УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

из истории физики

530.14:539.12

РИДБЕРГ И РАЗВИТИЕ АТОМНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

(К столетию работы И. Р. Ридберга о закономерностях в атомных спектрах)

М. А. Ельяшевич, Н. Г. Кемеровская, Л. М. Томильчик

(Белорусский государственный университет им. В. И. Ленина, Институт физики АН БССР, Минск)

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	141
2. Работы Ридберга и завершение первоначального этапа развития атомной спектроскопии	144
3. Ридберг и квантовая теория Бора	156
4. Заключение	161
Примечания к тексту	163
Список литературы	163

1. Введение. Имя Ридберга носит одна из важнейших спектроскопических констант, в современный научный обиход прочно вошли такие
термины как комбинационный принцип Ридберга—Ритца, ридберговские состояния атомов и молекул. Источник происхождения соответствующих понятий — классическая статья выдающегося шведского ученого
Йоханеса Роберта Ридберга «Исследования о строении спектров испускания химических элементов» [1], опубликованная ровно 100 лет назад, в 1890 г. Эта работа занимает особое место как в истории спектроскопии, так и в научном наследии самого ученого.

Творческий путь Ридберга весьма неординарен. Начав с попыток дать математическое описание периодичности физических свойств элементов, он затем полностью переключается на исследование атомных спектров, результатом чего явилось открытие к 1890 г. основных спектральных закономерностей. После получения фундаментальных результатов по атомной спектроскопии, суммированных им в 1900 г. в докладе на международном физическом конгрессе в Париже [2], Ридберг навсегда оставляет проблему оптических спектров и вновь обращается к исследованию вопросов периодичности [3].

Выдающийся вклад Ридберга в развитие атомной спектроскопии и в исследование периодического закона отмечался неоднократно, в том числе Н. Бором и В. Паули в 1954 г. в связи со столетним юбилеем ученого [4]. Так, Бор в своем выступлении говорил о Ридберге: «Я хотел бы особо подчеркнуть прямую преемственность между его замечательными открытиями и развитием наших представлений о строении атома... Как известно, открытие Ридбергом спектроскопических закономерностей явилось результатом большого интереса, проявлявшегося им к проблеме взаимоотношений, существующих между химическими элементами, ко-

торая во второй половине прошлого века была выдвинута на передний план прежде всего работами Менделеева. Замечательная периодичность физических и химических свойств элементов, расположенных в порядке возрастания их атомных весов, поразила пытливое воображение Ридберга. Склонный к численным расчетам, он особенно «заинтересовался оптическими спектрами» ([5], с. 470).

Нетривиальный характер связи между обоими основными направлениями научной деятельности Ридберга отметил и Паули: «Не все знают, что к занятиям спектральными линиями Ридберга привел интерес к периодической системе элементов — интерес, который не оставлял его всю жизнь» ([б], с. 233).

Чрезвычайно интересна та оценка, которую давал первому этапу деятельности Ридберга Менделеев еще в 1886—1887 гг. «Ридберг занимался многими сторонами периодического закона, составляющего текущий вопрос химического мировоззрения, а потому заслуживает внимания. Ридберг вошел в новую сторону при рассмотрении периодической зависимости свойств от атомного веса, а именно он остановился на самих величинах атомного веса... Не раз были попытки войти в эти подробности, но первая наиболее рациональная и заслуживающая внимания есть попытка Ридберга» ([7], с. 486).

Описанию жизненного и творческого пути Ридберга, его научной деятельности посвящена достаточно обширная литература [8—13].

Йоханес Роберт Ридберг родился 8 ноября 1854 г. в Хальмштаде (Швеция). После окончания гимназии в 1873 г. он поступил в Лундский университет, который окончил в 1875 г., получив степень бакалавра философии. Его первые научные работы носили чисто математический характер: «Об алгебраических интегралах алгебраических функций» (1878), «Конструкция конических сечений в 3-х и 4-х точечном контакте» (1879, докторская диссертация). В 1879 г. он получает степень доктора математики, с 1880 г. занимает должность доцента математики и вскоре выполняет работу по физике «Изучение фрикционного электричества» (1882). Период 1882—1887 гг., когда Ридберг состоял ассистентом Института физики при Лундском университете, оказался плодотворным в его научной деятельности. В этот период его работы посвящены исследованию функциональной зависимости физических и химических свойств элементов от атомного веса: «О периодической системе химических элементов» (1885), «Валентность и атомный вес» (1885), «Законы величин атомных весов» (1886). Затем последовал цикл работ по изучению спектров элементов, в том числе и классическая работа «Исследования о строении спектров испускания химических элементов» (1890) [1] и «Распределение спектральных линий» (1900) [2]. С 1897 г. Ридберг экстраординарный, а с 1901 г. — ординарный профессор физики Лундского университета, занимал этот пост вплоть до своей отставки в 1919 г. Он был избран членом Шведской Академии наук, а также иностранным членом Лондонского королевского общества. Умер Ридберг 28 декабря 1919г.

Взгляды Ридберга на проблему периодической системы эволюционизировали от рассмотрения атомного веса в качестве главного параметра, от которого зависят свойства элементов, до «порядковых чисел», т. е. номера элемента в таблице Менделеева. Кульминацией стали работы «Электрон—первый элемент» (1906) [3], «Исследования системы элементов» (1913), «Ординалы элементов и высокочастотные спектры» (1914).

Ридбергу принадлежит всего около сорока тематически довольно разнообразных публикаций. В основном его научные интересы были сконцентрированы в двух областях, тесно связанных с периодической системой: первая из них—изучение свойств элементов в зависимости от

атомного веса (позднее—от «порядковых чисел»), вторая—исследование оптических спектров элементов. Вместе с тем, среди его публикаций имеются и такие, которые посвящены асимметрии вогнутой решетки Роуланда (1893), определению дисперсии воздуха (1893), устройству трубки Крукса (1896), определению периодических ошибок (1896), теории комет (1896), движению спутников планеты Уран (1898), теории гравитации (1904) и даже вопросам возраста долгожителей (1891).

Многогранность личности И. Ридберга как в научном, так и в чисто человеческом плане неоднократно отмечалась его современниками. Так, преемник Ридберга на посту директора Физического института при Лундском университете М. Зигбан писал: «Его меняющиеся интересы и живой интеллект часто выражались в стимулирующих комбинациях мысли. Он интерпретировал ежедневный психологический опыт в свете физических законов и явлений в популярных лекциях, вызывающих оживленные дискуссии. Эта игра интеллекта занимала его как разновидность умственной гимнастики и удовлетворяла потребность разрядить свою фантазию. В своих исследованиях он был очень критичен и не останавливался, пока не добивался определенных результатов. Превосходное владение Ридбергом необычайно обширной и трудной для понимания массой наблюдений может рассматриваться как мера его сил и оказывается лучшим возможным доказательством способности синтезировать и анализировать детали» ([8], с. 217).

Любопытная деталь содержится в воспоминаниях Г. Борелиуса, который отмечал, что Ридберг «был в свое время, возможно, единственным, кто брал в библиотеке Лунда книги на китайском языке» ([10], с. 69).

Характеризуя научную деятельность Ридберга, следует подчеркнуть, что реальная степень влияния его работ на развитие квантовой физики, истинный теоретический статус установленных им спектральных закономерностей, как и подлинный масштаб его фигуры как ученого, еще не оценены в полной мере.

Прежде всего остается недостаточно осознанной важность того обстоятельства, что решающий шаг к созданию теории Бора — формулировка условия частот — оказался возможным в первую очередь благодаря тому, что к этому времени обширная совокупность спектроскопических опытных данных была систематизирована на основе комбинационного принципа. Благодаря использованию этого принципа Бор смог остановить связь между квантовыми энергетическими состояниями атомов и спектральными термами. В то же время именно введение спектральных термов по праву считается одной из главных научных заслуг Ридберга.

Значение вклада Ридберга в установление общих спектральных закономерностей несомненно стало очевидным для Бора с самого начала его знакомства с атомной спектроскопией. Чтобы убедиться в этом, достаточно привести высказывания Бора, сделанные непосредственно «по горячим следам». Так, уже в первой части своей «трилогии» Бор ссылается на работу Ритца 1908 г. следующим образом: «По теории Ридберга, обобщенной Ритцом, частота, соответствующая линии какоголибо элемента, может быть представлена выражением $v=F_{\nu}(\tau_1)-F_{\nu}(\tau_2)$, где τ_1 и τ_2 —целые числа, а F_1 , F_2 , F_3 ... — функции τ вида $k/(\tau + \alpha_1)^2$, $K/(\tau + \alpha_1)^2$, ..., K—универсальная постоянная» ([14], с. 93). Более развернутая оценка ситуации содержится в статье Бора «О спектре водорода»: «Как известно, открытие Бальмера привело к открытию линейчатых спектров других элементов. Наиболее важные работы в этой области выполнены Ридбергом (1890) и Ритцом (1908) ... Ридберг доказал уже в первой своей работе, что между постоянными различных спектральных серий того же элемента имеются простые соотношения. Эти законы

были обобщены Ритцом в так называемом комбинационном принципе» ([15], с. 152—153). Тем самым Бор подчеркивает пионерский характер и высокий теоретический статус исследований Ридберга. Представляется несомненной также и та эвристическая роль, которую сыграли остановленные Ридбергом и Ритцом основные спектральные закономерности при формулировке исходных положений концепции Бора. Достаточно сослаться на широко известную и часто цитируемою в литературе (см. работу Л. Розенфельда ([16], с. 163)) фразу Бора: «Как только я увидел формулу Бальмера, мне все сразу же стало ясно». В то же время, достоверно известно, что вплоть до первых чисел февраля 1913 г. Бор в своих исследованиях совершенно не затрагивал вопроса об атомных спектрах. Это вполне однозначно вытекает из содержания переписки Бора, относящейся к данному периоду. Так, в письме Резерфорду от 31 января 1913 г. Бор отмечает, что он не занимается вычислением частот в видимом спектре. Непосредственных упоминаний о теории линейчатых спектров нет и в письме Бора Хевеши от 7 февраля 1913 г. Тем не менее уже 6 марта 1913 г. Резерфорду посылается весьма обширная по объему первая часть «трилогии», содержащая по существу в законченном виде изложение первоначальной теории Бора.

