вторично на Луизе Броммель, работавшей в глазной клинике в Гейдельберге.

В 1860-х годах с переездом Г. Гельмгольца и Л. Кенигсбергера в Гейдельберге начала формироваться школа математической физики с традициями, сформировавшимися еще в Кенигсбергском университете (рис. 10). В 1863 году в новом здании университета для лаборатории и семинаров Кирхгофа было отведено большое помещение, а сам он "с головой ушел" в преподавательскую работу. Среди его учеников были выдающиеся впоследствии математики и физики: А. Г. Столетов, А. Шустер, М. Лауэ, К. Пирсон и М. Планк. В лаборатории Кирхгофа работали также российские ученые В. И. Боргсман и Н. А. Умов, его лекции слушали Дж. Гиббс и С. Ковалевская. "Кирхгоф, по общему мнению современников, исключительно удачно сочетал при подготовке молодых ученых теоретические лекции с самостоятельными экспериментальными работами, причем студенты производили и всестороннюю математическую обработку опытных данных. Это справедливо рассматривалось им как лучшая форма подготовки к самостоятельной научной работе” ([20], С. 355). Участники семинара “знакомились с классическими методами физических измерений. Результаты всех работающих сравнивались между собой и с результатами, уже принятыми в науке. Темами для работ служили, например, измерения длины волны света или теплоты, выделяющейся при растворении соли.” Его лекциями восхищался Больцман: “Тогдашние теоретические и экспериментальные лекции Кирхгофа отовсюду привлекали учеников, для которых он был не только почитаемым учителем, вдохновлявшим на научный поиск, но и отзывчивым другом. Он читал спокойно, ясно, тщательно, не произнося лишних слов и ничего не оставляя недосказанным” [2]. Столетов писал: “Простота обращения и неутомимая внимательность в отношении к учащимся, постоянная деятельность и самообладание мысли, дар сжатой, но отчетливой речи, – вот что поражало нас в Кирхгофе. Во всем сказывается сильная воля, чувство долга, высокое и чуждое высокомерия самолюбие” [21]. В то же время “сухими и однообразными”, “отработанными рукописями” характеризовали лекции Кирхгофа Планк и Клейн, возможно потому, что стремление “свести описание физических явлений только к механике ограничивали физическую картину, рисуемую Кирхгофом” ([20], С. 355). Пример тому, – отклоняя содержание диссертации Планка, Кирхгоф заметил, что “понятие энтропии, величина которой может быть измерена, а потому и определена только посредством обратимого процесса, не должно применяться к необратимому процессу” ([19], С. 433). Тем не менее, в автобиографии Планк отметил, что, благодаря своему учителю, он значительно расширил свой научный кругозор, а после отъезда Кирхгофа в Берлин в 1875 году возглавил кафедру теоретической физики.

20 лет Кирхгоф проработал в Гейдельбергском университете. За эти годы, кроме работ по спектральному анализу и термодинамике излучения, он опубликовал несколько фундаментальных работ по теоретической электростатике, теории теплоты, диффузии газов и течению жидкости, физической оптике и теории упругости. Большую часть исследований этого периода Кирхгоф обобщил в 1882–1883 годах в своих “избранных трудах”. Выдающиеся исследования Г. Р. Кирхгофа были отмечены вручением ему Золотой медали Б. Румфорда Лондонского королевского общества (1862 г.), избранием членом-корреспондентом (1861 г.) и действительным членом (1870 г.) Берлинской академии наук, членом-корреспондентом Петербургской академии наук (1863 г.) и Парижской академии наук (1870 г.) (см. письма-поддержки, написанные Вейерштрассом, Куммером, Кронекером, Энке, Якоби, Ленцем, Магнусом и др., в приложениях [11]).

К середине 1870-х годов научная активность Гейдельберга понемногу угасла, переместившись в Берлин. Туда решил уехать и Кирхгоф в 1875 году, – отклонив приглашение возглавить Потсдамскую

Рис. 10. Г. Р. Кирхгоф и Р. В. Бунзен, 1860-е годы

обсерваторию, он стал заведующим кафедры теоретической физики, впервые созданной в Берлинском университете. Из-за пошатнувшегося здоровья (затруднения в ходьбе и болезнь глаз) Кирхгоф прекратил экспериментальные работы, перестал читать лекции, отказался от ректорства и с 1876 года полностью сосредоточился на теоретических работах в области математической физики. Свой последний семинарий в Берлинском университете он провел зимой 1885–1886 гг. Г. Р. Кирхгоф работал до последних дней жизни. Он умер 17 октября 1887 года, похоронен на кладбище St Matthäus Kirchhof в Берлине.

