

530.145(092)

**РАЗВИТИЕ НИЛЬСОМ БОРОМ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ АТОМА
И ПРИНЦИПА СООТВЕТСТВИЯ**

(Работы Н. Бора 1912—1923 гг. по атомной физике и их значение)

М. А. Ельяшевич

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение. Две части теории Бора: его основные постулаты и модельная теория. Роль принципа соответствия	253
2. Истоки работ Бора по квантовой теории атома	256
3. Начало исследований. Резерфордский меморандум: размеры атома и квант действия (1912 г.)	261
4. Решающие успехи Бора: теория атома водорода и объяснение спектральных законов, первое применение идеи соответствия (1913 г.)	266
5. Развитие теории одноэлектронных атомов и попытки создания теории многоэлектронных систем (1913—1917 гг.)	280
6. Принцип соответствия и теория сериальных спектров атомов (1917—1920 гг.)	287
7. Физическое объяснение периодической системы. Трудности модельной теории и поиски путей их преодоления (1921—1923 гг.)	291
8. Заключение	297
Список литературы	298

**1. ВВЕДЕНИЕ. ДВЕ ЧАСТИ ТЕОРИИ БОРА: ЕГО ОСНОВНЫЕ ПОСТУЛАТЫ
И МОДЕЛЬНАЯ ТЕОРИЯ. РОЛЬ ПРИНЦИПА СООТВЕТСТВИЯ**

Важнейшим этапом в создании современной квантовой теории были исследования Нильса Бора по атомной физике в период 1912—1923 гг.¹⁻⁴, посвященные в основном квантовой теории атома и его спектров и развитию идеи соответствия между квантовой и классической теориями. В начале данного периода Бор работал четыре месяца, с марта по июль 1912 г., в лаборатории Э. Резерфорда в Манчестере, что определило направление его дальнейших исследований. Ближайший сотрудник Бора Л. Розенфельд впоследствии писал об этих исследованиях (в предисловии к т. 2 Собрания трудов Бора): «...Бор, сочетая открытие атомного ядра Резерфордом с квантом действия, развил теорию строения атомов и молекул, основанную на представлениях, чуждых классической электродинамике, о стационарных, безызлучательных, состояниях атомной системы и об излучательных переходах между такими состояниями» (1, р. V). В 1913 г. Бор опубликовал в журнале «Philosophical Magazine» свою знаменитую статью «О строении атомов и молекул»⁵, первая часть которой содержала основы квантовой теории атома водорода и истолкование его спектра. Блестящим успехом Бора был теоретический вывод значения постоянной Ридберга и последующее применение теории одноэлектронных атомов к спектру ионизованного атома гелия⁶. Очень четкое изложение своих основополагающих идей Бор дал в конце 1913 г. в докладе «О спектре водорода»^{*}). Среди дальнейших работ Бора следует

^{*}) Опубликованном в начале 1914 г. по-датски⁷, а в 1922 г. первой статьей в сборнике⁸.

специально отметить ряд фундаментальных статей: в 1918 г. «О квантовой теории линейчатых спектров» (ч. I и II)⁹, посвященную принципу соответствия, в 1920 г. «О сериальных спектрах элементов»¹⁰, содержащую дальнейшее развитие теории атома, в 1921 г. «Строение атомов в связи с физическими и химическими свойствами элементов»¹¹, в которой было дано физическое объяснение периодической системы Д. И. Менделеева, и, наконец, в 1923 г. «О применении квантовой теории к строению атома». I. Основные постулаты квантовой теории»¹², где большое место было уделено обсуждению принципиальных трудностей развиваемой теории, выявившихся в это время. Данные статьи и ряд других были написаны Бором у себя на родине, в Копенгагене, где в 1920 г. он организовал Институт теоретической физики, который стал важнейшим центром развития квантовой теории, а сам Бор — признанным руководителем интернациональной научной школы по теоретической физике (часто называемой копенгагенской школой). Идеи Бора сыграли огромную роль в становлении квантовой механики (см., например, статьи в сборнике¹³, а также статью¹⁴).

Весьма существенно дать правильную оценку исключительно большого вклада, внесенного Бором в разработку квантовой теории, как теории микроскопических явлений со своими специфическими законами, отличными от законов макроскопических явлений и вместе с тем связанными с ними принципом соответствия. Задача данной статьи — систематически рассмотреть развитие идей Бора в период 1912—1923 гг. и этим способствовать такой оценке. Подобное рассмотрение очень важно и потому, что квантовая теория атома Бора, или просто теория Бора, как ее обычно называют, во многих учебниках и монографиях (и нередко в популярной литературе) излагается упрощенно и часто совершенно неправильно; особенно это относится к постулатам Бора.

При решении поставленной в статье задачи необходим анализ оригинальных работ Бора, его черновых материалов и важнейшей переписки, с использованием историко-научной литературы о развитии квантовой теории и непосредственно о научном творчестве Бора. Данный анализ значительно облегчается тем, что недавно были опубликованы т. 2—4 Собрания трудов Бора¹⁻³, издание которого было начато под общей редакцией Розенфельда (т. 1 вышел в 1972 г.¹⁵). В этих томах, как раз охватывающих период 1912—1923 гг., наряду с фотовоспроизведением опубликованных работ Бора приведены важнейшие архивные материалы — черновики статей Бора, конспекты его лекций и докладов и т. д., избранная переписка; имеются также содержательные вводные статьи в т. 2 У. Хойера (Хойер до этого опубликовал монографию¹⁶ и статью¹⁷, им предшествовали важные статьи Розенфельда¹⁸ и Д. Хейльброна и Т. Куна¹⁹) и в т. 3 и 4 Д. Р. Нильсона. Русские переводы большей части опубликованных статей Бора рассматриваемого периода (с краткими комментариями к ним) содержит т. I «Избранных научных трудов» Бора⁴. Вопросы развития Бором квантовой теории атома и принципа соответствия рассматриваются в известных монографиях М. Джеммера²⁰ и Ф. Хунда²¹. Большой фактический материал по этим вопросам имеется в монографии²². Отметим также сборник¹³ и биографию Бора²³. В перечисленных изданиях можно найти дальнейшие ссылки на материалы о научном творчестве Бора.

Необходимо сразу подчеркнуть, что в теории Бора следует различать две ее части, два ее аспекта^{24,25,26}: с одной стороны, основные ее предположения о существовании стационарных состояний и об оптических (излучательных) квантовых переходах между ними (два основных постулата Бора) и, с другой стороны, конкретную модель атома Бора — модельную теорию Бора, согласно которой движение электронов в стационарных состояниях рассматривается с помощью классической механики при дополнительных квантовых условиях (в простейшем случае одного электрона при условии квантования его момента импульса на круговых орбитах).

Первоначальную формулировку своих двух постулатов Бор дал уже в 1913 г. в первой части статьи ⁵, а затем уточнял ее на протяжении ряда лет (Бор всегда очень тщательно относился к своим формулировкам), в частности в ч. I статьи ⁹ в 1918 г. и в статье ¹¹ в 1921 г. В статье ¹² в 1923 г. Бор специально весьма подробно рассмотрел эти постулаты, а в 1926 г. в статье «Атом» в Британской энциклопедии привел их в окончательной сжатой формулировке:

«1. Атомная система устойчива только для определенной совокупности состояний, «стационарных состояний», которая в общем случае соответствует дискретной последовательности значений энергии атома. Каждое изменение этой энергии связано с полным «переходом» атома из одного стационарного состояния в другое.

2. Способность атома поглощать и испускать излучение подчиняется закону, по которому излучение, связанное с переходом, должно быть мономатрическим и иметь частоту ν_{rad} , определяемую соотношением

$$E_1 - E_2 = h\nu_{\text{rad}}, \quad (1)$$

где h — постоянная Планка и E_1 и E_2 — энергия двух соответствующих стационарных состояний» (²⁷, р. 263) *).

Постулаты Бора были всесторонне подтверждены экспериментально, в частности классическими опытами Франка и Герца, и была доказана их применимость как для атомов, так и для молекул (а впоследствии и для атомных ядер). Они получили теоретическое обоснование в квантовой механике и в квантовой электродинамике, а само название «постулаты» сохранило лишь исторический смысл. Именно на постулатах Бора, как характерных квантовых законах, являющихся следствиями последовательной квантовой теории, основывается современная спектроскопия ²⁸. Эта часть теории Бора, сформулированная в его постулатах, полностью сохранила свое значение и в настоящее время входит неотъемлемым образом в основы физики микроскопических явлений.