Разумеется, это оказалось практически осуществимым лишь благодаря тому, что в распоряжении Бора к этому времени уже имелся, хотя и не завершенный, но все же достаточно разработанный эскиз теории, подготовленный к ассимиляции установленных к данному времени спектральных закономерностей. В связи с этим нам представляется, что для современной историко-методологической литературы, посвященной генезису квантовой теории, характерна некоторая недооценка того значения, которое имела та предварительная, «неоптическая», стадия ее равработки, в ходе которой было дано обоснование механической устойчивости атома Резерфорда в основном состоянии и по существу сформировалось представление о стационарных состояниях.

Наше дальнейшее изложение строится следующим образом. Вначале дан анализ исследований Ридберга по атомной спектроскопии, которые привели к открытию комбинационного принципа. Затем рассмотрена предварительная, без учета излучательных процессов, стадия формирования квантовой концепции Бора, в результате которой были созданы теоретические основы для формулировки постулата о стационарных состояниях, и оказался возможным переход к модели излучающего атома, для которой имеет место условие частот.

2. Работы Ридберга и завершение первоначального этапа развития атомной спектроскопии. В той или иной форме идея о наличии связи между оптическими спектрами вещества и его внутренним строением неоднократно высказывалась в XIX в. рядом исследователей.

Еще в 1834 г. английский физик Ф. Тальбот, обнаружив желтую линию в спектре пламени фитиля, смоченного поваренной солью, и красную линию при наличии соли стронция, сделал в весьма осторожной форме следующее утверждение: «Можно ожидать, что оптические исследования бросят однажды новый свет на химию», заметив при этом, что «оптический анализ дает возможность различать малейшие количества вещества с такой же точностью, как любой из известных способов» ([17], с.114).

Спустя 25 лет появилась пионерская работа Г. Кирхгофа «О фраунгоферовых линиях», впервые наметившая возможности спектрального анализа, связанные с наличием корреляции спектр — состав. Эту, ставшую впоследствии знаменитой, статью Кирхгоф начал словами: «В связи с выполненным мною совместно с Р. Бунзеном исследованием спектров цветных пламен оказалось возможным судить о качественном со-

ставе сложных смесей по виду их спектра» (см. ст. 4 в [18], с. 52). Открытие (в 1860—1861 гг.) новых элементов—рубидия и цезия— Бунзеном и Кирхгофом (см. ст. 6 в [18]) было практическим свидетельством в пользу того, насколько велики возможности спектрального анализа для определения химического состава вещества. Заметим, что после того, как в результате применения спектрального анализа были достигнуты значительные успехи в химических исследованиях, А. Мичерлих в 1864 г. [19] на основе качественного сопоставления различных спектров высказал мысль о том, что спектроскопия должна рассматриваться не только как метод химического анализа, но и как ключ к тайнам внутреннего строения атомов и молекул ([20], с. 71). В 1869 г. Е. Маскар [21] отметил, что наблюдаемая мультиплетная структура линий натрия (дублет) и магния (триплет) едва ли является случайным эффектом и высказал предположение о том, что «эти группы похожих линий являются гармониками, связанными с молекулярным строением излучающего газа» ([1],с.4).

Тем самым впервые было обращено внимание на существование определенных количественных соотношений между длинами волн ряда линий спектра одного и того же элемента.

С еще большей определенностью высказался в этом смысле Дж. Стони. Так, в работе [22], основанной на измерениях длин волн в спектре водорода, выполненных А. Ангстремом [23], он подчеркнул, что «линии в спектрах газов должны быть связаны с периодическими движениями внутри отдельной молекулы, а не с беспорядочными движениями молекул относительно друг друга» ([20], с. 72). Пытаясь найти математическое обоснование своим представлениям, Стони обнаружил следующую закономерность для спектральных линий водорода H_{α} (λ_{α} =6562,8Å), H_{β} (λ_{β} =4861,3Å), H_{δ} (λ_{δ} =4101,7Å) (для первой, второй и четвертой линий спектральной серии водорода):

$$\frac{1}{\lambda_{\alpha}}: \frac{1}{\lambda_{\beta}}: \frac{1}{\lambda_{\delta}} = 20: 27: 32, \tag{1}$$

предварительно введя (впервые в истории спектроскопии) шкалу волновых чисел [24]. Сам Стони истолковал полученные результаты как свидетельство в пользу того, что эти линии представляют собой обертоны некоторой основной частоты. Как известно, в 1885 г. Бальмер открыл свою знаменитую общую формулу для линий данной серии (получившей впоследствии его имя)

$$\lambda = \frac{Am^2}{m^2 - 2^2} \qquad (m = 3, 4, 5, 6, ...), \tag{2}$$

где A — постоянная. Из формулы (2) соотношение (1) получается как частный случай при m=3, 4, 6. Впоследствии Ридберг писал: «...заслуга этого открытия частично принадлежит Стони..., который оставил для Бальмера найти связь между этими линиями и линией $H_{\gamma}(\lambda_{\gamma}=4340,5~\text{Å})$, после чего можно утверждать, что серия продолжается в точности в ультрафиолетовой области спектра» ([I], с. 7).

Значительное место в истории спектроскопии занимают работы П. Лекока де Буабодрана [25—28], который фактически предложил первую модельную теорию происхождения спектральных линий, экспериментальным изучением которых он давно занимался. Указав на значимость этих работ, Ридберг писал, что Лекок де Буабодран «является несомненно первым, кто увидел некоторую связь между различными спектрами, так как, изучая снимки Бунзена и Кирхгофа для спектров, он обнаружил эту связь с исключительной точностью: "Спектральные линии щелочных (и щелочно-земельных) металлов, классифицированные по их преломляемости, располагаются, как и химические свойства, сле-

дуя порядку их атомных весов". Далее он говорит: "Так, спектр рубидия представляется аналогичным спектру калия, будучи только смещенным, как целое, в красную область"». Ридберг далее отмечал: «Представляется, что Лекок де Буабодран с тех пор еще расширил свои сравнительные исследования о спектрах, о чем можно судить по применению действительных или предполагаемых связей для расчета путем интерполяции атомных весов Ga и Gm» ([1], с. 4).

Ридберг отметил также работы Д. Локьера [30], подчеркнув, что этот ученый «не изучал в деталях строение спектров или соответствие между спектральными линиями... Вся теория Локьера основана на фундаментальной идее, что каждое вещество обладает определенным спектром, который не изменяется, пока вещество остается тем же самым с химической точки зрения» ([1], с. 6).

Представляется уместным привести здесь и следующее высказывание Менделеева: «Вопрос о связи между спектрами сложных тел и их составом принадлежит к числу тех, над разработкой которых ныне многие трудятся и решение которого может иметь большое влияние на многие отрасли физики и химии» ([33], с. 44).

Так, в «общественном научном сознании» постепенно формировалось и закреплялось общее представление о связи спектров со строением атома.

Наиболее четкое осознание наличия органической корреляции между внутренней структурой вещества и его оптическими спектрами мы находим у самого Ридберга, который положил идею о существовании этой связи в основу общей программы своего теоретического поиска.

Это совершенно отчетливо видно из текста его фундаментальной работы «Исследования о строении спектров испускания химических элементов» (опубликованной в 1890 г. отдельным выпуском в «Известиях Шведской Академии наук»), которую мы уже цитировали выше [1]. В данной работе Ридберг так определяет общую цель своих исследований: «Достичь путем систематического изучения и сравнения физических и химических свойств элементов более точного знания природы и строения атомов» ([1], с. 8). Далее он пишет: «Можно сегодня рассматривать, как общепринятую наукой, гипотезу, что все физические явления обусловлены исключительно движением материи; это позволяет надеяться, что физика могла бы когда-нибудь стать, так же как и химия, механикой атомов. Но есть еще препятствие, и притом очень серьезное, для реализации данной идеи. Известно очень мало о строении атомов, что обусловлено без сомнения тем, что наука еще недостаточно обратила внимание на соответствующие вопросы, ...я не преувеличиваю, говоря, что систематическое и всестороннее изучение свойств материи, с целью установить строение элементов и на этой основе создать механику атомов, еще не началось. Но эту работу будет необходимо выполнить, если наука должна перейти когда-либо границы, в пределах которых она находится сейчас. Тяготение, сцепление и химическая связь, теплота и свет, электричество и магнетизм все еще представляют названия больших изолированных областей физической науки, о связи между которыми мы имеем смутные и туманные идеи. Если все эти явления имеют свои истоки в различных движениях материи, то абсурдно думать, что мы сможем их когда-либо понять, не зная строения этой самой материи, атомов и эфира. ...Идя еще дальше, мы приходим к очень правдоподобной гипотезе, что сцепление, химическая связь и химическое сродство в своей основе зависят от периодических движений атомов. Итак, наиболее естественным путем было бы общее изучение периодических движений в целом, и так как спектры химических элементов обусловлены движениями подобного рода, мы возвращаемся в область спектрального анализа» ([1], с. 8—9).

Мотивируя выбор спектров в качестве основного объекта исследования, Ридберг прежде всего отмечает, что такой путь позволяет изучать непосредственно собственные движения атомов, подчеркивая, что «изучение этих колебаний нам во всяком случае дает информацию большей ценности о строении атомов и приведет нас ближе к нашей цели, чем какое-либо другое исследование...» ([1], с. 10).

Следующим важным соображением в пользу такого выбора является четко осознаваемая Ридбергом высокая информативность и точность спектроскопических данных: «...Важным доводом, который привел меня к решению взять спектры как отправную точку для серьезного изучения общих свойств элементов, было преимущество данных, на которых следует базировать исследования. Прежде всего, эти данные несравненно наиболее богатые из всех и наиболее однородные, относятся ко всем известным элементам. Однако это свойство не самое главное. Существенное состоит в том, что все явление относится к движениям мельчайших частей вещества, самих атомов, так что мы можем достичь не только нахождения наиболее простых функций, выражающих зависимости между формой движущихся тел, их размерами и действующими силами, но еще и получить всегда те же значения длин волн линий элемента, без случайных отклонений...». ([1], с. 10).

Отличительной чертой работы Ридберга 1890 г., как и ряда его последующих статей, является исключительно всесторонняя и полная информированность о современном ему состоянии проблемы, а также глубина и завершенность тематического анализа опубликованной к тому времени литературы.