Наиболее известными работами Кирхгофа этого периода стали фундаментальный четырехтомник "Лекции по математической физике" (1876–1894 гг.), сыгравший в дальнейшем большую роль в развитии теоретической физики (первый том – "Лекции по механике" [44], содержавший решения задач теорий упругости и течения жидкости, выдержал многочисленные переиздания на разных языках), а также избранные труды "Gesammelte Abhandlungen" [47] (1882 г.; дополненные в 1891 г., "Collected Essays"), подводившие своеобразный итог его открытиям, экспериментальным и теоретическим работам. Отредактированные автором, эти работы монографического характера в течение нескольких десятилетий служили источником глубоких знаний для физиков, математиков, астрономов, как и не утратили своей ценности и сегодня. Л. Розенфельд писал: "Во время расширяющихся горизонтов науки возникла необходимость упорядочивания и логического анализа появившихся новых знаний. Среди выдающихся физиков XIX столетия таким ученым был Кирхгоф, чей темперамент наиболее соответствовал таким задачам. Во всей своей деятельности он придерживался ясности и точности количественных результатов экспериментов, используя прямые и упреждающие подходы, как и простые идеи. Его стиль мысли заметен как в работах, которые имели незамедлительное применение (законы электрических цепей), так и в тех, которые предопределяли широкое использование результатов (метод спектрального анализа). Влияние Кирхгофа как педагога на развитие классической теоретической физики было значительным и способствовало лидирующим позициям университетов Германии в развитии науки" [50].

В 1990 году немецкая рабочая группа по прикладной спектроскопии (German Working Group of Applied Spectroscopy, DASp) установила премию для молодых ученых "за выдающиеся достижения по аналитической химии" имени Г. Р. Кирхгофа и Р. В. Бунзена. В 2002 году Институту физики Гейдельбергского университета присвоено имя Г. Р. Кирхгофа.

ПОСЛЕСЛОВИЕ К ОТКРЫТИЮ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Физики шутят: "Что горит на Солнце?": "Немецкие физики Роберт Бунзен и Густав Кирхгоф известны своими открытиями в области спектроскопии. Они занимали соседние лаборатории в здании физического факультета Гейдельбергского университета. Однажды вечером они увидели зарево пожара за Рейном, в Мангейме. Направив на огонь объектив спектроскопа, учёные смогли определить, что в горящей массе присутствуют барий и стронций (горела фабрика красок). Через некоторое время у Бунзена возникла идея: если мы сумели определить, что горит в Мангейме, в нескольких километрах от лаборатории, то почему бы не направить спектрометр на Солнце? Так родилась новая область астрономии."

Метод спектрального анализа продемонстрировал свою мощь уже в XIX столетии, – напомним наиболее выдающиеся работы. На его основе, помимо цезия и рубидия, были открыты химические элементы таллий, галлий, индий и гелий. Стремительное развитие спектроскопия и ее приложения нашли в астрофизических задачах, в первую очередь, в исследовании физики Солнца. Уже в 1862 году Ангстрем идентифицировал и подтвердил существование линий поглощения водорода в спектре Солнца (только в 1920-х годах стало очевидным, что водород – главный элемент химического состава Солнца). Одним из первых, кто оценил открытия Кирхгофа, был английский аматор астрономии У. Хьюггинс (1824–1910 гг.), который при помощи сконструированного им 8-дюймового телескопа, оснащенного спектроскопом, провел наблюдения звездных спектров. В 1863 году он показал, что самые яркие звезды имеют схожую с Солнцем природу, поскольку их излучение также исходит от вещества недр звезды, которое поглощается в более высоких слоях атмосферы. 4 марта 1866 года английский аматор астрономии Н. Локьер (1836–1920 гг.) доложил о своём детальном спектроскопическом исследовании фотосферы Солнца. Он отметил, что линии поглощения спектра солнечных пятен свидетельствуют об уменьшении общего испускания света, оставаясь при этом и множественными, и сильными по сравнению с фраунгоферовым спектром, что доказывало более низкую температуру солнечных пятен по сравнению с фотосферой. А уже 7 августа 1869 года Локьер открыл в солнечном спектре новый элемент – гелий. В 1869 году Ангстрем опубликовал таблицы длин волн 1000 линий т. н. нормального солнечного спектра, предложив для реализации своей идеи новую меру измерений – 10^{-10} м. Вокулер писал: "Инициативу Ангстрема по созданию такого атласа поддержал один из известных американских аматоров астрономии, в то время профессор физиологии, химии и физики Нью-Йоркского университета ... Г. Дрепер (1837–1882 гг.) и В. Эйбни в Англии". Так, Эйбни опубликовал 5 декабря 1879 года первую карту солнечного спектра в ИК-диапазоне, а в 1886 году Ленгли издал карту теплового спектра на 5 микронах. Фундаментальный атлас солнечного спектра в масштабе 3 мм/Å, подводивший итог исследования солнечного спектра в конце XIX столетия, был опубликован американским физиком Г. Роулендом (1848–1901 гг.) в 1888 году. Этот атлас стал основой знаменитых таблиц Роуленда – стандартов солнечного спектра на много десятилетий вперед. Последующее развитие спектроскопии Солнца тесно связано, прежде всего, с атомной физикой, в т. ч. уже в 1890 году Дж. Ридберг опубликовал свою формулу для атомных спектров. К 1890 году уже были известны 34 химические элемента, присутствующие на Солнце, но пропорции их содержания в фотосфере и хромосфере еще оставались неизвестными.