Иное положение в истории квантовой теории занимает другая часть теории Бора — его модель атома. Данная модель была успешно применена Бором к атому водорода и водородоподобным ионам, а в дальнейшем развивалась самим Бором и особенно А. Зоммерфельдом, сформулировавшим обобщенные квантовые условия (обычно называемые правилами Бора — Зоммерфельда). Однако модельная теория Бора встретила принципиальные трудности, связанными с неправомерностью классического описания движения и взаимодействия электронов в атомах и преодоленными лишь при создании квантовой механики. Именно Бор наиболее отчетливо представлял неудовлетворительность модельной теории строения атомов, несмотря на ряд ее успехов (в частности, в отношении периодической системы элементов и их спектров ^{11,29,30}). Он глубоко понимал необходимость создания последовательной и внутренне непротиворечивой квантовой теории. Модельная теория Бора была лишь промежуточным этапом на пути создания такой теории. Квантовая механика заменила, в применении к строению атомов и молекул, эту часть теории Бора.

К сожалению, имеется очень много примеров неправильного изложения теории Бора (ей особенно не повезло в этом отношении), при котором смешиваются два ее аспекта, не выделяются две ее части. Нередко в качестве одного из постулатов Бора приводится условие квантования круговых орбит, хотя сам Бор в своих формулировках не включал это условие относящееся к модельной теории, в число основных постулатов; он всегда приводил, начиная с 1918 г., лишь два постулата. Такая ошибка имеется, в частности, в т. 2

*) Для ясности мы в дальнейшем пользуемся обозначениями, частично отличающимися от обозначений в оригинальных работах. Здесь мы обозначаем частоту излучения как ν_{rad} (а не просто ν).

«Основ физики» Б. М. Яворского и А. А. Пинского (³¹, с. 237) и во «Введении в атомную физику» Л. Л. Гольдина и Г. И. Новиковой (³², с. 142 *); в этих книгах даются три постулата. О забвении формулировок самого Бора свидетельствует и тот факт, что в более поздних изданиях Британской энциклопедии в статье «Атом» ³⁴, заменившей статью «Атом» в предыдущих изданиях, написанную Бором ²⁷ и содержащую приведенную выше формулировку двух основных постулатов, даются четыре (!) постулата Бора.

Следует, однако, подчеркнуть, что в ряде известных книг теории Бора излагается совершенно правильно. К ним относятся, в частности, «Атомная физика» М. Борна ³⁵ и «Атомная физика» Э. В. Шпольского (т. 1) ³⁶. В последней книге отдельно излагаются постулаты Бора и модельная теория Бора (теория Бора — Зоммерфельда), что следует считать методически правильным. При этом Э. В. Шпольский говорит о теории Бора, подразумевая его модельную теорию. В данной статье мы под теорией Бора понимаем совокупность постулатов Бора и его модельной теории атома. Такая терминология представляется наиболее рациональной.

Исключительно важную роль, часто недооцениваемую, сыграло, при разработке Бором квантовой теории атома, развитие им принципа соответствия. Идею соответствия между квантовой и классической теориями в ее первоначальной форме Бор использовал уже в 1913 г. для вывода значения постоянной Ридберга (⁵, с. 94) способом, который считал наиболее убедительным. Эту идею он положил в основу статьи ⁹, а затем развивал и применял в последующих работах, как руководящую. Именно подход, основанный на принципе соответствия, привел, как известно, В. Гейзенберга, на которого идеи Бора оказали решающее влияние (см. ³⁷, S. 59), к созданию квантовой механики в матричной форме. Отметим также, что, как выяснилось уже после создания квантовой механики, квантовые условия модельной теории (правила Бора — Зоммерфельда) получаются как предельный случай в квазиклассическом приближении, в согласии с принципом соответствия.

Центральное место в данной статье занимает детальный анализ основополагающей первой части работы Бора 1913 г. ⁵ и его двух постулатов, а вопросы развития модельной теории, широко освещенные в историко-научной литературе, рассматриваются менее подробно. Значительное внимание уделено развитию Бором принципа соответствия, которое неразрывно связано с разработкой им квантовой теории атома.

2. ИСТОКИ РАБОТ БОРА ПО КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ АТОМА

Для понимания исследований Бора по квантовой теории атома, начатых им в середине 1912 г., применительно к предложенной Резерфордом в 1911 г. ³⁸ ядерной модели атома, — исследований, в которых Бор достиг решающих успехов в 1913 г. и которые потом развивал на протяжении десяти лет, весьма важно отчетливо представлять состояние квантовой теории и ее основных идей в то время. Существенно также знать, какими путями пришел Бор к своим первым исследованиям по теории атома.

Квантовая теория к 1911—1912 гг. уже достигла значительного развития сперва в работах М. Планка и А. Эйнштейна, а затем и ряда других ученых ^{20-22, 25, 39, 40}. Темой Первого Сольвеевского конгресса, состоявшегося осенью 1911 г. и собравшего наиболее выдающихся ученых-физиков того времени, была «Теория излучения и кванты» ^{41, 42}. На нем Планк выступил с докладом «Законы теплового излучения и гипотеза элементарного кванта

*) В котором авторы ошибочно считают, что Бор говорил лишь о разрешенных орбитах, а не о стационарных состояниях (понятие о которых Бор ввел уже в первой части статьи ⁵). Не избежал неточностей в изложении теории Бора и И. В. Савельев в т. 3 «Курса общей физики», формулируя первый постулат Бора не для стационарных состояний, а для «дискретных орбит, удовлетворяющих определенным квантовым условиям» (³⁸, с. 55).

действия»⁴³, а Эйнштейн — с докладом «К современному состоянию теории удельной теплоемкости»⁴⁴. Широко обсуждались вопросы теории теплового равновесного излучения, взаимодействия излучения и вещества применений квантовой теории к атомным системам.

Характерными для развития квантовой теории были идеи о дискретности энергии и процессов ее передачи: во-первых, *идея квантования энергии вещества*, во-вторых, *идея квантования энергии излучения*, в-третьих, связанная с обеими этими идеями *идея дискретности элементарных процессов взаимодействия излучения и вещества* — дискретности процессов испускания и поглощения излучения *).

Широкое распространение получила идея дискретности энергии вещества — квантования его энергии, впервые примененного Планком к гармоническим осцилляторам, моделирующим вещество, при выводе им в 1900 г. закона спектрального распределения энергии равновесного теплового излучения (закона излучения Планка). Как известно, в теории Планка полная энергия такого осциллятора, колеблющегося с частотой $\nu = \nu_{\text{vibr}}$ (энергия планковского «резонатора», испускающего и поглощающего электромагнитное излучение этой частоты), дискретна и определяется формулой

$$E = nh\nu_{\text{vibr}} \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (2)$$

где h — постоянная Планка («элементарный квант действия» как его назвал Планк в 1906 г.⁴⁵), характерная для микроскопических явлений. Формула (1) представляла решительный разрыв с классической теорией, что не сразу было осознано. Как отмечал впоследствии Бор, «на всеобщее значение теории Планка для обсуждения поведения атомных систем впервые указал Эйнштейн¹»⁴⁶, с. 88; ссылку¹ Бор дал на статьи Эйнштейна⁴⁶⁻⁴⁸). Именно Эйнштейн уже в 1906 г. отчетливо понял несовместимость «выделенных значений энергии», даваемых формулой (1), с классической теорией⁴⁷, с. 131, см. также⁴⁹), а в 1907 г. применил эту формулу к колебаниям атомов в твердом теле⁴⁸ и тем самым положил начало квантовой теории теплоемкостей, которую и рассматривал в докладе⁴⁴ на Сольвеевском конгрессе.