Ридберг осознавал необходимость поиска общих закономерностей в линейчатых спектрах элементов. Поэтому, наряду с указанными выше работами Мичерлиха, Стони, Лекока де Буабодрана, Локьера его внимание привлекла работа Н. Норденшельда [34], который «в течение зимовки в арктических районах занимался этой любопытной проблемой. Он полагал, что смог установить тот простой закон, что длины волн различных линий спектра могут быть выражены уравнением $\lambda = a^n k$ или $\log \lambda = k_1 + n\Delta$, где n — целое число, a и k или k_1 и Δ —характеристические постоянные для каждого элемента» ([I], с. 7). У Ридберга имеется ссылка на работу Маскара [21], с указанием на фундаментальное свойство постоянства разностей частот двойных линий в спектрах с сериальной структурой на примере дублета натрия и триплета магния, и на работу Хартли [35], в которой были найдены повторяющиеся разности частот между компонентами двойных и тройных линий в линейчатых спектрах с сериальной структурой магния, цинка, кадмия. Ридберг полагал, что «обнаружил это первым (в 1885)», пока не обратил внимания на указанную работу; при этом он отмечал: «Поскольку Хартли больше не использовал превосходные материалы, которые он получил путем своих измерений в ультрафиолетовой области спектра, можно было бы заключить, что он не придавал большого значения найденным соотношениям» ([1], с. 12).

Ридберг подчеркивает, что «до исследований Ливинга и Дьюара [36] никто не был в состоянии найти для серии линий реальную связь между ними» ([1], с. 13). Он отмечает, что эти ученые нашли в спектрах щелочных металлов главную (principal), резкую (sharp), или «вторую побочную», и диффузную (diffuse), или «первую побочную» серии.

Общую ситуацию Ридберг резюмирует следующим образом: «...если исключить формулу Бальмера для спектра водорода, надо признать, что проблема строения оптических спектров еще остается нерешенной» ([1], с.3).

Отметим, что среди работ, направленных на поиски сериальных закономерностей в спектрах, особое место, наряду с работами самого Рид-

берга ([1, 2, 38—39]), занимали исследования Кайзера и Рунге ([40—41]). Их сравнительный анализ исключительно важен для адекватной оценки того решающего вклада, который внес Ридберг в развитие науки об атомных спектрах. К этому вопросу мы еще вернемся.

Важной особенностью общей научной концепции Ридберга, которая отчетливо прослеживается в работе 1890 г., является его отношение к теоретическим моделям оптических спектров. Он, как правило, специально выделял те работы, которые в той или иной форме содержали попытки теоретического объяснения спектральных закономерностей (см. раздел VIII в [42], с. 205-206).

В этом отношении заслуживает особого внимания имеющийся в основополагающей статье Ридберга 1890 г. [1] достаточно подробный анализ той части работы Лекока де Буабодрана, которая содержит исторически первую попытку дать теоретическое обоснование на модельном уровне связи между спектральными характеристиками излучения и движением частиц вещества, рассматриваемых в качестве излучателя. Согласно гипотезе Лекока де Буабодрана «молекулы, которые колеблются, давая свет, имеют изохронные периоды колебаний, поэтому они дают линии с длинами волн, определенными и постоянными для каждого вещества... Сила, которая стремится вернуть молекулу к центру и ее движение есть реакция эфира — реакция, постоянная для одной и той же скорости и массы молекулы, но которая меняется при изменении соотношений масс эфира и молекулы... В этом случае более тяжелая молекула будет возвращаться к своему центру равновесия с меньшей энергией, чем другая, а следовательно, она затратит больше времени на колебание вокруг этой точки и ее длина волны будет большей» ([25], c. 446).

Представляется несомненным, что сама идея использования подобных моделей близка Ридбергу. Так, еще в его работе 1885 г. «О периодической системе химических элементов» содержится попытка теоретического объяснения причины периодических свойств, основанная на предположении существования «периодичности у сил, действующих между атомами, ...которые возникают через периодические движения у них, благодаря чему окружающий эфир приходит в вибрации; амплитуды этих вибраций определяются энергией атомного движения» ([37], с. 26). Там же Ридберг выражал надежду на то, что в последующих своих публикациях ему удается внести нечто большее для решения этой, как он отмечал, «очень запутанной проблемы». Однако, несомненно, что к 1890 году Ридберг осознал преждевременный и физически бесперспективный характер такого рода теоретических построений. Хотя он и говорил далее о своем нежелании «подвергать теорию (Лекока — прим. авторов) детальной критике», тем не менее он с определенностью подчеркивает, что «Лекок, при всех своих неоспоримых заслугах в спектральном анализе, был мало удачлив в этой теории», и что «фантастический мир атомов, который он создал, чтобы объяснить происхождение различных колебаний, не имел поддержки, помимо имени его автора» ([1],c.4).

Разумеется, применение Ридбергом таких терминов как «атом», «периодическое движение атомов» нуждается в комментариях. Дело в том, что в восьмидесятых годах прошлого столетия, когда разворачивалась исследовательская работа Ридберга, т. е. до открытия электрона и до признания научным сообществом электромагнитной теории Максвелла, еще не было необходимой теоретической базы для создания содержательной концепции атома, моделирующей его структуру и процессы взаимодействия с излучением. Уровень физической науки к этому времени, в первую очередь успехи кинетической теории газов и результаты экспериментов в области химии и молекулярной физики, давали лишь

некоторые свидетельства в пользу справедливости атомной гипотезы и позволяли получить оценку эффективных размеров атомов и молекул (см. гл. 5 в [43], гл. 4, 8 в [42]). Ридберг в 1900 г. писал следующее:

«...большинство свойств элементов пока еще определены лишь с грубым приближением, а численные значения постоянных являются средними, которые относятся к огромному числу молекул или атомов, находящихся в различных условиях и смешанных, в плохо известных соотношениях, с атомами других видов. Это молекулярная статистика» ([2], с. 200).

Одновременно он выделяет спектроскопию газов в качестве именно той области, где связь оптических спектров атомов с их структурой в принципе может быть установлена в наиболее чистом виде. Эта позиция Ридберга обозначена совершенно отчетливо: «Для спектров газов все обстоит совсем иначе. Атомы и молекулы действуют индивидуально, каждый атом испускает свои линии независимо от испускания линий другими атомами. Мы можем сказать, что спектры — язык атомов; каждый элемент всегда говорит на своем собственном характерном и неизменном языке, одинаковом на Земле и на наиболее удаленных звездах. Именно эта неизменность позволяет нам также определять длины волн линий с необычайной точностью и обещает очень большие надежность и успех при синтезе численных данных» ([2], с. 200).

Таким образом, Ридберг вполне однозначно определяет стратегию своего научного поиска как установление общей связи между спектральными характеристиками вещества и его внутренней структурой. В то же время он ясно видит и основные препятствия на пути успешной реализации подобной программы: с одной стороны, все возрастающее обилие чисто эмпирического материала в области спектроскопии, а с другой—острый дефицит экспериментальной информации относительно «внутреннего движения атомов» в сочетании с явной недостаточностью общетеоретических средств, имевшихся в то время в распоряжении физики.

В подобной ситуации Ридберг осуществляет безошибочный выбор первоначальной исследовательской задачи. Он формулирует эту задачу как «поиск путем чисто эмпирического метода соотношения между линиями в одном и том же спектре, чтобы, если это возможно, приближенно рассчитать все линии спектра, для которого известно ограниченное их число. Наряду с этими исследованиями надо также изучить аналогию между спектрами различных элементов, чтобы быть в состоянии отличить кажущиеся закономерности конкретного спектра от действительных закономерностей, свойственных всем спектрам» ([1], с. 10).

Фактически Ридберг ставит задачу систематизации имеющегося экспериментального спектроскопического материала в рамках некоторых полуэмпирических схем, которые носили бы тем не менее достаточно универсальный характер.

История науки показывает, что любая область физики проходит в процессе своего формирования такую фазу, когда накопленный эмпирический материал подвергается «предварительной обработке» путем выявления некоторых достаточно общих для данной области закономерностей, но пока не имеющих глубокого теоретического обоснования. Таковы, например, законы—Кеплера в небесной механике, Бойля — Мариотта — в физике газов, Кулона, Био—Савара—в области электростатики и магнетизма.

Подобные «первичные» теоретические модели выполняют двоякую функцию: во-первых, они создают некоторую общую основу для систематизации опытных данных, выступая в роли эмпирических законов, как бы аккумулирующих данные опыта. Во-вторых, они играют важную конструктивную роль при создании обобщающих, более фундаменталь-

ных теорий, выступая при этом в качестве своеобразных посредников между теоретическим знанием и эмпирией ([44—46]).

Так, например, в процессе построения теории электромагнетизма Максвелл нигде не обращался непосредственно к экспериментальным данным, а использовал в качестве своеобразного «эмпирического» материала теоретические знания предшествующего уровня (такие как модели Кулона, Фарадея, Био — Савара и др.) (см. [47]).

Если посмотреть с этих позиций на состояние спектроскопии в восьмидесятых годах прошлого столетия, то следует признать, что именно проблема выявления общих закономерностей в линейчатых спектрах являлась в то время первоочередной задачей.

В подобных случаях, как правило, возникает типичная для развития науки ситуация, когда решение назревшей проблемы пытаются найти практически одновременно и независимо друг от друга разные исследователи. Не был исключением в этом смысле и рассматриваемый этап истории спектроскопии. Фактически одновременно с Ридбергом сходную программу установления общих математических формул, описывающих спектральные закономерности, выдвинули и пытались реализовать известные спектроскописты Кайзер и Рунге.

Две эти программы в течение довольно длительного времени конкурировали между собой. Этот процесс сопровождался достаточно острой полемикой, причем тот вариант, который последовательно отстаивался Ридбергом, и который, как мы теперь знаем, оказался правильным, получил окончательное признание лишь к концу 90-х годов XIX в.

Этот интересный фрагмент развития спектроскопической науки заслуживает специального историко-методологического анализа.

Здесь мы ограничимся лишь общим сопоставлением концепции Ридберга, с одной стороны, и Кайзера — Рунге — с другой, с целью выявления тех различий в их подходах, существование которых в конечном счете решило соперничество в пользу Ридберга.

Подходы Ридберга и Кайзера — Рунге объединяет общее понимание того, что требуемое аналитическое выражение для спектральных формул должно представляться некоторой функцией от целого числа, переходящей в случае атома водорода в формулу Бальмера.