Начало астрофизических (спектральных) исследований в университетских обсерваториях на территории современной Украины было достаточно пассивным. Это было обусловлено, прежде всего, спецификой исследований, направленных на развитие астрометрической тематики, так и проблемами переоснащения телескопов спектрографами. К тому же, в 1870–1880-х годах астрофизика, как и астроспектроскопия, еще не получила должного признания в астрономическом обществе. Значительная роль в становлении астрофизических исследований в Российской империи в 1880–1890-х годах принадлежит Ф. А. Бредихину (1831–1904 гг.), возглавившему в 1890 г. Пулковскую обсерваторию и способствовавшему оснащению астрофизическими инструментами обсерваторий юга Российской империи. События Первой мировой и Гражданской войн 1914–1920 годов привели к падению Российской империи, созданию СССР и соответственно существенной реорганизации деятельности научных, в т. ч. астрономических, учреждений, как и основанию Всеукраинской академии наук в 1918 году [51, 55]. В этой связи проанализируем хронологию наиболее важных спектральных исследований, выполненных в обсерваториях Одессы, Харькова и Львова, а также в Симеизской обсерватории в 1880–1950-х годах.

Пионерские спектральные исследования были выполнены в Астрономической обсерватории Новороссийского университета в Одессе, благодаря деятельности А. К. Кононовича (1850–1910 гг.), одного из первых астрофизиков в Российской империи, заведующего кафедры астрономии и директора обсерватории в 1881–1910 годах. Именно А. К. Кононовичу удалось воплотить в жизнь рекомендации О. Л. Струве (1819–1905 гг.), инициировавшего строительство обсерватории в Одессе для проведения астрофизических наблюдений с использованием преимуществ южного неба [1]. Активные усилия А. К. Кононовича ознаменовались приобретением ряда астрономических приборов, в т. ч. протуберанц-спектроскопа. В 1880 г. механик обсерватории И. А. Тимченко построил по заказу Н. Н. Донича (1874–1956(?) гг.) первый в Российской империи спектрогелиограф. При помощи этого прибора Н. Н. Донич организовал постоянные исследования активности Солнца, получил снимки протуберанцев и солнечной поверхности. Систематические спектральные исследования на новом спектроскопе, смонтированном на 160-мм рефракторе Кука, были проведены в 1892–1897 гг. Оригинальные работы были выполнены учениками Кононовича – А. Р. Орбинским (1869–1928 гг.) и А. П. Ганским (1870–1908 гг.). А. Р. Орбинский занимался спектральными исследованиями звезд и солнечных протуберанцев. В 1895 году он предложил один из первых методов определения лучевых скоростей звезд по спектрограммам, полученным с помощью призменной объективной камеры. Этот метод был апробирован Г. К. Фогелем в Потсдамской обсерватории, а в 1918 г. использован Г. А. Тиховым для определения смещения ярких полос в спектре Новой Орла 1918 года. Отметим, что, благодаря успешным астрометрическим работам А. Р. Орбинского, в 1899 году было показано, что в Одессе можно проводить высокоточные наблюдения небесных объектов до -30° по склонению (точность наблюдений в Одессе значительно превышала точности в Пулковской обсерватории; вероятная погрешность одного наблюдения Солнца составляла $+0.37''$ за весь год; только за один год было получено наблюдений Солнца в 7 раз больше, чем в Пулково). Результатами исследований А. П. Ганского по физике Солнца стали открытие зависимости формы солнечной короны от фазы периодического пятнообразования, подтверждение вращательного движения солнечных пятен, а также определения средней продолжительности отдельных гранул на поверхности Солнца (2–3 мин). Развитие астрофизических исследований в обсерватории продолжилось с приходом А. Я. Орлова (1880–1954 гг.) в 1912 году на должность директора. Так, один из учеников А. Я. Орлова, В. С. Жардецкий (1896–1962 гг.), в 1917 г. защитил дипломную работу по исследованию спектра переменной звезды η Орла. Приоритетное значение астрофизические исследования приобрели в 1930-х годах с переездом в Одессу К. Д. Покровского (1868–1944 гг.), руководившего обсерваторией в 1934–1944 годах. Так, для развития спектральных исследований звездных атмосфер были утверждены первые темы диссертаций по спектрофотометрии Солнца (К. Я. Горяистов) и звезд (А. М. Шульберг).