Существенно, что наряду с квантованием колебательного движения атомов стали квантовать и вращательное движение молекул. В. Нернст в 1911 г. указал на необходимость учета квантования вращательной энергии молекул в теории теплоемкостей, а Н. Бьерум в 1912 г. применил квантование также для объяснения структуры полос в инфракрасных спектрах поглощения (см. ссылки в^{14,39}). Бьерум приравнял энергию вращения молекулы J $(2I\nu_{\text{rot}})^2/2$, где J — момент инерции молекулы, величине $nh\nu_{\text{rot}}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) и получил дискретные частоты вращения $\nu = \nu_{\text{rot}} = nh/2I^2J$, которые он отождествил с частотами наблюдаемых спектральных линий. О квантовании энергии ротатора в общем виде говорил и Г. Лоренц в прениях по докладу Эйнштейна на Сольвеевском конгрессе в 1911 г.⁴⁴, с. 310). Он положил для нее $q\nu_{\text{rot}}^2 = nh\nu_{\text{rot}}$, где q — постоянная, а n — целое число, что дает частоты вращения $\nu_{\text{rot}} = nh/q$ и значения самой энергии $q\nu_{\text{rot}}^2 = n^2h^2/q$. Идея квантования вращательного движения была применена и для объяснения дискретности величины магнитного момента (так наз. магнетона Вейсса⁵⁰), исходя из предположения о связи магнитного момента с вращением электронов по круговым орбитам, с учетом роли постоянной h ¹⁹, р. 230). В частности, в том же 1911 г. Р. Ганс (см.⁵⁰, S. 952) приравнивал кинетическую энергию вращения электрона по круговой орбите радиуса r целому кратному величине $h\omega/2\pi$,

* Развитие понятий «квантов энергии» и «квантов излучения» было специально рассмотрено в монографии²¹ в разделе «Формирование квантовых представлений», а в монографии²² были четко выделены две линии развития квантовой теории, связанные с «квантами вещества» и с «квантами электромагнитного поля» соответственно. В статьях автора^{14, 25} были подчеркнуты три перечисленные идеи и было прослежено их значение в развитии квантовых представлений.

где ω — угловая скорость, что дает

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} m r^2 \omega^2 = \frac{nh\omega}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

(m — масса электрона). В результате эта энергия оказывается связанной с частотой обращения электрона по орбите (частотой вращения) $\nu_{\text{rot}} = \omega/2\pi$ формулой

$$E_{\text{rot}} = nh\nu_{\text{rot}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (4)$$

такой же, как у Лоренца и Бьерума, и аналогичной формуле Планка (2) для энергии колебаний гармонического осциллятора. Именно идея строго определенной и включающей постоянную h связи энергии вращения электрона в атоме по круговой орбите E_{rot} с частотой этого вращения ν_{rot} была применена Бором в 1912 г. (см. ниже, с. 264).

Следует отметить, что соотношение (3) сразу приводит к квантованию момента импульса электрона на круговой орбите $M = mr^2\omega = 2E_{\text{rot}}/\omega$, определяемому формулой $M = nh/\pi$, которая отличается от условия квантования круговых орбит в модельной теории Бора лишь множителем 2 (см. ниже, с. 277). Такой же результат получается и для величины магнетона, пропорциональной M (при сравнении с магнетоном Бора для $n = 1$).

Наряду с идеей квантования энергии вещества, идущей от Планка, Эйнштейном в 1905 г. в основополагающей статье⁴⁶ была выдвинута идея квантования энергии излучения в форме *гипотезы квантов света*. Согласно этой гипотезе энергия электромагнитного излучения («энергия света») «...складывается из конечного числа локализованных в точках пространства квантов энергии, которые движутся как неделимые и могут поглощаться и возникать только целиком»^(46, с. 93 *)). Величина квантов, как было обосновано Эйнштейном в этой статье при помощи статистических соображений, равна $h\nu_{\text{rad}}$, где ν_{rad} , в отличие от формул (2) и (4), частота самого излучения. Гипотеза квантов света резко противоречила классической электродинамике и большинство ведущих физиков того времени (в частности, принимавших участие в Первом Сольвеевском конгрессе) ее не признавали как в период 1911—1913 гг., так и на протяжении последующего десятилетия. Существенно, что наряду с предположениями Эйнштейна о корпускулярной структуре излучения идея о квантовании энергии излучения стала развиваться и в другой форме. Сначала Эренфест в 1906 г.⁵¹, а затем независимо Дебай в 1910 г.⁵² применили эту идею к квантованию собственных колебаний равновесного излучения в полости. Дебай смог вывести закон излучения Планка из свойств самого излучения, не прибегая к моделированию вещества резонаторами^{**}). Таким образом, к началу исследований Бора по квантовой теории атома идея квантования энергии излучения была известна как в форме гипотезы квантов света, так и в виде *предположения о квантовании собственных колебаний поля излучения*.

Для работ Бора по квантовой теории атома весьма важной оказалась идея дискретности элементарных процессов испускания и поглощения света, из которой он исходил в своих постулатах, формулируя условие частот (1). Дискретность испускания и поглощения согласно квантовой теории получалась уже как следствие дискретности энергии планковского резонатора, в соответствии с законом (2) квантования энергии гармонического осциллятора. Изменение энергии такого осциллятора может быть равно лишь величине $\epsilon = h\nu_{\text{vibr}}$ или кратной ей^{***}). Следует, однако, подчеркнуть, что наи-

*) Перевод этой цитаты, как и некоторых других, уточнен.

**) Дебай применил вероятностный метод, аналогичный методу, использованному Планком в 1900 г., сразу к задаче о распределении энергии излучения по квантованным собственным колебаниям этого излучения.

***) Лишь впоследствии выяснилось, что для гармонического осциллятора имеет место (для дипольного излучения) правило отбора $\Delta n = \pm 1$, в результате которого $\nu_{\text{rad}} = |\Delta n| \nu_{\text{vibr}} = \nu_{\text{vibr}}$.

более естественным образом дискретность передачи энергии порциями $h\nu_{\text{рад}}$ при взаимодействии излучения с веществом вытекала из гипотезы квантов света Эйнштейна. Именно в работе ⁴⁶ 1905 г. он объяснил на основе этой гипотезы закон Стокса, дал знаменитое уравнение для фотоэффекта и рассмотрел ионизацию молекул отдельными квантами света.

Представление о дискретном испускании и поглощении излучения «квантами энергии» $h\nu_{\text{рад}}$ подтверждалось многочисленными опытными данными и стало широко применяться учеными при исследованиях разнообразных процессов взаимодействия с веществом; отметим, что И. Штарк рассматривал испускание порций электромагнитной энергии $hc/\lambda = h\nu_{\text{рад}}$ (c — скорость света, λ — длина волны) при захвате электрона атомом на эллиптические орбиты, все более приближающиеся к центру атома (об этих работах Штарка и их роли при формулировке Бором в 1913 г. условия частот (1) см. ³⁹, S. 93, 173). Характерным стало сочетание идеи квантования энергии вещества и идеи дискретности элементарных процессов взаимодействия излучения с веществом. На основе такого сочетания и новых фундаментальных идей, внесенных Бором в квантовую теорию в его постулатах и принципе соответствия, с 1913 г. начался период развития этой теории, для которого главным направлением была разработка теории атома и его спектров. В данном направлении вели исследования сам Бор, Зоммерфельд и целый ряд других ученых.

Другим направлением развития квантовой теории, в значительной степени независимым, было направление, связанное с идеей квантования энергии излучения в форме гипотезы квантов света, в котором Эйнштейн продолжал работать. В 1909 г. он рассмотрел корпускулярно-волновой дуализм для излучения, а затем выполнил и ряд других работ, связанных с квантовой теорией излучения (о значении этих работ см. в статье ⁴⁹). Бор длительное время (вплоть до 1925 г.) не соглашался с гипотезой квантов света, но высоко ценил работы Эйнштейна. В 1918 г. в статье по принципу соответствия ⁹ Бор применил результаты рассмотрения Эйнштейном вероятностей квантовых переходов (см. ниже с. 288).

Рассмотрим теперь отношение Бора к квантовой теории в 1911—1912 гг., т. е. в период, предшествовавший началу его исследований по квантовой теории атома (подробнее см. ¹⁹).

В мае 1911 г. Бор успешно защитил в Копенгагене диссертацию «Исследования по электронной теории металлов» (она была тогда опубликована только по-датски; см. ¹⁵, р. 167; там же дан английский перевод, р. 291). В этой диссертации Бор опирался на работы Лоренца 1905 г. по статистической теории свободных электронов в металлах ⁵³ и поставил задачу «...попытаться выполнить расчеты различных явлений, которые объясняются присутствием свободных электронов в металлах, в самой общей возможной форме, находящейся в согласии с принципами теории Лоренца» (¹⁵, р. 299). Весьма интересно, что Бор пришел к выводу о недостаточности классической механики при рассмотрении взаимодействий связанных электронов. Он писал: «...Хотя, с одной стороны, кинетическая теория газов получила необычайные результаты, допуская, что силы между индивидуальными молекулами являются механическими, имеется, с другой стороны, много свойств тел, которые невозможно объяснить, если принять, что силы, действующие внутри индивидуальных молекул (которые, согласно обычной точке зрения, состоят из систем, содержащих большое число «связанных» электронов), также являются механическими» (¹⁵, р. 175). В отношении теории теплового излучения Бор считал, что закон излучения Рэлея — Джинса (для электронов проводимости в металле полученный на основе классической теории Лоренцом ⁵⁴) неприменим для коротковолновой области спектра. Бор сделал вывод: «Причина неудачи весьма вероятно та, что электромагнитная теория не согласуется с действительными условиями в веществе и может дать правильные результаты только в применении к большому числу электронов (как в обыч-

ных телах) или для определения средней скорости отдельного электрона за сравнительно большое время (как при расчете движения катодных лучей), но не может применяться для исследования движения отдельного электрона за короткое время» (15, р. 378). Именно такие расчеты делал Лоренц в статье 54. Бор в своей диссертации рассмотрел также теорию магнетизма Ланжевена; он пришел к заключению о неприменимости классической механики для объяснения магнетизма и сопоставлял это с «ультрафиолетовой катастрофой» (т. е. с неприменимостью классического закона излучения Рэлея — Джинса для коротковолновой области спектра). Объяснение магнетизма в электронной теории было связано с представлениями об орбитальном движении связанных электронов в атомах, что подводило Бора к вопросам квантовой теории атома (см. 19, р. 222).