Однако явный вид зависимости в обоих подходах существенно различается. Ридберг исследовал методом графических построений зависимость волновых чисел k от порядкового номера члена серии m для трех типов спектральных линий различных элементов. Полученная зависимость характеризуется монотонным убыванием разности $\Delta k = k_{m+1} - k_m^{(1)}$ с увеличением m. Ридберг ставил задачу найти наиболее простую функцию, удовлетворяющую этому условию. В качестве первой возможности он выбрал формулу

$$k = k_0 - \frac{C}{m + \mu} \,. \tag{3}$$

Но оказалось, что это соотношение давало только «очень поверхностное представление о структуре спектра» [1]. Поэтому Ридберг, не отказываясь от сохранения общей структуры выражения, апробировал следующую по сложности степенную функцию—с квадратичной зависимостью в знаменателе.

Есть все основания считать, что окончательный выбор такой функции в качестве базисной был продиктован не только ее хорошим согласием с экспериментальными данными, но также и состоявшимся в то время знакомством с формулой Бальмера [48]. Ридберг установил, что для серий с большой точностью справедлива формула общего вида

$$k = k_0 - \frac{N_0}{(m+\mu)^2} \,, \tag{4}$$

где k_0 и μ — характеризующие данную серию константы (k_0 соответствует границе серии при $m \to \infty$), а N_0 — постоянная, одинаковая для всех серий. Ридберг, по его собственному утверждению, «был занят изучением этого уравнения, когда увидел опубликованный расчет Бальмера спектра водорода» ([I], с. 41). Сравнивая свое выражение с формулой Бальмера (2), записанной в виде

$$k = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{A} - \frac{4/A}{m^2} \,, \tag{5}$$

он установил, что $N_0 = 4/A$ при $\mu = 0$. В настоящее время величину N_0 , как известно, обозначают через R и называют постоянной Ридберга в его честь.

Таким образом, волновые числа линий каждой серии определяются разностями двух спектральных термов — постоянного, определяющего границу серии (для резких и диффузных серий каждого элемента эти границы совпадают), и переменного, зависящего от m и содержащего постоянную μ , характерную для серии, что дает

$$k = k_1 - \frac{N_0}{(m+p)^2}, \quad k = k_2 - \frac{N_0}{(m+s)^2}, \quad k = k_2 - \frac{N_0}{(m+d)^2},$$
 (6)

где $\mu=p$, s, d соответственно для главной, резкой и диффузной серий, а k_1 и k_2 — значения постоянной k.

Метод, примененный Кайзером и Рунге, состоял в том, чтобы путем чисто механического подбора отыскать формулу, которая давала бы с максимально возможной точностью соответствие с наблюдаемыми длинами волн линий щелочных металлов (начиная с лития и далее по возрастанию атомного веса) и находилась бы в соответствии с формулой Бальмера для водорода. В работе [40] Рунге приводил формулу вида

$$\frac{1}{\lambda} = A + Bm^{-1} + Cm^{-2},\tag{7}$$

как дающую прекрасное соответствие для одной из серий лития.

Спустя два года Кайзер и Рунге [41], однако, отдавали предпочтение уже формуле следующего вида

$$\frac{1}{\lambda} = A + Bm^{-2} + Cm^{-4},\tag{8}$$

которая, начиная с m=3, «наилучшим образом воспроизводит линии в различных сериях щелочных металлов» ([31], с. 141).

Признавая справедливость замечаний Ридберга относительно того, что используемое ими выражение есть просто интерполяционная формула и что в принципе можно подобрать множество других формул, приводящих к столь же удовлетворительным результатам, Кайзер и Рунге, тем не менее, настаивали на том, что именно их формула оказывается значительно более точной, чем любая другая с тем же или большим числом констант.

Очень важно, что Ридберг постоянно стремился сохранить универсальную форму искомой зависимости, в то время как для Кайзера и Рунге подобные соображения не были существенными. Они всегда были скептически настроены по отношению к целесообразности поиска единой формулы, которая объединяла бы все линии в данном спектре. Более того, главным объектом критики с их стороны оказался именно тот пункт всей концепции Ридберга, который составлял ее ядро: то, что волновые числа всех линий спектральной серии могут быть представлены как значения одной функции (4) от $(m+\mu)$ с одинаковым для всех серий значением константы N_0 . Позиция Кайзера и Рунге являлась чи-

сто прагматической, для них главное заключалось в том, чтобы добиться возможно более точного воспроизведения данных опыта, без использования каких-либо дополнительных соображений. По этому поводу Ридберг совершенно справедливо замечает следующее «Было бы легко составить уравнения, представляющие серии с гораздо большей точностью, чем та, которая достигнута Кайзером и Рунге, если не бояться увеличения числа констант» ([I],с 134).

Мы видим, таким образом, что исследовательская деятельность Ридберга направлялась определенными нормативными соображениями, которые относились не к сфере конкретно научных, а скорее к области методологических регулятивов. Сюда в первую очередь относятся, несомненно, использовавшиеся им критерии простоты и универсальности, позволявшие делать выбор между альтернативными формами теоретического знания одинаково удовлетворительно в смысле численного соответствия, описывающими одну и ту же совокупность эмпирических данных. В этом отношении позиция Ридберга близка к той, которой придерживался и последовательно развивал А. Пуанкаре.

Особенно важный результат Ридберг получил для связи главной и резкой серий лития (Li), натрия (Na) и калия (K), определяемых согласно следующим формулам

$$k=k_1-\frac{N_0}{(m+p)^2}$$
 для главной серии, $m=1,\,2,\,3,\ldots$,
$$k=k_2-\frac{N_0}{(m+s)^2}$$
 для резкой серии, $m=2,\,3,\,4,\ldots$,

причем $k_1 > k_2$.

Оказалось, что для границ с большой точностью справедливы формулы

$$k_1 = \frac{N_0}{(1+s)^2}, \quad k_2 = \frac{N_0}{(1+p)^2},$$
 (10)

и поэтому выражения для серий принимают вид:

$$k = \frac{N_0}{(1+s)^2} - \frac{N_0}{(m+p)^2} \qquad (m=1, 2, 3, ...),$$

$$k = \frac{N_0}{(1+p)^2} - \frac{N_0}{(m+s)^2} \qquad (m=2, 3, 4, ...).$$
(11)

При m=1 обе формулы дают одно и то же значение k, только с различными знаками, и это позволило Ридбергу сделать вывод (на примере лития), что «первый член резкой серии был бы ничем иным, как наименее преломляемой линией главной серии, т. е. хорошо известной красной линией лития (λ =6705,2)» ([1], c 61).

Объединяя две формулы (11) для главной и резкой серий в одну формулу (и добавляя знак \pm «для указания того, что надо всегда брать положительные разности») Ридберг записывает ее в виде

$$\frac{\pm k}{N_0} - \frac{1}{(m_1 + s)^2} - \frac{1}{(m_2 - \rho)^2}, \tag{12}$$

где m_1 и m_2 могут пробегать все целые значения от 1 до ∞ . Далее Ридберг приводит общую формулу для спектральных серий в виде ([1], с 64)

$$\frac{k}{N_0} = \frac{1}{(m_1 + \mu_1)^2} - \frac{1}{(m_2 + \mu_2)^2},\tag{13}$$

«где m_1 , m_2 — переменные целые числа, μ_1 и μ_2 — постоянные, характерные для серии». Отметим, что он пишет: «В каждой серии m_1 имеет определенное значение, которое не превышает 2 для рассчитанных серий и которое возможно всегда равно 1, при предположении, что μ может иметь значения >1. Однако представляется более вероятным, что серии с m_1 >1 слабее других и расположены в еще не изученных областях спектра». Это предположение впоследствии оправдалось.

Таким образом, работа Ридберга 1890 г. уже содержала представление волновых чисел спектральных линий для атомных спектров с сериальной структурой в виде разностей двух спектральных термов (как их стали впоследствии называть) вида $T=N_0/(m+\mu)^2$, т. е. иными словами, содержала комбинационный принцип для таких спектров. Это следует рассматривать как важнейший результат данной работы.

Вытекающий из формул (11) вывод о связи между главной и резкой сериями Ридберг в 1896 г. сформулировал следующим образом:

«Разность между общей границей диффузной и резкой серий и границей, принадлежащей соответствующей главной серии, дает волновое число... общего первого члена резкой и главной серий» [38]. К аналогичному выводу независимо пришел А. Шустер [501, который исходил, однако, не из ридберговского общего представления волновых чисел спектральных линий в виде разностей двух термов, а из формул типа $k=1/\lambda==A+Bm^{-2}+Cm^{-4}$ (см. (8)), полученных Кайзером и Рунге и дающих при $m=\infty$ значения границ рассматриваемых серий.

Отметим, что М. Джеммер в своей известной монографии ([201, с. 75) работу Ридберга [1] излагает неточно, не приводя общих формул (12) и (13), а о связи между сериями говорит, ссылаясь лишь на работу Ридберга 1896 г. [38] (а также на работу Шустера [50]), тогда как эта связь была установлена Ридбергом еще в 1890 г.