В дальнейшем, после 1945 года, астрофизические исследования в Астрономической обсерватории Одесского университета получили свое мощнейшее развитие в работах В. П. Цесевича и его учеников, прежде всего Н. С. Комарова и его учеников, а также учеников А. М. Шульберга, прежде всего В. Г. Каретникова и его учеников. Тем самым началось формирование *научной школы А. К. Покровского – В. П. Цесевича* по исследованию переменных звезд. Совокупный вклад, внесенный представителями этой школы в развитие современной астрофизики, сегодня общепризнан и высоко оценен мировым научным сообществом.

Симеизская обсерватория в Крыму, основанная промышленником-меценатом и любителем астрономии Н. С. Мальцовым, в 1908 году была им подарена Пулковской обсерватории (директорство Симеизской обсерваторией было поручено А. П. Ганскому). Отсутствие необходимых инструментов не давало возможности проводить спектральные исследования Солнца, звезд и галактик. С переездом Г. А. Шайна (1892–1956 гг.) в Симеиз в 1925 году в обсерватории был установлен 1-м рефлектор, изготовленный английской фирмой "Греб и Парсонс" (в то время это был один из самых больших телескопов в Европе). С его помощью Г. А. Шайн и В. А. Альбицкий (1891–1952 гг.) начали спектральные наблюдения небесных тел. Среди выдающихся достижений в астрофизике в 1930-х годах особое место занимает открытие Г. А. Шайном совместно с О. Л. Струве (1897–1963 гг.) существования вращения звезд в Галактике. Спектральные исследования Солнца в Симеизской обсерватории начались после создания в 1932 году общесоюзной Службы Солнца. С этой целью был установлен гелиограф Дальмейера, на котором велось ежедневное фотографирование Солнца. При этом обработка снимков, измерения координат и площадей солнечных пятен и факелов производилась в Пулково, где на основе симеизских снимков и данных других обсерваторий строились карты солнечной активности. С 1938 г., когда в обсерватории появился спектрогелиоскоп Гейла (производства американской фирмы Гоуэл–Шербен), в работе Службы Солнца в Симеизе стали постоянно использоваться и спектрогелиоскопические наблюдения.