После защиты диссертации Бор поехал для усовершенствования на год в Англию, выбрав в качестве места стажировки (по современной терминологии) знаменитую Кавендишскую лабораторию в Кембридже, руководимую Дж. Дж. Томсоном. Томсон много занимался электронной теорией и предложил в 1904 г. свою модель атома 55, которая стала весьма популярной и широко применялась. Бор приехал в Кембридж в сентябре 1911 г., продолжая интересоваться электронной теорией.

В частности, его интересовала так называемая «дублетная модель», предложенная Томсоном в 1910 г. для объяснения фотоэффекта 56. Согласно этой модели электрон движется по круговой орбите под действием электрического диполя с моментом P , вокруг оси этого диполя. Для возможных орбит кинетическая энергия электрона $mv^2/2$ оказывается равной $A\nu_{\text{rot}}$, где ν_{rot} — частота обращения электрона по орбите, а A — постоянная, пропорциональная P и по оценке Томсона близкая по порядку величины к постоянной Планка h . Соотношение

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} mv^2 = h\nu_{\text{rot}}, \quad (5)$$

может рассматриваться как условие, определяющее состояние электрона в атоме. Именно аналогичное условие применил Бор впоследствии в первом наброске квантовой теории атома летом 1912 г. (см. ниже, с. 264).

Бор рассчитывал обсудить с Томсоном вопросы электронной теории, однако, последний не проявил интереса к соображениям Бора (об этом свидетельствует письмо Бора его брату Харальду от 23 октября 1911 г.; см. 15, р. 527). В лаборатории Томсона Бор занимался экспериментальными исследованиями электрических разрядов и вместе с тем продолжал свои теоретические исследования по электронной теории. Об этих исследованиях он подробно писал своему другу Усену в конце 1911 г. и закончил это письмо следующим образом *): «В данный момент я полон энтузиазма в отношении квантовой теории (подразумеваемая ее экспериментальную часть), но я еще не уверен, что это не обусловлено моим незнанием. Я могу сказать то же самое, в гораздо большей степени, о моем отношении к теории магнетонов. Смотря вперед, я буду стараться выяснить все эти вещи в следующем семестре». Как раз перед этим был опубликован доклад П. Вейсса о магнетонах 50 (с краткой дискуссией по нему, в которой принял участие Ганс) и, видимо, Бор имел в виду этот доклад.

Бор работал в Кембридже, продолжая заниматься электронной теорией, до марта 1912 г., когда переехал в Манчестер для работы в лаборатории Резерфорда, где он и начал свои фундаментальные исследования по квантовой теории атома.

Бор впервые увидел Резерфорда, слышал его выступление и познакомился с ним в конце 1911 г. Личность Резерфорда произвела на Бора большое впечатление и он решил поехать в Манчестер на оставшееся время своей стажировки в Англии. Предварительно договорившись об этом с Резерфордом

*) Письмо от 1 декабря 1911 г.; цитируется по 19, р. 230.

при личной встрече (см.⁵⁷, с. 546), Бор писал ему 18 января 1912 г. из Кембриджа (1, р. 576): «Я теперь определил свои планы пребывания здесь в Англии и говорил о них с проф. Томсоном. Мое намерение — остаться здесь в Кембридже на этот семестр и выполнить некоторую теоретическую работу, а затем, если это Вас устроит, я был бы очень рад приехать в Манчестер в конце марта и работать в Вашей лаборатории». 27 января 1912 г. Резерфорд ответил Бору: «Я буду рад разрешить Вам работать в моей лаборатории, если Вы решили уехать из Кембриджа. Я думаю, что для Вас будет лучше всего взять отпуск в конце марта, так как я, вероятно, буду отсутствовать большую часть апреля на каникулах. Я вероятно мог бы, однако, организовать для Вас некоторую предварительную работу в апреле для получения практики в радиоактивных методах». Бор не стал откладывать переезда в Манчестер и приехал туда уже в середине марта.

3. НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЙ. РЕЗЕРФОРДОВСКИЙ МЕМОРАНДУМ: РАЗМЕРЫ АТОМА И КВАНТ ДЕЙСТВИЯ (1912 Г.)

В лаборатории Резерфорда в Манчестере Бор стал знакомиться с экспериментальными исследованиями по радиоактивности, а затем и мае начал свою экспериментальную работу по этим вопросам, связанную с радием, и систематически встречался с Резерфордом. Вместе с тем главное внимание Бора продолжали привлекать вопросы электронной теории металлов, о чем свидетельствуют его письма брату 27 и 28 мая 1912 г. (15, р. 549). Он надеялся объяснить «различные трудности общего характера» и планировал «написать немного об этом».

Однако начиная с июня 1912 г. Бор стал весьма активно работать по теории прохождения заряженных частиц через вещество, а затем и по вопросам строения атомов и молекул. Он опирался уже на модель атома Резерфорда, которая находилась в центре внимания работ манчестерской лаборатории и с которой Бор, естественно, познакомился. До этого он был хорошо знаком с моделью атома Томсона⁵⁵, которой и пользовался в своей предшествующей теоретической работе.

О решительной перемене направления исследований Бора, оказавшейся исключительно важной для развития квантовой теории, можно судить по его письму брату 12 июня 1912 г., в котором он писал (15, р. 555): «... Пару дней тому назад мне пришла небольшая идея в отношении понимания поглощения α -лучей (это произошло так: здесь молодой математик, Ч. Г. Дарвин..., как раз опубликовал теорию об этой проблеме и я полагаю, что она не только не совсем правильна математически (однако лишь немного ошибочна), но и весьма неудовлетворительна в ее основных представлениях), и я разработал небольшую теорию об этом, которая, даже если она и не очень значительна, возможно сможет немного осветить некоторые вопросы, связанные со строением атомов. Я предполагаю опубликовать очень скоро небольшую статью об этом». Далее Бор отмечает, что Резерфорд за последние годы «разработал теорию строения атома, которая, по-видимому, имеет гораздо более прочную основу, чем что-либо имевшееся у нас ранее. И хотя моя теория не того рода и значения, все же мои результаты неплохо согласуются с его (ты понимаешь, что я подразумеваю только, что основа моих небольших расчетов может быть приведена в согласие с его идеями)».

Работавший у Резерфорда Дарвин в статье⁵⁸, о которой упоминает Бор, сделал два предположения, подвергшиеся критике последним: что при кратковременном взаимодействии α -частицы, проходящей через атом, можно пренебречь силами, действующими внутри атома на связанный электрон, и что скорость α -частицы не меняется, если она непосредственно не проходит сквозь атом, а лишь пролетает мимо. Бор разработал теорию, в которой учитывалась передача энергии от заряженной частицы, проходящей через вещество, связанному внутри атома электрону. За июнь — август 1912 г. он

подготовил статью «Теория торможения заряженных частиц при их прохождении через вещество», которую обсуждал с Резерфордом. Статья была направлена в печать в августе 1912 г. (тогда Бор передал ее Резерфорду) и опубликована в начале 1913 г.⁵⁹ Именно с этой работы начались исследования Бора по атомной физике*).

В статье⁵⁹ Бор рассматривает столкновения α - и β -частиц с атомами и исходит из модели атома Резерфорда, о которой он пишет: «...Предполагается, что атомы вещества состоят из облака электронов, удерживаемых силами притяжения к ядру. Далее, предполагается, что на это ядро, которое обладает положительным зарядом, равным сумме зарядов электронов, приходится основная часть массы атома, а его размеры чрезвычайно малы по сравнению с размерами атома. По этой теории α -частица представляет собой просто ядро атома гелия»⁵⁹, с. 63). После критики статьи Дарвина⁵⁸ Бор излагает свою теорию передачи энергии связанному электрону от быстро движущейся заряженной частицы. При этом он делает предположения о характеристиках орбит электронов и движения электронов по этим орбитам, согласно модели атома Резерфорда**)(⁵⁹, с. 73).