Плодотворность общего подхода Ридберга ярко проявилась в его статье 1897 г. о новых сериях в спектре водорода [39], содержавшей важные предсказания новых линий в сериальных спектрах, основанные на применении комбинационного принципа. В статье была рассмотрена новая спектральная серия, которую открыл в спектре звезды ζ Кормы Э. Пикеринг [51], приписавший ее водороду на том основании, что длины волн этой серии при нечетных m=5, 7, 9, ... удовлетворяют простой общей формуле

$$\lambda = 3646, 1 \frac{n^2}{n^2 - 16} \text{ Å}, \tag{14}$$

дающей при четных n=6, 8, 10, ... линии серии Бальмера (формула Бальмера (2) получается из формулы (14) при целых m=n/2) [52]. В действительности серия Пикеринга принадлежит ионизированному гелию $\mathrm{He^+}$, как было впервые теоретически показано Бором в 1913 г. в первой части трилогии ([14], с. 93) и «затем подтверждено экспериментально, и определяется формулой

$$k = 4R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (n = 5, 7, 9, ...),$$
 (15)

содержащей учетверенную постоянную Ридберга N_0 =R. Коэффициент 4 при R представляет квадрат заряда ядра Z=2 иона He^+ , содержащего один электрон как и атом водорода. При n=6, 8, 10, ... формула (15) дает линии, приближенно совпадающие с линиями серии Бальмера. Однако в 1897 г. и все последующие годы вплоть до 1913 г. считалось, что серия Пикеринга принадлежит водороду, и из этого исходил Ридберг. Он, однако, сделал остроумное предположение, по аналогии с сериаль-

Бальмера представляет диффузную серию водорода, определяемую формулой

$$\frac{k}{N_0} = \frac{1}{(m_1 + p)^2} - \frac{1}{(m_2 + d)^2} = \frac{1}{(m_1 + 1)^2} - \frac{1}{(m_2 + 1)^2} , \tag{16}$$

где m_1 =1 и m_2 =2, 3, 4, и что серия Пикеринга представляет резкую серию водорода, описываемую выражением

$$\frac{k}{N_0} = \frac{1}{(m_1 + p)^2} - \frac{1}{(m+s)^2} = \frac{1}{(m_1 + 1)^2} - \frac{1}{(m_2 + 0.5)^2} , \tag{17}$$

где m_1 =1 и m_2 =2, 3, 4, При этом m=n/2, а для постоянных s, p и d приняты значения s=0,5 и p=d=1. Исходя из общей формулы (11), Ридберг для соответствующей главной серии получил формулу

$$\frac{k}{N_0} = \frac{1}{(m_1 + s)^2} - \frac{1}{(m_2 + p)^2} = \frac{1}{(m_1 + 0.5)^2} - \frac{1}{(m_2 + 1)^2},$$
(18)

где $m_1=1$ и $m_2=1$, 2, 3, ..., что дает линии $\lambda=4687,88$ Å, 2734,55 Å, 2386,50 Å, ... Оказалось, что в соответствии с этим предсказанием в спектрах звезд наблюдается чрезвычайно интенсивная линия с длиной волны λ =4688 Å, и Ридберг пишет: «Все известные линии водорода превосходит по интенсивности линия 4688, которая почти точно соответствует рассчитанному значению 4687,88 и которую мы можем, с полной уверенностью, рассматривать как первую линию спектра водорода, одновременно являющуюся первой линией главной и резкой серий» (из формулы (17) она получается при $m_2=1$). Хотя впоследствии и оказалось, что серия (18) принадлежит Не+ а не водороду, сам способ предсказания новых линий, на основе общей формулы (13) и формулы (17) для также принадлежащей Не+ серии Пикеринга, оказался совершенно правильным. Разумеется, правильным было и отделение серии Пикеринга от серии Бальмера, в противоположность объединению этих серий в формуле (14), хотя Ридберг и не мог знать, что эти серии принадлежат разным атомам (Н и Не).

Следует отметить, что, давая в статье [39] общую формулу (13), Ридберг в примечании ссылается на статью [1] и указывает, что он приводил этот закон в явном виде также в резюме статьи [1] в ряде журналов («Zs. phys. Chem.», «С. R.» и «Phil. Mag») и что «поэтому представляется невозможным, чтобы профессор Шустер предъявлял свои претензии на второе открытие закона, как не опубликованного в достаточной степени». Заслуга открытия общего закона (13) полностью принадлежит Ридбергу и неправильно говорить о вытекающей из этого закона связи между спектральными сериями как о законе Ридберга — Шустера, как это делает Джеммер ([20], с. 91).

В 1900 г. в работе [2] Ридберг назвал спектры с сериальной структурой, для которых он установил фундаментальный закон (13), спектрами типа I, в отличие от спектров типа II, не обладающих такой структурой (см. [53], с. 365). Он показал на примере аргона, что для спектров типа II можно расположить значения волновых чисел спектральных линий в виде прямоугольных таблиц с постоянными разностями между строками и столбцами. Подобные таблицы были найдены и другими учеными (см. [54]); элементы таблицы соответствуют разностям термов комбинирующих систем термов, что стало ясным значительно позже, после того как В. Ритц сформулировал комбинационный принцип в обобщенной форме (работы Ритца 1903—1909 гг. содержатся в однотомном собрании его трудов [55]). В литературе обычно даются ссылки на статьи Ритца 1908 г. [56] и [57]. В [55] (с. 162) приводится следующая формулировка комбинационного принципа, взятая из приложенного к

статье [56] автореферата: «Комбинируя, путем сложения или вычитания, либо сами сериальные формулы, либо входящие в них константы, можно построить новые формулы, которые позволяют полностью вычислять новые линии щелочных металлов, открытые за последние годы Ленардом и другими, а также делают возможными далеко идущие приложения к другим элементам, в частности к Не». В сокращенном виде именно эта цитата приводится в [20] (в ссылке на с. 77). Однако в действительности наиболее содержательная, на наш взгляд, формулировка комбинационного принципа дана Ритцом в его общем обзоре 1909 г. «Линейчатые спектры и строение атомов» [58]. После рассмотрения двухчленных сериальных формул Ритц пишет: «Видно, что: 1°. Простые законы относятся всегда к $1/\lambda$, т. е. к частоте. 2° . При бесконечном увеличении одного из целых чисел получаемые частоты стремятся к пределу. 3°. Каждый из двух членов формулы до некоторой степени независим и линии спектра получают, комбинируя между собой такие члены различными способами».

Здесь следует подчеркнуть, что интерес Ритца к проблемам атомной спектроскопии был отнюдь не эпизодическим; работы по теории спектров составляют более половины его общего научного наследия, которое поразительно велико для теоретика, чья активная исследовательская работа была ограничена всего шестью годами⁽²⁾.

Ритц пытался дать строгое решение задачи о теоретическом выводе сериальных формул на основе уравнений классической механики и электродинамики с привлечением некоторых специальных модельных предположений о внутриатомной структуре. Эта важная часть деятельности Ритца практически не освещена в историко-научной литературе. Несомненно, однако, что она была хорошо известна Бору, который счел необходимым специально дать ее развернутую оценку в своем уже цитированном нами докладе, посвященном столетнему юбилею Ридберга:

«Как известно, Ритц, вдохновленный объяснением эффекта Зеемана, данным Лоренцем, попытался объяснить спектральные законы с помощью введенного им представления об атомных магнитных полях, влияние которых на электрически заряженные компоненты атома — в противоположность влиянию обычных механических сил — существенно зависит от скоростей. Однако несмотря на все остроумие таких попыток на этом пути, не удалось достигнуть объяснения спектральных законов не входя в противоречие с интерпретацией других атомных свойств.

Все же глубокое исследование Ритцом спектральных проблем, особенно подкрепленное его тесным сотрудничеством с Пашеном, привело его к различным уточнениям численных формул для спектральных серий и к предсказанию новых серий, что по существу завершало анализ многих линейчатых спектров. В связи с этой работой, важное значение для которой, несомненно, имели открытия и оригинальные концепции Ридберга, Ритц в 1908 г. установил общий закон, известный ныне как комбинационный принцип Ридберга—Ритца, согласно которому волновое число любой линии спектра может быть строго представлено в виде

$$k = T_1 - T_2$$

где T_1 и T_2 —два члена из набора термов, характерных для данного элемента» ([5], c.473).

Таким образом, именно исследования Ридберга сыграли решающую роль в правильной систематизации спектроскопических данных с применением комбинационного принципа, который, как мы видели, уже содержался в его основной работе 1890 г.

Фактически Ридбергом были созданы необходимые предпосылки для последующего теоретического описания спектральных закономерно-

стей в рамках модели Бора, которая первоначально возникла и развивалась в качестве основы для решения ряда задач атомной физики, не связанных с проблемой линейчатых спектров.

3. Ридберг и квантовая теория Бора. Известно, что теория Бора вошла в науку прежде всего в качестве квантовой теории линейчатых спектров. В частности, именно так ее квалифицировал Резерфорд в своей лекции 1936 г.: «Я считаю первоначальную квантовую теорию спектров, выдвинутую Бором, одной из наиболее революционных из всех, когда-либо созданных в науке; и я не знаю другой теории, которая имела бы больший успех... Основа его успеха лежит во внесении в теорию совершенно новых идей» ([52], с. 490).

Говоря об этих идеях, Резерфорд, несомненно, имеет в виду два знаменитых постулата Бора—о стационарных состояниях и условие частот, получивших впоследствии как прямое экспериментальное подтверждение, как и всестороннее теоретическое обоснование в квантовой механике и в квантовой электродинамике.

Органическая связь теории Бора со спектроскопией атомов и молекул представляется сегодня настолько естественной и привычной, что до сих пор продолжают находиться в тени некоторые моменты, чрезвычайно важные для понимания особенностей генезиса и становления квантовой теории Бора.

Общеизвестны те трудности концептуального и психологического порядка, с которыми было связано восприятие научным сообществом одного из наиболее характерных свойств теоретической модели Бора — независимости частоты излучения от частоты периодического движения излучающего заряда (см. [60] и цитированную там литературу).

С другой стороны, насколько можно судить на основе имеющегося исторического материала, самому Бору в решающем пункте этого этапа его творческой деятельности при формировании условия частот не пришлось преодолевать сколько-нибудь существенный психологический барьер.

Можно, конечно, понять и разделить восхищение Эйнштейна, назвавшего этот шаг Бора «чудом» и проявлением «высшей музыкальности в области мысли», можно полностью присоединиться к эйнштейновской оценке Бора как «человека с гениальной интуицией и тонким чутьем» ([61], с. 275) и т. п. Ясно, однако, что подобные высказывания целиком относятся к сфере психологии научного творчества.

Не отрицая, разумеется, важнейшей роли психологического фактора в процессе научного открытия, следует, тем не менее, всякий раз пытаться выявить сугубо логические основания подобного процесса, определяемые прежде всего структурой и особенностями используемой физической модели, которая, в свою очередь, обусловлена характером решаемой задачи.

Следует иметь в виду, что даже самое фундаментальное по своим конечным результатам исследование, как правило, начинается с решения некоторой конкретной задачи. История науки дает много примеров, иллюстрирующих справедливость такого утверждения. Достаточно вспомнить хотя бы открытие Планком кванта действия, которое явилось результатом решения достаточно узкой по своей первоначальной постановке задачи о расчете спектральной плотности равновесного излучения абсолютно черного тела на основе использования простых модельных представлений.

Если подойти с этих позиций к генезису боровской модели атома, то необходимо сразу же заметить, что здесь исследование Бора началось с определения энергетических потерь α -частиц в веществе на основе использования ядерной модели Резерфорда⁽³⁾. Характерно при этом, что

развитая им теория оказалась по его собственному утверждению «во многом аналогичной обычной теории дисперсии в электродинамике» ([62],c.66).