Во время войны Симеизская обсерватория была разрушена, а оборудование (в т. ч. 1-м рефлектор) вывезено в Германию. Создание Крымской астрофизической обсерватории в п. Научный требовало не только строительства новой инфраструктуры, но и приобретения новых астрофизических инструментов. Г. А. Шайн (директор до 1952 г.) не только руководил созданием обсерватории, но и очертил круг научных задач для развития астрофизических исследований. Они касались изучения движения звезд в Галактике, происхождения звезд и галактик, физики Солнца и тел в Солнечной системе. В этих исследованиях принимали участие не только сотрудники обсерватории, – благодаря хорошим астроклиматическим условиям, введению в эксплуатацию нового 2.6-м зеркального телескопа и других современных инструментов, Крымская астрофизическая обсерватория, как и Симеизская, стали "астрономической Меккой" в СССР и в мире. Особенного развития получили и солнечные исследования: уже в 1947 году в Симеизе возобновил работу спектрогелиоскоп, в 1949 году под руководством А. Б. Северного был сконструирован спектрогелиограф со спектрорегистратором лучевых скоростей, а в 1954 году введен в эксплуатацию Башенный солнечный телескоп (БСТ-1), открывший широкие возможности исследований Солнца. Если сегодня оперировать статистикой выдающихся открытий в астрофизике и физике Солнца, выполненных в отдельно взятой обсерватории, то Крымская астрофизическая обсерватория занимает лидирующее место, благодаря исследованиям Г. А. Шайна и его сотрудников, представителей *научных школ С. Б. Пикельънера* (1921–1975 гг.), прежде всего Р. Е. Гершберга и его учеников, *Э. Р. Мустеля* (1911–1988 гг.), прежде всего А. А. Боярчука и его учеников, *А. Б. Северного* (1913–1987 гг.), прежде всего С. И. Гопасюка, Н. Н. Степанян, В. А. Котова, Т. Т. Цапа и их учеников, *В. Б. Никонова* (1905–1987 гг.) и его учеников, а также соратников и последователей, среди которых Н. А. Козырев, И. С. Шкловский, В. К. Прокофьев и др.

Отметим еще несколько важных фактов в хронологии становления спектральных исследований в Украине. В начале 1930-х годов в Астрономической обсерватории и на кафедре астрономии Харьковского университета под руководством Н. П. Барабашова (1894–1971 гг.) была начата работа по изготовлению спектрогелиоскопа (совместно с Государственным оптическим институтом АН СССР) для ежедневных наблюдений хромосферы Солнца. Спектрогелиоскоп был введен в действие в 1935 году и стал первым инструментом такого типа, изготовленным в СССР. В 1949 году в Астрономической обсерватории Львовского университета под руководством В. Е. Степанова (1913–1986 гг.) был построен первый в СССР вертикальный солнечный телескоп, оснащенный спектрографом двойного прохождения. Первые спектральные исследования Солнца, звезд и галактик в радиодиапазоне связаны с введением в строй в 1960–1966 годах радиотелескопа РТ-22 (см- и мм-диапазоны длин волн) КрАО в п. Кацивели. В 1950–1960-х годах под руководством С. Я. Брауде (1911–2003 гг.) в с. Граково под Харьковом был построен и в 1972 году введен в эксплуатацию крупнейший в мире радиотелескоп УТР-2 для исследований небесных тел и особенностей их спектров в декаметровом диапазоне длин волн, а уже в 1980-х годах с помощью УТР-2 в Радиоастрономическом институте АН УССР А. А. Коноваленко были открыты уникальные рекомбинационные спектральные линии углерода и натрия в межзвездной среде [56].

Необозрим круг применения спектрального анализа в сегодняшней науке и технике, как и многосторонен, – число этих анализов во всех диапазонах электромагнитного спектра, в т. ч. диапазонах, открытых в XX столетии (радио-, рентгеновский, гамма-) исчисляется миллиардами, а объем – миллионами терабайт информации.

[1] *Артеменко Т. Г., Балишев М. А., Вавилова І. Б.* Династія Струве в історії астрономії України // Кинематика и физика небесн. тел. – 2009. – **25**, № 3. – С. 211–233.

[2] *Больцман Л.* Густав Роберт Кирхгоф // Статьи и речи. – М.: Наука, 1970.

[3] *Вавилов С. И.* Исаак Ньютон.– 2-е доп. изд. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1945. – 688 с.

[4] *Горнштейн Т. Н.* Густав Роберт Кирхгоф и его исследования по тепловому излучению // Труды Института истории естествознания и техники. – 1960. – **34**. – С. 110–156.

[5] *Еремеева А. И.* Густав Роберт Кирхгоф / Выдающиеся физики мира. – М.: Наука, 1956. – С. 231–236.

[6] *Кирхгоф Г. Р.* О фраунгоферовых линиях // Густав Роберт Кирхгоф. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – С. 52–53.

[7] *Кирхгоф Г. Р., Бунзен Р. В.* Химический анализ посредством наблюдений спектров. I // Густав Роберт Кирхгоф. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – С. 53–71.

[8] *Кирхгоф Г. Р., Бунзен Р. В.* Химический анализ посредством наблюдений спектров. II // Густав Роберт Кирхгоф. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – С. 71–81.