Применяя разработанную теорию к экспериментальным данным о поглощении α -лучей, Бор получает согласие с предположением о числе электронов, равном 2 для двухатомной молекулы водорода и для атома гелия и равном 16 для двухатомной молекулы кислорода (что соответствует зарядам ядра $Z = 1$ для атома H, $Z = 2$ для атома He и $Z = 8$ для атома O). Для алюминия, олова, золота и свинца Бор получил числа электронов в атоме (следовательно, Z), равные 14, 38, 61 и 65 соответственно.

Бор отмечает: «Согласно резерфордовской модели атома, мы должны ожидать, что на молекулу кислорода приходится 16 электронов. Согласие между этим значением и приведенной выше величиной является вполне удивительным»⁵⁹, с. 78; из опыта Бор вычислил значение 18 вместо 16). Имеются все основания предполагать, что Бор уже связывал значение заряда ядра, равное 8, с положением кислорода как восьмого элемента в периодической системе, теорией которой, на основе модели атома Резерфорда, он в это время очень интересовался, см. ниже, с. 263.

В заключении по статье⁵⁹ Бор пишет: «Принимая теорию Резерфорда о строении атома, можно с большой уверенностью утверждать на основании данных о поглощении α -лучей, что атом водорода содержит один электрон, а атом гелия — два электрона вне положительно заряженного ядра; последнее обстоятельство непосредственно следовало из теории Резерфорда». Видимо, отсутствие в заключении выводов о числе электронов (и, следовательно, о заряде ядра) в других атомах было результатом обсуждения статьи с Резерфордом, который всегда проявлял большую осторожность по отношению к выводам из теории.

Исследования Бора по теории торможения заряженных частиц подвели его вплотную к проблеме строения атомов и молекул, которой он стал весьма активно заниматься. Бор быстро начал получать результаты в данной области.

Уже 19 июня 1912 г. Бор писал брату (¹⁵, р. 559): «Возможно я нашел что-то небольшое о строении атомов... Это все возникло на основе небольшой

*) Отметим, что Бор, перейдя затем к разработке квантовой теории атома, продолжал интересоваться и прохождением заряженных частиц через вещество. Он опубликовал в 1915 г. статью⁶⁰, а в 1925 г. уделял внимание этим вопросам в статье⁶¹. Уже после создания квантовой механики и появления ряда работ по квантовомеханической теории столкновений Бор в 1948 г. произвел анализ многочисленных типов столкновений, сопровождающих прохождение атомных частиц через вещество, подчеркивая квантовые и классические стороны явления⁶², а в 1954 г. опубликовал, совместно с Дж. Линдхардом, статью⁶³.

***) Что Бор уже не исходил из представления о гармонических колебаниях электронов согласно модели атома Томсона (как ошибочно считали авторы статьи¹⁹, р. 249), а опирался на модель атома Резерфорда, убедительно показал анализ статьи⁵⁹, выполненный Хойером (¹⁷, S. 180) с привлечением архивных данных.

информации, которую я получил из поглощения α -частиц (небольшая теория, о которой я сообщал тебе в последнем письме *)). Ты понимаешь, я еще могу ошибаться, потому что это пока не разработано окончательно (я полагаю, однако, что не ошибаюсь); не верю я, что и Резерфорд считает это совсем сумасшедшим; но он правильный человек и никогда не скажет, что убежден в чем-то не разработанным полностью».

Для обсуждения своих результатов с Резерфордом Бор подготовил материал. Он направил его в июле 1912 г. Резерфорду с письмом, в котором писал: «Я сожалею, что посылаю это так поздно, но я увидел некоторые трудности в объяснении экспериментальных результатов, касающихся дисперсии, которые я не видел раньше, и мне еще не удалось привести это опять в порядок. Я посылаю замечания, касающиеся строения и устойчивости молекул, которые Вы любезно просили» (1, р. 577).

Данный материал, сохранившийся в боровском архиве с надписью самого Бора «Первый черновик соображений, содержащихся в статье «О строении атомов и молекул» (написанный, чтобы показать соображения проф. Резерфорду)», представляет большой интерес. В статье ¹⁹ Хейльброн и Кун назвали этот материал «резерфордовским меморандумом», а статья ⁵ 1913 г. «О строении атомов и молекул», состоящая из трех частей, была названа ими «трилогией». Такая терминология потом была применена в т. 2 Собрания трудов Бора ¹ и мы будем пользоваться ею в дальнейшем. В ¹ рукопись резерфордовского меморандума (написанная по-английски) воспроизведена факсимильно, а также дана в перепечатанном виде. Она содержит текст и ряд расчетов энергии электронов в атомах и простейших молекулах, а также схематические рисунки, иллюстрирующие соответствующую электронную структуру рассматриваемых моделей.

В начале меморандума Бор пишет: «Согласно модели атома, предложенной проф. Резерфордом, с целью объяснить «большое рассеяние» α -частиц, атомы состоят из положительного заряда, сосредоточенного в точке (на протяжении, очень малом по сравнению с размерами атомов) и окруженного системой электронов, общий заряд которых равен заряду положительного «ядра» [Бор пользуется немецким термином «Kern»]; ядро также считается местом сосредоточения массы атома» (1, р. 136). Бор сразу подчеркивает весьма важное свойство этой модели: «В таком атоме не может быть равновесной конфигурации, без движения электронов. (Ничего не задано для определения величины размеров, «длины».)» Существенно, что впоследствии, во введении к ч. I трилогии (⁵, с. 84), Бор специально отметит отсутствие характерной длины для модели атома Резерфорда, в отличие от модели атома Томсона, для которой имеется такая длина — радиус положительно заряженного шара (см. ниже, с. 270).

Подобно Томсону в его модели Бор рассматривает распределение электронов в атоме на коаксиальных кольцах (на равных угловых интервалах), но уже на основе модели атома Резерфорда. Он ставит вопрос об «условиях устойчивости кольца из n электронов, вращающихся вокруг точечного положительного заряда величины $n \times e$ » и приходит к выводу, что «кольцо, подобное рассматриваемому, не обладает стабильностью в обычном механическом смысле» и что «вопрос об устойчивости должен поэтому рассматриваться с совсем отличной точки зрения».

Бор подчеркивает отличия моделей атома Томсона и Резерфорда и указывает, что при помощи модели атома Резерфорда, по-видимому, можно дать «возможное объяснение периодического закона химических свойств элементов» (химические свойства предполагаются зависящими от устойчивости самого внешнего кольца, «валентных электронов»), тогда как на основе модели Томсона «представляется невозможным дать удовлетворительное объяснение периодического закона».

*) Речь идет о письме от 12 июня; см. выше, с. 261.

Бор выполнил расчеты энергии электронов кольца, определив их кинетическую, потенциальную и полную энергии как функции их числа (рассматривая кулоновское взаимодействие), и получил в результате, что кольцо механически устойчиво при $n \leq 7$ и неустойчиво при $n > 7$. Этим он обосновывал образование в сложных атомах ряда колец, внутренних и внешних. Данный результат был ошибочен (см. ¹⁹, р. 246) и противоречил известному соотношению между кинетической энергией E_{kin} и потенциальной энергией E_{pot} , $E_{\text{pot}} = -2E_{\text{kin}}$, справедливому для кулоновского взаимодействия заряженных частиц и дающему для полной энергии E формулу

$$E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} = -E_{\text{kin}} = E_{\text{pot}}/2. \quad (6)$$

Сам Бор в последней части своего меморандума вывел соотношение $E_{\text{pot}} = -2E_{\text{kin}}$ для «системы электрически заряженных частиц, которые обладают осью симметрии (общей осью вращения)» (¹, р. 142), т. е. получил частный случай теоремы вириала. Однако Бор, видимо в спешке при подготовке меморандума, не заметил противоречия.

Несмотря на неправильное обоснование, идея разделения электронов в атоме на группы оказалась справедливой и успешно использовалась Бором в дальнейшем при развитии им физической теории периодической системы. Начало этому развитию было положено Бором именно в меморандуме.