Естественно, что в таких задачах свойства электронов, входящих в состав атома, должны учитываться лишь по отношению к воздействию на их заряды со стороны внешнего электрического поля, создаваемого движущейся α -частицей, либо световой волной, когда речь идет о дисперсии.

Это означает, что электроны рассматривались Бором только в качестве реагентов поля, но не его источников. Следовательно, специфика решавшейся Бором задачи приводила к тому, что электрон с самого начала фигурировал в ней только как объект механики (пробный заряд), входящий в выражение для силы Лоренца, но не как электрон излучающий (заряд, определяющий ток в правой части полевых уравнений Максвелла). Это предопределило всю дальнейшую линию развития модели Бора, вплоть до того заключительного этапа, когда впервые возник вопрос о возможности применения этой модели для объяснения спектров атомов.

К этому времени Бор сумел решить проблему механической устойчивости атома Резерфорда в основном состоянии. Кроме того, у него уже сформировалось предварительное представление о возможности существования у атома дискретного ряда возбужденных состояний.

Здесь весьма важно зафиксировать, в каком именно конкретном контексте возникали и решались соответствующие задачи. Согласно Бору, основа механизма торможения α-частиц в веществе — передача их кинетической энергии электронам, связанным в атоме. При этом, как отмечал Бор в своем докладе перед Физическим обществом в Копенгагене (сентябрь 1912 года), «поглощение, которое зависит от движения электронов, снабжает нас информацией о их частотах» ([63], с. 67). С другой стороны, Бор использует значения этих частот, полученные из данных по дисперсии.

В результате Бор приходит к следующему выводу: «Поглощение α -лучей в водороде можно удовлетворительно объяснить на основе предположения о том же числе электронов в молекуле и о тех же частотах, которые были приняты для объяснения рефракции и дисперсии в этом газе» ([62], c.77).

Однако воздействие на связанный внутри атома электрон со стороны, как поля заряженной частицы, так и периодического поля электромагнитной волны, необходимым образом приводит к возникновению колебаний электрона около некоторого положения равновесия.

При рассмотрении электростатических систем типа модели Томсона вследствие квазиупругого характера связи между размазанным положительным и точечным отрицательным зарядами в этом пункте не возникает никаких трудностей.

Положение радикально меняется в случае модели Резерфорда: в задаче о движении точечного заряда в поле кулоновского центра возникает проблема механической неустойчивости системы.

С чисто формальной стороны речь идет о невозможности построить из атомных констант, характеризующих ядра и электроны, т. е. из их масс и зарядов, параметр размерности длины, который имел бы нужный порядок величины и задавал бы необходимое «равновесное» расстояние.

С точки зрения динамики механическая неустойчивость простейшей планетарной двухчастичной системы (типа атома водорода) состоит в том, что кулоновское притяжение, выступая в качестве центростремительной силы $(mv^2/r=e^2/r^2)$, задает функциональную связь между скоростью и размерами орбиты, сама же величина скорости не фиксирована и определяется начальными условиями. Поскольку начальная скорость

может быть произвольной (в том числе и сколь угодно близкой к нулю), то образование при этом динамически устойчивой планетарной системы фиксированного размера оказывается невозможным.

С другой стороны, параметр a размерности длины, численно совпадающий (по порядку величины) с размерами атома, естественно конструируется из атомных констант с привлечением постоянной Планка $(a=h^2/me^2)$. Тем самым чисто формально проблема механической устойчивости снимается, поскольку задание характерной длины приводит к фиксированному значению скорости, а следовательно,— и энергии уже в рамках классической динамики $^{(4)}$.

Задача заключается в том, чтобы найти какие-либо теоретические основания для введения такого параметра.

Реально подобным основанием в начале десятых годов XX в. могло служить только соотношение Планка, задающее связь между энергией осциллятора и его частотой.

Именно по такому пути и пошел Бор. Постулированное им в «резерфордовском меморандуме» (см. [63], с. 136) «определенное соотношение между кинетической энергией в кольце и периодом обращениям ($E_{\text{кин}}=Kv_{\text{обр}}$, где K— константа размерности действия) представляет собой по существу перенесение планковского соотношения, выражающего связь между энергией и частотой осциллятора, на более общий случай системы, совершающей периодическое движение.

Следует подчеркнуть, что мысль о необходимости обобщения планковской идеи квантования на механические системы, более сложные, чем линейный гармонический осциллятор, достаточно интенсивно внедрялась в общественное научное сознание именно на рубеже десятых годов нашего столетия.

Упомянем лишь о некоторых примерах такого рода (см. [65] и цитированную там литературу).

- В. Нернст в 1911 г. указал на необходимость учета квантования энергии вращения в теории теплоемкостей.
- Н. Бьерум в 1912 г. применил квантование энергии вращения $(J/(2\pi v_{_{\rm BP}})^2/2=nhv_{_{\rm BP}})$ для объяснения структуры полос в инфракрасных спектрах поглошения.
- О квантовании энергии ротатора в общем виде говорил Г. Лоренц в прениях по докладу Эйнштейна на Сольвеевском конгрессе в 1911 г. Примерно в это же время идея квантования вращательного движения была применена для объяснения дискретности величины магнитного момента (магнетон Вейсса).
- В 1911 г. А. Гааз в рамках модели Томсона приравнивал кинетическую энергию движения электрона по круговой орбите целому кратному величины hv, получив при этом соотношение, по существу определяющее радиус первой боровской орбиты.
- В такой «перенасыщенной» атмосфере шло формирование боровских представлений о «перманентном» (основном) состоянии в модели атома Резерфорда.

Следует подчеркнуть, что подобная ситуация нередко порождает у историков науки стремление непременно отыскать прямого или косвенного предшественника Бора по каждому ключевому пункту реализации его исследовательской программы. Так, например, А. Херманн ([66], с. 165) пытается мысль Бора об отсутствии в классической планетарной системе параметра размерности длины генетически связать со сходными по звучанию высказываниями Лармора 1900 г. Там же он ставит вопрос о том, не «оказались ли мысли Гааза плодотворными при обосновании теории Бора».

Едва ли можно считать подобную постановку вопроса оправданной. Как мы уже отмечали, в те периоды развития науки, когда в ней

назревают кардинальные изменения, идеи, образно говоря, начинают «носиться в воздухе». В подобных ситуациях, сходные по смыслу утверждения, как правило, могут высказываться несколькими исследователями совершенно независимо друг от друга.

Скорее всего, именно так все происходило и в обсуждаемой ситуации, когда шло формирование представлений о стационарных состояниях

Представляется, например, совершенно несомненным отсутствие какого бы то ни было взаимного влияния при постулировании соотношения, связывающего энергию атомного электрона с частотой его обращения, Бором — с одной стороны и Гаазом — с другой.

Дело даже не в том, что Бор в свое время недвусмысленно заявлял, что не знал о работе Гааза. Важнее то, что введение этого фундаментального соотношения производилось обоими учеными в совершенно различных исследовательских контекстах.

Гааз рассматривал движение электрона по окружности фиксированного радиуса, соответствующего границе размазанного положительного заряда в модели Томсона.

Бор исходил из планетарной модели Резерфорда применительно к задачам, связанным с воздействием внешних полей на атомные электроны, и здесь главной проблемой был, как мы уже знаем, вопрос о механической устойчивости атома. Решение этого вопроса требовало введения соответствующего параметра размерности длины. Соотношение Бора $\mathbf{E}_{\text{кин}} = K v_{\text{обр}}$ было постулировано именно для этой цели. Очевидно, что подобная задача в рамках использования модели Томсона вообще не возникала, поскольку требуемый параметр в этой модели был задан изначально. О независимости подходов Бора и Гааза говорит также и различие в используемых коэффициентах пропорциональности между энергией и частотой: у Гааза—это постоянная Планка, у Бора—отличная от нее величина.

Таким образом, Бор решил проблему механической устойчивости атома Резерфорда в основном состоянии за счет использования планковской связи между кинетической энергией электрона и частотой его обращения. Важно подчеркнуть, что понятие устойчивого состояния в модели атома Резерфорда выступало в качестве необходимого элемента той единой теоретической концепции, в рамках которой удалось построить внутренне непротиворечивое и согласующееся с экспериментом описание достаточно широкого круга атомных явлений. Сюда относились: 1) результаты опытов Резерфорда по упругому рассеянию счастиц на ядрах атомов, 2) экспериментальные данные об энергетических потерях счастиц в различных веществах, 3) опытные данные, касающиеся явлений оптической дисперсии в этих же веществах.

Иными словами, уже на той промежуточной стадии формирования модели атома Бора, когда в ней выкристаллизовался лишь первый ее основной элемент—понятие об устойчивом («перманентном»—по терминологии Бора) состоянии, эта модель была уже вполне содержательной в том смысле, что она адекватно описывала достаточно обширную конкретную область атомных явлений. Чрезвычайно существенно то, что во всех решавшихся здесь задачах движущийся заряд фигурировал только в качестве реагента поля, но не его источника. В этом отношении модель Бора радикально отличается от той, которая была предложена в 1912 г. Д. Никольсоном [б7]. В то же время последняя имела с ней ряд сходных черт, и, несомненно, способствовала формированию у Бора представления о дискретном ряде состояний⁽⁵⁾.

Как известно, Никольсон исходил из модели Нагаока ([69], с. 24), в основе которой лежало представление об электронном кольце, вращающемся относительно массивного положительного ядра. Развитие

данной модели Никольсоном состояло в том, что он ввел связь между энергией кольца и частотой его обращения в соответствии с идеей Планка ($E=nhv_{o6p}$). Именно эта, чисто механическая часть модели Никольсона прямо перекликалась с представлениями Бора. Так, в письме к Резерфорду Бор подчеркнул: «При своих вычислениях Никольсон, как и я, имеет дело с системами того же строения, как и Ваша модель атома; и при определении размеров и энергии системы он, как и я, ищет основу в соотношении между энергией и частотой, предложенной в планковской теории излучения. Состояние системы, рассматриваемое при моих вычислениях, характеризуется, однако, из числа состояний, согласующихся с данным соотношением, как такое состояние, в котором системы обладают наименьшим возможным количеством энергии» ([63], с. 576). Иными словами, наименьшее по энергии из возможного набора состояний в модели Никольсона могло трактоваться как устойчивое состояние в модели Бора.