[9] *Кирхгоф Г. Р.* Солнечный спектр // Густав Роберт Кирхгоф. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – С. 81–101.

[10] *Кирхгоф Г. Р.* Исследование солнечного спектра и спектров химических элементов // Густав Роберт Кирхгоф. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – С. 102–104.

[11] *Кирхгоф Г. Р.* Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – 430 с.

[12] *Кирхгоф Г. Р.* К истории спектрального анализа и анализа солнечной атмосферы // Густав Роберт Кирхгоф. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – С. 105–114.

[13] *Кирхгоф Г. Р.* Об отношении между испускательной и поглощательной способностями тел для тепла и света // Шёпф Х. Г. От Кирхгофа до Планка.– М.: Мир, 1981. – С. 125–143.

[14] *Климишин І. А.* Історія астрономії. – Івано-Франківськ: ІФТКДІ, 2000. – 652 с.

[15] *Конт О.* Курс позитивной философии // Родоначальники позитивизма. – СПб., 1912. – Вып. 4–5.

[16] *Лакур П., Аппель Я.* Историческая физика. – М.-Л.: Гостехиздат, 1929. – Т. 1 (см. http://books.mathtree.ru/lakur1/index_expo_r.html?448).

[17] *Нечаев И.* Рассказы об элементах. – http://www.dutum.narod.ru.

[18] *Ньютон И.* Новая теория света и цветов // Успехи физических наук. – 1927. – Вып. 7, № 2. – С. 123–134.

[19] *Планк М.* К истории открытия кванта действия. Избр. труды. – М.: Наука, 1975.

[20] *Полак Л. С.* Густав Роберт Кирхгоф // Густав Роберт Кирхгоф. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – С. 351–392.

[21] *Столетов А. Г.* Г. Р. Кирхгоф // Столетов А. Г. Собрание сочинений. – Т. 2. – М.-Л.: Гостехиздат, 1941. – С. 31–52.

[22] *Храмов Ю. А.* История физики. – К.: Феникс, 2006. – 1176 с.

[23] *Шёпф Х. Г.* От Кирхгофа до Планка. – М.: Мир. – 1981. – 192 с.

[24] *Шпольский Э. В.* Столетие спектрального анализа // Успехи физических наук. – 1959. – **69**, вып. 4. – С. 657–678.

[25] *Agassi J.* The Kirchhoff–Planck radiation law // Science. – 1967. – **156**. – N 3771. – P. 30–37.

[26] *Angstrom A.* // Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff). – 1853. – Bd. 94. – S. 144–150.

[27] *Brewster D.* On luminous lines in certain flames corresponding to the defective lines in the sun's light // Report 11th Meeting Brit. Ass. Advanced Sci. – 1842. – Part 2. – P. 15–16.

[28] *Foucault L.* Note sur la lumiere de l'arc voltaique // Proces-verbaux Soc. Philomatique. – 1849. – P. 16–20.

[29] *Fraunhofer J.* Bestimmung des Brechungs und Farbzersteuungs Vermogen verschidener Glassorten in Bezug auf die Vervolkommung achromatischer Fernröhre // Denkschriften der München Akademie der Wissenschaften. – 1814–1815. – P. 193–226.

[30] *Fraunhofer J.* Bestimmung des Brechungs und Farbzersteuungs Vermogen verschidener Glassorten in Bezug auf die Vervolkommung achromatischer Fernröhre // Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff). – 1817. – Bd. 56. – S. 264–313.

[31] *Herschel W.* Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1800. – **90**. – P. 284–292.

[32] *Kirchhoff G. R.* Über der Durchgang eines electrischen stromes durch eine Ebene, insbesondere durch eine kreisformige // Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff).– 1845. – Bd. 64. – S. 497–514.

[33] *Kirchhoff G. R.* Über der Durchgang eines electrischen stromes durch eine Ebene, insbesondere durch eine kreisformige // Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff).– 1846. – Bd. 67. – S. 344–349.

[34] *Kirchhoff G. R.* Über die Auflosung der Gleichungen, auf welche man bei der Untersuchung der linearen Vertheilung galvanischer Strome gefurt wird // Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff).– 1847. – Bd. 71. – S. 498–508.