Самым важным в меморандуме было применение Бором квантовой теории в виде «специальной гипотезы $E = K\nu$ » (¹, р. 141; подчеркнуто Бором), где E — кинетическая энергия электрона, движущегося по круговой орбите с частотой обращения $\nu = \nu_{\text{rot}}$, а K — *квантовая постоянная размерности действия*, имеющая порядок постоянной Планка h . Мы запишем это соотношение в виде

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{rot}} = K\nu_{\text{rot}} = \alpha h\nu_{\text{rot}}, \quad (7)$$

где α — численный множитель. Сам Бор в меморандуме не приводит значения K , но из анализа примененных им формул и численных значений других постоянных следует, что он пользовался значением K , приближенно равным $0,6h$ (т. е. $\alpha = 0,6$; см. ¹⁸, р. XXX, и ¹⁹, р. 250).

Формула (7) аналогична формулам типа (4) (при $n = 1$) и (5), которые были известны Бору, однако Бор не положил просто $K = h$ и предпочел, по-видимому, определить K из опытных данных. При значении $\alpha = 1/2$ из соотношения $E_{\text{rot}} = m\nu^2\omega^2/2 = h\nu_{\text{rot}}/2 = h\omega/4\pi$ (ср. (3)) получается величина момента импульса $M_0 = h/2\pi$ — условие квантования круговой орбиты для основного состояния электрона в атоме водорода, которое появилось у Бора позже, в ч. I его трилогии (⁵, с. 97), притом как следствие общих соображений, основанных на идее принципа соответствия.

Весьма интересно обоснование Бором своей гипотезы, которое он дает после рассмотрения в начале меморандума вопроса об устойчивости модели атома Резерфорда. Он пишет:

«В исследовании конфигурации электронов в атомах мы сразу встречаемся с трудностью (связанной с упомянутой неустойчивостью), что кольцо, если только величина центрального заряда и число электронов заданы, может вращаться с бесконечно большим числом различных времен вращения, соответствующих принятым различным радиусам кольца; и представляется, что нет ничего (вследствие неустойчивости), позволяющего из механических соображений сделать выбор между различными радиусами и временами колебания *). В дальнейшем исследовании мы поэтому введем и будем применять гипотезу, согласно которой мы сможем определить рассматриваемые величины. Эта гипотеза следующая: для любого устойчивого кольца (любого кольца, встречающегося в естественных атомах) будет иметься определенное

*) Речь идет о временах вращения.

соотношение *) между кинетической энергией электронов в кольце и временем вращения. Эта гипотеза, для которой не будет сделана попытка механического обоснования (поскольку это кажется безнадежным **)), выбрана лишь как единственная, видимо открывающая возможность объяснения целой совокупности экспериментальных результатов, которые объединяются и кажутся подтверждающими представления о механизме излучения, предложенные Планком и Эйнштейном» (1, р. 137).

Бор далее указывает, что его гипотеза может объяснить: «1) периодический закон атомных объемов элементов; 2) закон Уиддингтона связи между скоростью, необходимой для возбуждения характеристических рентгеновских лучей элемента, и атомным весом этого элемента; 3) (приблизительно) закон

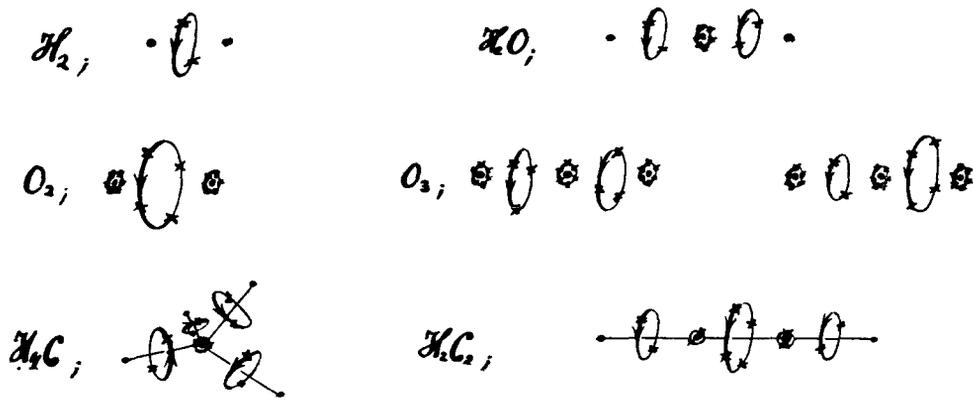


Рис. 1. Электронное строение простейших молекул (H_2 , H_2O , O_2 , O_3 , CH_4 , C_2H_2)

Брэгга для поглощения α -лучей разными элементами; 4) по-видимому, объясняет устойчивость и теплоту образования некоторых простых соединений».

В меморандуме Бор уделяет большое внимание электронной структуре и свойствам простейших молекул (ср. его письмо Резерфорду, см. выше, с. 263). Он дает схему строения таких молекул (рис. 1), согласно которой электроны (показанные крестиками) движутся по кольцам, перпендикулярным оси молекулы (в случае метана CH_4 — линиям, соединяющим ядро углерода с ядрами водорода).

Отметим, что часть электронов показана находящимися на кольцах меньших размеров около ядер кислорода и углерода. Общее число электронов соответствует зарядам ядер, равным 1 для водорода, 6 для углерода и 8 для кислорода (лишь для молекулы ацетилена C_2H_2 не хватает двух электронов на центральном кольце до шести, как должно быть для тройной связи).

Для водорода и гелия Бор выполнил расчеты энергии для атомов H и He и для соответствующих молекул H_2 и He_2 и показал, что молекула H_2 устойчива (ее энергия оказалась меньше энергии двух изолированных атомов H), а молекула He_2 неустойчива (ее энергия больше энергии двух изолированных атомов He).

При этих расчетах Бор рассматривал кулоновские взаимодействия для электронов, движущихся по кольцам в соответствии с принятыми моделями,

*) Бор пишет ошибочно «ratio» (отношение) вместо «relation» (соотношение, связь). Отношение, определяемое формулой (7), имеется между кинетической энергией электрона и частотой, т. е. величиной, обратной времени вращения.

**) Здесь Бор дает примечание, где указывает, что этого следовало ожидать, «поскольку представляется строго доказанным, что механика не способна объяснить экспериментальные факты в проблемах, касающихся отдельных атомов», а затем пишет: «По аналогии с тем, что известно для других проблем, представляется, однако, законным применять механику при исследовании поведения системы, если мы только отвлечемся от вопросов устойчивости (или конечного статистического равновесия)».

и использовал условия механического равновесия. Для нахождения численных значений энергии он применил гипотезу (7), причем значение постоянной K соответствует значению резонансной частоты молекулярного водорода, определенной из опытов по преломлению и дисперсии (см. ¹⁹, р. 251, а также работы Бора ⁵⁹, с. 75, и ⁵, с. 138, где приводится значение резонансной частоты).

Применение в Резерфордском меморандуме соотношения (7), основанного на идее дискретности энергии вещества, к модели атома Резерфорда явилось началом исследований Бора по квантовой теории атома. К осени 1912 г., вернувшись в Копенгаген и работая в Копенгагенском университете, Бор занимался подготовкой статьи о строении атомов и молекул и преодолевал возникавшие у него трудности. 4 ноября 1912 г. он писал Резерфорду: «Я сожалею, что не был еще в состоянии окончить мою статью об атомах и послать ее Вам, но до сих пор я был так занят лекциями и лабораторными работами (ассистируя проф. Кнудсену), что у меня оставалось лишь очень мало времени... Я надеюсь, что смогу окончить статью за несколько недель» (¹, р. 577). Бор задержался с окончанием статьи до марта 1913 г., но к этому времени ему удалось очень сильно продвинуться вперед и достигнуть решающего успеха в создании квантовой теории атома.

4. РЕШАЮЩИЕ УСПЕХИ БОРА: ТЕОРИЯ АТОМА ВОДОРОДА И ОБЪЯСНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ, ПЕРВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИДЕИ СООТВЕТСТВИЯ (1913 Г.)

Для периода подготовки «статьи об атомах» (о которой Бор писал Резерфорду 4 ноября 1912 г. — его будущей трилогии ⁵) было характерным, вплоть до начала февраля 1913 г., рассмотрение Бором состояний атомов и молекул с наименьшей энергией — основных состояний, как мы их теперь называем. При этом Бор применял, для нахождения определенных значений энергии таких состояний, квантовое условие типа (7) к атомным системам, образованным из ядер и электронов, взаимодействующих по закону Кулона. Таким образом, он сочетал модель атома Резерфорда с идеей квантования энергии вещества (для которой исходной явилась планковская формула квантования гармонического осциллятора (2); см. выше, с. 257), ограничиваясь, однако, определением значения энергии конкретной атомной системы в основном состоянии, т. е. минимальной возможной энергии.