Однако в соответствии с поставленной Никольсоном исследовательской задачей его модель представляла атом прежде всего со стороны связи с излучением, поскольку с самого начала выступала в качестве основы теории спектров. Тем самым заряды электронов, входящих в кольцо, определяли плотность тока в уравнениях Максвелла, в силу чего связь между частотой излучения и частотой, характерной для периодического движения излучателя, фактически оказывалась заложенной в модель изначально. Поэтому самому Никольсону в рамках собственной модели не оставалось иного выхода, как отождествлять дискретные частоты наблюдаемых спектральных линий с частотами специально постулированных механических колебаний электронов, перпендикулярных плоскости кольца. Естественно, что при этом Никольсон сразу же столкнулся с проблемой устойчивости атома, но не механической, а радиационной, причем проблема оказалась трудной, а для системы типа атома водорода принципиально неразрешимой. В самом деле, попытки объяснить безызлучательное движение электрического заряда, рассматриваемого в качестве источника поля, неизбежно требовали введения дополнительных, достаточно искусственных предположений. Таково, в частности, использованное Никольсоном условие Лармора, согласно которому отсутствие излучения обусловлено равенством нулю векторной суммы ускорений двух электронов ([66], с. 167). Неудовлетворительный характер подобного допущения, помимо того, что оно выступает в качестве типичной гипотезы ad hoc, заключался еще и в том, что тем самым автоматически исключалась из рассмотрения простейшая система с одним валентным электроном, т. е. атом водорода, с объяснением спектра которого оказался связанным первый решающий успех теории Бора.

В то же время, в письмах к своему брату Харальду от 23 декабря 1912 г. (6) и Резерфорду от 31 января 1913 г. (7), Бор специально подчеркивает, что в его модели, в отличие от теоретической схемы Никольсона, вопрос об излучении атома вообще не ставился; признаки же, объединяющие обе модели, ограничиваются только совпадением их структурной основы (модель Резерфорда), а также постулированием планковской связи между энергией системы и частотой ее механического движения. Характерно, что Бор в процессе знакомства с моделью Никольсона, хотя и отмечает наличие в ней ряда возбужденных состояний, но никак не ассоциирует этот факт с возможностью оптических переходов между ними.

Есть все основания предположить, что к моменту знакомства с формулой Бальмера Бор уже получил в явном виде общее выражение для уровней энергии атома водорода, $E_n = (-2\pi^2 m e^4/h^2)(1/n^2)$, поскольку именно наличие квадратичной зависимости от целого числа в знаменателе создавало основу для отождествления этой величины с соответст-

вующими членами в выражении для спектральных линий

$$v = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) .$$

Требуемая зависимость от n возникала элементарным путем, если использовать условие Никольсона $E=nhv_{\rm ofp}$ применительно к единственному электрону, что, как мы уже отмечали, не имело смысла в модели Никольсона, но выглядело совершенно естественным при подходе Бора, который принципиально занимался рассмотрением только простейших систем. Для этого было достаточно, наряду с условием квантования энергии вращения, воспользоваться известным выражением из классической динамики, связывающей энергию электрона E с частотой обращения $v_{\rm ofp}$ по эллипсу: $v_{\rm ofp} = \sqrt{2} E^{3/2} / 2\pi^2 e^2 \sqrt{m}$. В то же время полученная таким путем зависимость вида $E_n \sim n^{-2}$ сама по себе, до ознакомления Бора со спектральными закономерностями, не давала еще каких-либо оснований для физической интерпретации. Однако ознакомление с формулой Бальмера и комбинационным принципом Ридберга—Ритца позволило Бору произвести отождествление найденного им выражения со спектральными термами и сформулировать условие частот(8).

Таким образом, по нашему мнению, формулировка условия частот была осуществлена Бором в результате проецирования его предварительной модели, охватывающей чисто механические аспекты взаимодействия зарядов, включая проблему механической устойчивости, на теоретическую схему Бальмера — Ридберга — Ритца, описывающую основные спектральные закономерности линейчатых спектров.

Если придерживаться такой точки зрения, то следует признать лишенным смысла вопрос о поиске непосредственного предшественника, у которого Бор мог заимствовать саму идею независимости частоты излучения от механической частоты движения излучающего заряда. В частности, нам представляются необоснованными как гипотеза Херманна ([66], с. 172) о том, что условие частот было заимствовано Бором из модели Штарка, так и попытки искать истоки этого условия в эйнштейновской теории фотоэффекта [71].

Исследовательский прием, который состоит в перенесении физических моделей и связанных с ними математических схем, дающих адекватное описание некоторого ограниченного круга явлений, на иную, еще не освоенную предметную область, является обычной нормой построения теоретического знания.

Представляется весьма вероятным, что именно такого рода подход лежал в основе завершающей стадии исследования Бора, в процессе которой и было сформулировано условие частот.

4. Заключение. История развития атомной спектроскопии естественным образом подразделяется на несколько этапов. Первоначальным был этап, который предшествовал созданию квантовой теории атомных спектров; его завершением, безусловно, явилось установление основных спектральных закономерностей.

Здесь несомненный приоритет принадлежит Ридбергу, который выделил в сериальных формулах спектральные термы, установил их характерную аналитическую структуру в виде функции определенного вида от целого числа, ввел универсальную спектроскопическую постоянную и дал первоначальную формулировку комбинационного принципа.

Характерно, что в процессе своей деятельности по систематизации спектроскопических данных Ридберг исходил из общего представления о наличии глубинной связи между структурой атома и его спектрами, а при отыскании требуемой аналитической зависимости постоянно руко-

водствовался соображениями универсальности и условием минимальности числа используемых параметров. Оба эти критерия не были детерминированы требованиями наилучшего численного соответствия с экспериментом, а выступали в качестве некоторых нормативных условий не конкретно научного, а методологического плана. В этом отношении реализация исследовательской программы Ридберга принципиально отличалась от чисто эмпирического подхода его основных оппонентов. В итоге установленные Ридбергом соотношения имели ту степень универсальности, которая свидетельствовала о их значительно более высоком, по сравнению со схемой Кайзера и Рунге, теоретическом статусе. Фундаментальный характер найденных Ридбергом общих выражений для спектральных термов был, как известно, подтвержден впоследствии строгим квантовомеханическим обоснованием, в частности, методом квантового дефекта (см., например, [72], с. 141).

Вместе с тем в историко-методологической литературе имеется определенная недооценка той конструктивной роли, которую сыграли результаты, полученные Ридбергом, в самом процессе создания квантовой теории атома. Представляется, однако, несомненным, что систематизация обширного экспериментального спектроскопического материала на основе построенных Ридбергом первичных теоретических схем явилась необходимым предварительным условием для последующего успешного описания линейчатых спектров в рамках первоначальной теории Бора. В частности, модель спектральных термов и комбинационный принцип Ридберга — Ритца сыграли ключевую роль при формулировке боровского условия частот.

Чрезвычайно важно принять во внимание тот факт, что Бором была разработана предварительная модель, в рамках которой он решил проблему механической устойчивости основного состояния атома и получил явное выражение для уровней энергии атома водорода, еще до своего знакомства с основными спектральными закономерностями. При этом внутренняя логика процесса формирования теории Бора не требовала заимствования условия частот из ранее созданных теоретических схем (типа моделей Штарка и Никольсона или теории фотоэффекта Эйнштейна).

Вся совокупность имеющихся исторических материалов вполне определенно свидетельствует в пользу того, что заключительный шаг в формировании первоначальной теории Бора—постулирование условия частот—был сделан непосредственно в процессе взаимного согласования его предварительной, чисто механической модели со спектроскопической схемой Бальмера—Ридберга—Ритца. Для развития атомной спектроскопии решающее значение имело физическое истолкование Бором спектральных термов и комбинационного принципа Ридберга—Ритца на основе представления об электронных уровнях энергии атома и об излучательных переходах между ними.

На современном этапе развития спектроскопии особое внимание уделяется близким к границе ионизации высоковозбужденным уровням энергии электрона в атомах и молекулах. Соответствующие квантовые состояния справедливо получили название ридберговских, а об атомах в подобных состояниях говорят как о ридберговских атомах [72]. Дляспектральных термов таких атомов с хорошим приближением справедлива основная ридберговская формула $T = N_0/(m+\mu)^2 = R/(m+\mu)^2$, которую записывают в виде $T = R/(n-\Delta)^2$, где n—главное квантовое число электрона (отличающееся от m лишь на небольшое, целое число, а Δ — связанный с ридберговской постоянной μ квантовый дефект, который зависит от экранирования ядра остовом и может быть рассчитан квантовомеханически (в частном случае атома водорода Δ =0, а n=m). Для экспериментального исследования спонтанного и вынужденно-

го излучения ридберговских атомов успешно применяются современные методы лазерной спектроскопии [73].

Весьма большой интерес представляют исследования переходов между близкими очень высоковозбужденными уровнями энергии ридберговских атомов (при значениях *п* порядка нескольких десятков и даже сотен) методами радиоастрономии путем наблюдения рекомбинациюнных радиолиний (в спектральной области от миллиметровой до декаметровой) [74].