[35] *Kirchhoff G. R.* Über die Fraunhofer'schen Linien // Monatsberichte der Königlichen Preussische Akademie des Wissenschaften zu Berlin. – 1859. Oct. – S. 662–665; Idem. // Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff). – 1860. – Bd. 109. – S. 148–150; Idem. // Ges. Abh. Leipzig. – 1882. – S. 564–566; On the chemical analysis of the solar atmosphere // Chem. News. – 1861. – **3**. – P. 115–116.

[36] *Kirchhoff G. R.* Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht and Wärme // Monatsberichte der Königlichen Preussische Akademie des Wissenschaften zu Berlin. – 1859. Dez. – S. 783–787.

[37] *Kirchhoff G. R.* Über das Verhaltniss swischen dem Emissionsvermogen und dem Absorptionsvermogen der Korper fur Wärme und Licht // Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff). – 1860. – Bd. 109. – P. 275–301.

[38] *Kirchhoff G., Bunsen R.* Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. I // Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff). – 1860. – Bd. 110. – S. 160–189.

[39] *Kirchhoff G., Bunsen R.* Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. II // Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff). – 1861. – Bd. 113. – S. 337–381.

[40] *Kirchhoff G. R.* Das Sonnenspectrum. – Berlin: V. Dummler's Verlagsbuchhandlung, 1862. – S. 1–21.

[41] *Kirchhoff G. R.* Untersuchungen über das Sonnenspectrum und die Spectren der chemischen Elemente // Abhandl. Akad. Wiss. Berlin. – 1862. Zweiter. Theil. Berlin. – 1863. – S. 227–240.

[42] *Kirchhoff G.* Zur Geschichte der Spectral-Analyse und der Analyse der SonnenAtmosphare // Annalen der Physik und der Chemie (Poggendorff). – 1863. – Bd. 118. – S. 94–111.

[43] *Kirchhoff G.* Über das Ziel der Naturwissenschaften. – Heidelberg, 1865. – 32 s.

[44] *Kirchhoff G.* Mechanics. – Vorlesungen über mathematische Physik. – Leipzig, 1876. – Bd. 1; 2. Aufl. Leipzig. – 1876. – 466 s. (см. перевод: Механика. Лекции по математической физике. – М.: Изд. АН СССР, 1962.)

[45] *Kirchhoff G.* Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht and Wärme // Ges. Abhandl. – Leipzig, 1882. – S. 566–571.

[46] *Kirchhoff G.* Über das Verhaltniss swischen dem Emissionsvermogen und dem Absorptionsvermogen der Korper fur Wärme und Licht // Ges. Abhandl. – Leipzig, 1882. – S. 571–592.

[47] *Kirchhoff G.* Gesammelte Abhandlungen. – Leipzig, 1882. – 641 s.

[48] *Meadows A. J.* Early Solar Physics. – Pergamon, 1970.

[49] *Meadows A. J.* The Origins of Astrophysics // In: The General History of Astronomy / Ed. O. Gingerich. – Cambridge University Press, 1984. – **4A**. – P. 3–15.

[50] *O'Connor J. J., Robertson E. F.* Gustav Kirchhoff. – MacTutor History of Mathematics archive // www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Kirchhoff.html.

[51] *Pavlenko Ya. V., Vavilova I. B., Kostiuk T.* Astronomy in Ukraine // Organizations and Strategies in Astronomy. – Springer-Verlag, 2006. – **7**. – P. 121–146.

[52] *Roscoe H.* Ein Leben der Arbeit Erinnerungen. – Leipzig, 1919. – S. 57.

[53] *Stokes G. G.* – Phil. Mag. – 1860. – Vol. 20.

[54] *Swan W.* On the prizmatics spectra of the flames of the compounds of carbon and hydrogen // Trans. Roy. Soc. Edinburgh. – 1857. – **21**. – P. 411–430.

[55] *Vavilova I. B., Yatskiv Ya. S.* Astronomy in Ukraine: overview of the situation and strategic planning for 2004–2011 // Кинематика и физика небесн. тел. – 2003. – **19**. № 6. – С. 569–573.

[56] *Vavilova I. B., Konovalenko A. A., Megn A. V.* The beginnings of decameter radio astronomy: pioneering works of Semen Ya. Braude and his followers in Ukraine // Astron. Nachr. – 2007. – **328**. – P. 420–425.

[57] *Wollaston W. H.* A method of examining refractive and dispersive powers by prismatic Reflection // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1802. – **92**. – P. 365–381.