Для движения электрона по круговой орбите в простейших атомах H и He и молекулах H₂ и He₂, энергию которых Бор вычислял в Резерфордском меморандуме, применение условия (7) соответствовало использованию формулы типа (4) с $n = 1$ (когда кинетическая энергия вращения электрона минимально возможная). В своих расчетах Бор применял условие (7) как универсальное. Из этого вытекала и универсальность величины момента импульса $M_0 = 2E_{\text{rot}}/\omega = 2chv_{\text{rot}}/2\pi v_{\text{rot}} = ch/\pi$ (т. е. равного $h/2\pi$ при $\alpha = 1/2$, ср. выше, с. 258) для отдельных электронов в основном состоянии атомной системы, движущихся по круговым орбитам наименьшего радиуса (см. ¹⁷, S. 193, где рассмотрен вопрос об универсальном постоянстве момента импульса в первых исследованиях Бора по квантовой теории атома). Предположение о том, что момент импульса каждого электрона в основном состоянии любой атомной системы, состоящей из ядер и электронов, равен $h/2\pi$, Бор впоследствии сделал в своей трилогии (⁵, с. 106, 148) и пользовался им в дальнейшем. Однако, в трилогии это предположение получилось как следствие более общих предположений, а не было просто постулировано (см. ниже, с. 277).

О состоянии работы Бора по подготовке статьи в конце января и в начале февраля 1913 г. известно из его писем Резерфорду, Усену и Хевеши. В это время он по-прежнему занимался вопросом об основных состояниях атомов и молекул, но его внимание было уже привлечено к процессам испускания

излучения атомами — к атомным спектрам, т. е. к возбужденным состояниям атомов (по современной терминологии). В конце 1912 г. Бор познакомился со статьями астрофизика Дж. Никольсона⁶⁴, который применил квантовые идеи для объяснения неидентифицированных спектральных линий в спектрах туманностей и солнечной короны (о работах Никольсона см.⁶⁵, а также¹⁹, р. 258, и²⁰, р. 72).

Никольсон исходил из «подобной Сатурну» модели атома Нагаока (как известно, предшествовавшей модели атома Резерфорда), состоящей из центрального тяжелого положительного заряда и вращающегося вокруг него электронного кольца. Отношение энергии кольца к частоте его вращения Никольсон положил равным целому кратному постоянной Планка h и предположил, что дискретные частоты наблюдаемых спектральных линий ν_{rad} совпадают с частотами ν_{vibr} механических колебаний (перпендикулярных плоскости орбиты) и соответствуют испусканию квантов энергии $h\nu_{\text{rad}}$. Сами линии Никольсон приписывал гипотетическим элементам «небулию» и «протофлуорину» с зарядами положительного ядра $4e$ и $5e$. Таким образом, Никольсон применил идеи квантования энергии вещества и дискретности процессов испускания излучения.

Впервые о работах Никольсона Бор писал 23 декабря 1912 г. своему брату в рождественском поздравлении (¹⁵, р. 563): «P.S. Хотя это и не подобает рождественской открытке, но один из нас *) хотел бы сказать, что он не считает теорию Никольсона несовместимой со своей собственной. Действительно, его расчеты будут справедливы для конечного, классического состояния атомов, в то время как Никольсон имеет дело с атомами, испускающими излучение, когда происходит процесс потери энергии электронами до того, как они займут свои окончательные положения. Излучение будет тогда происходить импульсами (в пользу чего говорит многое) и Никольсон рассматривает атомы, когда их энергия еще так велика, что они испускают свет в видимой области спектра. Позже свет испускается в ультрафиолетовой области, пока, наконец, вся энергия, которая может быть излучена, не будет потеряна...». Описанная картина соответствует тому, что Никольсон писал о потере энергии атомом: «Если он теряет свою энергию определенными количествами, а не непрерывным образом он должен давать серию спектральных линий, соответствующих каждой из ступеней. Более того, его неспособность излучать энергию непрерывным образом будет обеспечивать резкость линий» (⁶⁴, р. 730). Мы видим, что Бор уже составил себе представление о скачкообразной потере энергии атомом в процессе захвата электронов в основное состояние. Это представление получило обоснование, когда в ч. I трилогии Бор постулировал существование стационарных состояний с дискретными значениями энергии, основного и возбужденных (см. ниже, с. 272).

В очень интересном письме Резерфорду 31 января 1913 г. Бор писал (¹, р. 576):

«Я надеюсь очень скоро быть в состоянии послать Вам мою статью об атомах; она заняла гораздо больше времени, чем я думал; я полагаю, однако, что я достиг некоторого прогресса за последнее время.

Мне теперь гораздо более ясны основания моего рассмотрения и я думаю, что теперь я также лучше понимаю связь и различие между моими вычислениями и напр. вычислениями, подобными опубликованным в недавних статьях Никольсона о спектрах звездных туманностей и солнечной короны».

Далее Бор сопоставляет подходы Никольсона и свой: «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 систем он, как и я, ищет основу в соотношении между энергией и частотой, предложенном

*) То есть сам Бор.

в планковской теории излучения *). Состояние систем, рассматриваемых при моих вычислениях, характеризуется, однако,— из числа состояний, согласующихся с данным соотношением,— как такое состояние, в котором системы обладают наименьшим возможным количеством энергии, т. е. такое состояние, при образовании которого излучается наибольшее возможное количество энергии.

Поэтому мне представляется, в качестве разумной гипотезы, допущение, что состояние систем, рассматриваемых при моих вычислениях, следует отождествлять с постоянным (естественным) состоянием атомов. (Эта гипотеза представляется оправданной согласием между теорией и экспериментами по атомным объемам и рентгеновским лучам, которое я получил с самого начала и которое я пытался проследить и дальше).

Согласно данной гипотезе состояния системы, рассматриваемые Никольсоном, наоборот, обладают меньшей устойчивостью; они являются состояниями, проходимыми при образовании атомов, и состояниями, в которых излучается энергия, соответствующая линиям спектра, характерным для данного элемента. С этой точки зрения системы в состоянии, подобном рассматриваемому Никольсоном, имеются в заметном количестве лишь в местах, где атомы непрерывно распадаются и образуются вновь, т. е. в местах, подобных возбуждаемым вакуумным трубкам или звездным туманностям. 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. Я только пытался, на основе простой гипотезы, которую я использовал с самого начала, обсудить строение атомов и молекул в «постоянном» состоянии; это означает, что я старался вывести некоторые общие свойства рассматриваемых систем, не производя — согласно Вашему совету — детальные вычисления какой-либо конкретной системы, кроме самой простой».

Мы видим, что Бор не ставил еще вопросов о характеристиках возбужденных состояний и об объяснении спектров — вопросов, которые стали центральными в ч. I трилогии ⁵.

В письме 5 февраля 1913 г. Бор сообщает своему другу Усену, с которым он перед этим встречался в Швеции: «По возвращении в Копенгаген... я немедленно возобновил мою работу и буду теперь стараться опубликовать ее очень быстро. Я боюсь, что должен торопиться, чтобы она была при появлении новой; вопрос в самом деле такой злободневный» (1, р. 551).

Далее Бор пишет: «Когда я вернулся домой, то нашел две статьи в «*Physikalische Zeitschrift*». Одна из них принадлежала Хевеши и касалась химических свойств радиоактивных элементов; результаты были в полном согласии с моими идеями. Другая принадлежала В. д. Бруку **), который эмпирически пришел к представлениям о периодической системе, подобным тем, к которым я пришел на основе моих теоретических спекуляций». Здесь идет речь об идеях Бора, связанных с объяснением закона радиоактивного смещения и с равенством порядкового номера элемента в периодической системе заряду ядра Z . Вопросы радиоактивности Бор ранее обсуждал с Д. Хевеши и последний как раз 15—29 января 1913 г. писал Бору о своей статье ⁶⁶, посвященной валентности радиоэлементов, что «имеется тесная связь между отдачей заряда и изменением валентности» (1, р. 528). В статье ⁶⁷ Ван ден Брук впервые рассмотрел равенство порядкового номера заряду ядра Z (см. подробное монографию ⁶⁸, гл. 8—9 и статью ⁶⁹). Отметим, что в воспоминаниях о Резерфорде Бор пишет (⁵⁷, с. 549), что данные идеи пришли к нему, когда он работал в лаборатории Резерфорда в Манчестере в 1912 г. Видимо, воспоминания Бора в основном правильно отражают возникновение этих идей

*) То есть в соотношении (2).

***) Ван ден Бруку.

в период подготовки им Резерфордского меморандума (в противоположность мнению, высказанному в монографии ⁶⁸, с. 131), см. выше, с. 263.