ПРИМЕЧАНИЯ К ТЕКСТУ

- 1 Здесь и в дальнейшем мы применяем некоторые обозначения, отличающиеся от использованных в оригинальных работах Ридберга. В частности, волновое число мы обозначаем общепринятым ныне символом k вместо ридберговского n.
- ² Вальтер Ритц умер в 1909 г. в розрасте 31 года. Посмертное издание в 1911 г. собрания его трудов [55] объединяет 28 оригинальных публикаций ученого и представляет собой том, содержащий 540 страниц текста.
- ³ Подчеркнем, что наличие электронной оболочки атома в теоретическом анализе Резерфорда вообще никак не учитывалось. В этом смысле модель Резерфорда представляет скорее не атом как структурное образование, а его ядро как рассеивающий центр (см. [60], с. 11).
- ⁴ См. в [64] общую характеристику и анализ методологических особенностей теории Бора.
- ⁵ Анализ влияния работ Никольсона на становление теории Бора дан в работе [60]. Там же приведены соответствующие ссылки на литературу. Имеется превосходный научно-исторический анализ атомной теории Никольсона [68], к которому мы можем отослать за деталями.
- ⁶ «Хотя это и не подобает рождественской открытке, но один из нас (Бор прим. авт) хотел бы сказать, что он не считает теорию Никольсона несовместимой с его собственной. В действительности, его расчеты будут справедливы для конечного, классического состояния атомов, в то время как Никольсон имеет дело с атомом, испускающим излучение...» ([701, с. 563).
- ⁷ «Поэтому мне представляется, в качестве разумной гипотезы, допущение, что состояние систем, рассматриваемых при моих вычислениях, следует отождествлять с постоянным (естественным) состоянием атомов... Согласно данной гипотезе состояния системы, рассматриваемые Никольсоном, наоборот, обладают меньшей устойчивостью; они являются ... состояниями, в которых излучается энергия... Я должен, однако, заметить, что соображения, намеченные здесь, не играют существенной роли в исследовании, проведенном в моей статье. Я совершенно не занимаюсь вопросом вычисления частот, соответствующих линиям в видимом спектре» ([63], с, 576).
- ⁸ Подробная реконструкция этой части познавательной деятельности Бора содержится в [60].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Rydberg J. R. Recherches sur la constitution des spectres d'emission des elements chimiques—Stockholm: Kongl. Svenska Vetenskaps Akademians Handlingar, 1890.—Bandet 23, Nr. 11. См. также: Rydberg J. R.//Phil. Mag. 1890. V. 29. Р. 331; С. R. Ac. Sci., Paris. 1890. Т. 110. Р. 394; Zs. phys. Chem. 1890. Вd. 5. S. 227. Нем. пер. в серии «Ostwald's Klassiker der exakten Naturwissensehaften». Nr. 196: Untersuchungen über die Beschaffenheit der Emissionsspektren der chemischen Elementen von J. R. Rydberg.— Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H., 1922.
- 2. Rydberg J. R. La distribution des raies spectrales//Rapports presentes au Congres International de Physique.—Paris: Gauthier-Villars, 1900.—T. 2. P. 200.
- 3. Rydberg J. R. Elektron, der erste Grundstoff.—Lund: Haken Ohissons Buchdrukerei, 1906.
- 4. Proceedings of the Rydberg Centennial Conference on Atomic Spectroscopy. President William A. Meggers/Ed. Bengt Edlen.—Lund: C. W. Gleerup, 1954.
- 8. Siegban M. Janne Rydberg (1854—1919)//LincIroth S. Swedish Men of Science. 1650—1950.—Stockholm: Almquist & Wiksell, 1952.—P. 214.
- 9. Nepomucene Sister St. John. Rydberg: The Man and the Constant//Chymia. Annual Studies in the History of Chemistry.— Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1960.—V. 6. P. 127.
- 10. Borelius G.//Fysisk Tidsskrift. 1923. Bd. 21. S. 65
- [11] *Лисневский Ю. И.* Эволюция представлений И. Ридберга о «порядковых числах» элементов в периодической системе/Учение о периодичности: История и современность—М.: Наука, 1981.—С. 117.
- 12. *Лисневский Ю. И.* Атомные веса и возникновение ядерной физики.—М.: Наука, 1984—С 73.
- 13. Shenstone A. G. The influence of spectral series//[4].—P. 27.

- Бор Н. О строении атомов и молекул / Избранные научные труды.—М.: Наука. 1970—Т. 1. С. 84.
- 15. *Бор Н*. О спектре водорода.//Ibidem.—С. 152.
- Розенфельд Л., Рюдингер Э. Годы перелома (1911—1918)//Нильс Бор. Жизнь и творчество.—М.: Наука. 1967.—С. 149.
- 17. Talbot W.//Phil. Mag. 1834. V. 4. P. 112.
- 18. Кирхгоф Г. Избранные научные труды.—М.: Наука, 1988.
- 19. Mitscherlich A.//Ann. d. Phys. 1894. Bd 121. S. 459.
- Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики/Пер, с англ. М.: Наука. 1985
- [21] Mascart E.//C. R. Ac. Sci., Paris. 1869. T. 69. P. 337.
- 22. Stoney G.J.//Phil. Mag. 1868. V. 36. P.132.
- 23. Angstrom A. Recherches sur le spectre solaire. Uppsala, 1868.
- 24. Stoney G. J.//Phil. Mag. 1871. V. 41. P. 291.
- 25. Lecog de Boisbaudran P. E.//C. R. Ac. Sci., Paris. 1869. T. 69. P. 445, 606, 657,694.
- 26. Lecog de Boisbaudran P.J.//Ibidem. 1870. T. 70. P. 114, 974.
- 27. Lecog de Boisbaudran P. J.//Ibidem. 1876. T. 82. P. 1036.
- 28. Lecog de Boisbaudran P. J.//Ibidem. P. 611.— (См. подробнее [29]).
- Дмитриев И. С. Теоретические исследования Лекока де Буабодрана по классификации химических элементов и систематизации спектров/[11].
- 30. Lockyer J.//Nature, London. 1881. V. 24. Pp. 267, 296, 315.— (См. подробнее [31].—С. 73).
- [31] McGucken W. Nineteenth-Century Spectroscopy: Development of the understanding of Spectra (1802—1897).—Baltimore; London: The John Hopkins Press, 1969.
- 32. *Менделеев Д. И.* Основы химии.—3-е изд. Ч. 2.—СПб., 1877.—(См. подробнее [33].)
- 33. *Ельяшевич М. А.* Периодический закон Д. И. Менделеева; спектры и строение атома//Периодический закон и строение атома.—М.: Атомиздат, 1971.—С. 41.— (См. также: *Ельяшевич М. Л.*//УФН. **1970**. Т. 100. С. 5).
- 34. Nordenskiold N.//C. R. Ac. Sci., Paris. 1887. T. 105. P. 988.
- 35. Hartley W.//J. Chem. Soc. 1883. V. 83. P. 390.
- 36. Living G., Dewar J. /.//J. Phil. Trans. 1883. T. 174. P. 187.
- 31. Rydberg J. R. 0m de keneska grundamnenas periodiska system.— Stockholm: Bihang till. Kgl. Sven. Vetenskaps Akademiens Handlingar, 1885.—Bd. 10. S. 1.
- 38. Rydberg J.R.//Astrophys. J. 1896. V. 4. P. 91.
- 39. Rydberg J. R.//Ibidem. 1897. V. 6. P. 233.
- 40. Rynge C.//Rep. Brit. Assoc., Bath. 1888. P. 576.
- [41] *Kayser H., Runge C.*//Ann. d. Phys. **1890**. Bd. 41. S. 302.— (См. подробнее разделы 6, 7 главы 3 в [31]).
- 42. Дорфман Я. Г. Всемирная история физики с начала XIX века до середины XX века.—М.: Наука, 1979.
- 43. Хунд Ф. История квантовой теории/Пер, с немец. Киев.: Наукова думка, 1980.
- 44. *Степин В. С.* Структура и эволюция теоретических знаний//Природа научного познания.—Минск: Изд-во Белорус, ун-та, 1979.—С. 179.
- 45. Становление научной теории.—Минск: Изд-во Белорус, ун-та, 1976.
- 46. Степин В.С. Идеалы и нормы в динамике научного поиска //Идеалы и нормы научного исследования.—Минск: Изд-во Белорус, ун-та, 1981.—С. 10.
- 47. *Степин В. С., Томильчик Л. М.* Анализ материалов максвелловской электродинамики в аспекте логики научного открытия//Труды XIII Международного конгресса по истории науки. Секция 1.—М.; 1974.—С. 120
- 48. Balmer J. J.//Verh. Naturforsch. Ges. Basel. 1885. Bd 7. S. 548.
- 49. Balmer J. J.//Ibidem.— S. 760.
- 50. Schuster A //Nature, London. 1896, Dec. 31. V. 55. P. 200.
- [51] Pickering E. C.//Astrophys. J. 1896. V. 4. P. 369.
- 52. Pickering E. C.I/Ibidem. 1897. V. 5. P. 92.
- 53. Ельяшевич М. А.//ЖПС. 1989. Т. 51. С. 359.
- 54. Kayser H., Runge C.//Ann. d. Phys. 1893. Bd. 52. S. 93.
- 55. Ritz W. Gesammelte Werke.—Paris, 1911.
- 56. Ritz W.//Phys. Zs. 1908. Bd. 9. S. 521.
- 57. Ritz W.//Astrophys. J. 1908. V. 28. P. 237.
- 58. Ritz W.//[55].—P. 170.
- 59. Резерфорд Э. Избранные научные труды.—М.: Наука, 1972.
- 60. Дынич В. И., Ельяшевич М. А., Томильчик Л. М. К истории возникновения и развития теории Бора.—Препринт ИФ АН БССР. № 516.—Минск, 1989.
- [61] Эйнитейн А. Избранные научные труды.—М.: Наука, 1967.—Т. 4. С. 259.
- 62. Бор H. Теория торможения заряженных частиц при их прохождении через вещество//Избранные научные труды.—М.: Наука, 1970.—Т. 1. С. 63.
- 63. Bohr N. Collected Works. V. 2: Work on Atomic Physics (1912—1917)/Ed. U. Hoyer.—Amsterdam: North-Holland, 1981.—-P. 648.

- 64. *Алексеев И. С., Овчинников Н. Ф., Печенкин А. А.* Методология обоснования квантовой теории: (История и современность).—М.: Наука. 1984.—С. 106.
- 65. Ельяшевич М. А.//УФН. 1985. Т. 147. С. 253.
- 66. Hermann A. Fruhgeschichte der Quantentheorie (1899—1913).—Mosbach in Baden:
 Physik Verlag, 1969; англ. издание: The Genesis of Quantum Theory: 1899—
 1913—Cambridge, Mass., 1971.
- 67. Nicholson J.//Mon. Not. Roy. Astrophys. Soc. 1912 V. 72. Pp. 139, 677, 729.
- 68 McCormmach R. The Atomic Theory of John Willans Nicholson//Arch. History Exact Sci. 1966. V. 3 P. 160.
- 69. Алексеев И. С. Развитие представлений о структуре атома. Новосибирск: Наука, 1968 С. 7.
- Bohr N. Collected Works V. 1. Early Work (1905—1911)/Ed. J. R Nielsen.—Amsterdam: North-Holland, 1972.
- [71] Мигдал А. Б.//УФН. 1985. Т. 147. С. 303.
- 72. Ридберговские состояния атомов и молекул / Пер, с англ—М Мир, 1985.
- 73. Бетеров И. М, Лернер П. Д.//УФН. **1989.** Т. 159. С. 665.
- 74. Сороченко Р. Л // Нильс Бор и физика XX века.—Киев.: Наукова думка, 1988.—С. 177.