7 февраля 1913 г. в большом письме Хевеши Бор писал (¹, р. 529):

«Ваши статьи меня чрезвычайно заинтересовали; красивые результаты в точности те, которые я ожидал согласно точке зрения, которой я придерживаюсь относительно строения атомов.

С тех пор, как я уехал из Манчестера, я все время был занят продолжением моей работы по теории строения атомов и молекул на основе модели атома проф. Резерфорда. Я надеюсь, что очень скоро смогу опубликовать статью об этом».

Далее Бор характеризует идеи, которые он «использовал как основу своих вычислений». В частности, он отмечает допущение, что «энергия, испущенная в виде излучения» при связывании электронов, «равна постоянной Планка *, умноженной на частоту вращения электрона, рассматриваемого на его конечной орбите». В примечании * он пишет: «Постоянная, входящая в вычисления, не в точности равна постоянной Планка, но отличается от нее численным множителем, в соответствии с тем, что следовало ожидать из теоретических соображений». Здесь идет речь о постоянной K в формуле (7), см. выше, с. 264 (а также ¹⁹, р. 251).

Бор указывает, что «помимо очень стимулирующих указаний на понимание периодической системы элементов, рассматриваемые соображения приводят к теории химических соединений...», и ссылается на результат, что «2 атома водорода соединяются в молекулу, тогда как 2 атома гелия не соединяются».

Подчеркивая, что радиоактивность «зависит только от внутреннего строения ядер», Бор пишет: «При явлениях радиоактивности мы наблюдаем взрыв ядер..., химические и физические свойства новых элементов, которые образовались, будут зависеть только от заряда новых ядер, который в свою очередь будет зависеть от заряда выброшенных лучей. Последнее соотношение как раз то, которое Вы нашли в Ваших опытах; и Ваши результаты поэтому были тем, что я ожидал и на что надеялся».

В заключение письма Бор выражает «надежду и веру в будущее (возможно очень скорое) огромное и неожиданное ?? развитие нашего понимания» *).

Надежды Бора очень быстро оправдались. В феврале 1913 г. он познакомился с формулой Бальмера и комбинационным принципом (см., например, ¹⁸, р. XXXIX, ³⁹, S. 173). Известно более позднее высказывание Бора: «Как только я увидел формулу Бальмера, весь вопрос стал мне немедленно ясен». Уже к началу марта Бор подготовил статью, содержащую фундаментальные новые идеи о стационарных состояниях и о частотах излучательных квантовых переходов.

6 марта 1913 г. Бор послал Резерфорду эту статью — первый вариант ч. I трилогии ⁵ — с письмом, в котором писал (¹, р. 581): «... Я посылаю первую часть моей статьи о строении атомов. Я надеюсь, что дальнейшие главы последуют в ближайшие недели. За самое последнее время моя работа хорошо продвигалась и надеюсь, что достиг успеха в распространении использованных соображений на ряд различных явлений, таких как испускание линейчатых спектров, магнетизм ...» (Бор еще упоминает о «возможности указания на теорию образования кристаллических структур»). Бор просит Резерфорда представить первую главу работы в журнал «Philosophical Magazine» и далее пишет о том, что «вычисление позволяет получить близкое количественное согласие с экспериментами» (в скобках он приводит численное значение выведенной им теоретически постоянной Ридберга, умноженной на скорость света c , $2\pi^2 me^4/h^3 = 3,290 \cdot 10^{15}$; ср. ⁵, с. 91—92). О содержании

*) Вопросительные знаки стоят в тексте письма.

дальнейших глав Бор указывает: «Вторая глава посвящена атомам, третья — молекулам, а последние главы — магнетизму и некоторым общим соображениям». Как известно, Бор впоследствии опубликовал, после ч. I, лишь ч. II и ч. III, что и составило его трилогию⁵.

Письмо содержит вопрос Бора Резерфорду о «деликатной проблеме одновременного использования старой механики и новых допущений, введенных теорией излучения Планка». На этот вопрос Резерфорд ответил Бору в письме от 20 марта 1913 г. (¹, р. 583; оно полностью воспроизведено в воспоминаниях Бора о Резерфорде; см. ⁵⁷, с. 556), причем, в частности, писал: «Мне представляется, что в Вашей гипотезе имеется серьезная трудность, которую Вы, без сомнения, полностью осознаете, а именно, как электрон решает с какой частотой он будет колебаться, когда от переходит из одного стационарного состояния в другое? Мне кажется, что Вам придется предположить, что электрон знает заранее, где он собирается остановиться». Поднятый Резерфордом вопрос получил свое разрешение лишь впоследствии, на основе представлений о вероятностях квантовых переходов.

Бор продолжал свою работу и, не дожидаясь ответа Резерфорда, послал ему 21 марта 1913 г. измененный вариант первой части статьи с письмом, в котором писал (¹, р. 584): «С того времени, как я послал Вам мою статью, я еще работал по этим вопросам и в результате я счел необходимым ввести некоторые небольшие изменения и добавления. Те, которые я ввел в прилагаемый экземпляр, имеют, однако, лишь формальный характер. Во-первых, они относятся к теории Никольсона ... Другое дополнение — введение (с. 25—34) некоторых соображений о поглощении излучения. Я старался дать теорию в общей форме, что, как я полагал, возможно будет представлять некоторый интерес... Мои соображения не дают много большего, чем выражение результатов экспериментов новыми словами. Они, однако, указывают возможный, очень простой способ объяснения ряда фактов и, далее, самую красивую аналогию между старой электродинамикой и соображениями, использованными в моей статье». Здесь речь идет о применении Бором идеи соответствия между квантовой и классической теориями в ее первоначальной форме, идеи, которую он в дальнейшем развивал и которой придавал очень большое значение.

После поездки Бора в Манчестер в начале апреля и обсуждения им своей статьи с Резерфордом (см., например, ²³, с. 57), эта статья — ч. I трилогии — была, наконец, направлена 5 апреля 1913 г. в журнал «Philosophical Magazine», где ее опубликовали в июле 1913 г.

Во введении к трилогии Бор подчеркивает, что для модели атома Резерфорда отсутствует характерная длина порядка «линейной протяженности атома», в отличие от модели атома Томсона, в которой такая длина имеется — «радиус положительно заряженного шара» (ср. выше, с. 263). Он указывает, что если ввести в законы движения «чуждую классической электродинамике величину, а именно постоянную Планка, или, как ее часто называют, элементарный квант действия», то «вопрос о стабильных конфигурациях электронов в атомах существенно меняется, так как размерность и величина этой постоянной таковы, что вместе с массой и зарядом частиц она позволяет определить длину нужного порядка». (⁵, с. 85). Содержание ч. I трилогии Бор характеризует следующим образом: «В первой части предлагаемой работы на основе теории Планка рассматривается механизм связывания электронов с ядром. Будет показано, что принятая точка зрения позволяет легко объяснить закономерности в спектре водорода. В дальнейшем будут даны исходные предпосылки для основной гипотезы, на которой построены все рассуждения, содержащиеся в следующих частях статьи».

Первая часть трилогии посвящена в основном рассмотрению «простейшей системы, состоящей из положительно заряженного ядра очень малого размера и электрона, движущегося по замкнутой орбите вокруг ядра»

(⁵, с. 86), т. е. одноэлектронного атома, и, прежде всего, атома водорода ($Z = 1$)*).

Бор при этом пишет: «Ради простоты примем, что масса электрона пренебрежимо мала по сравнению с массой ядра, а скорость электрона мала по сравнению со скоростью света». Отметим, что конечность массы ядра Бор учел в октябре 1913 г. в статье ⁶, а релятивистскую поправку — позже, в феврале 1915 г. (см. ниже, с. 280; ср. также ч. II трилогии ⁵, с. 110). Орбиты электрона он рассматривает круговые, указывая, что «Это допущение не вызывает изменений для систем, содержащих один электрон» (⁵, с. 87). Впоследствии Бор применял представление о круговых орбитах и для многоэлектронных атомов (для круговой орбиты из постоянства кинетической энергии вращения электрона следует и постоянство момента импульса; см. ниже, с. 277).

На примере одноэлектронного атома Бор решал, исходя из квантовых представлений, две связанные между собой проблемы — проблему определения свойств атомных систем в устойчивых состояниях, прежде всего нахождения возможных значений энергии, и проблему объяснения закономерностей в линейчатых спектрах таких систем. Если раньше (в резерфордовском меморандуме и позже, вплоть до февраля 1913 г.) Бор занимался, на основе идеи квантования энергии вещества, первой проблемой и притом для основных состояний изучаемых атомных систем, то теперь он применил идею дискретности элементарных процессов испускания и поглощения излучения для решения второй проблемы — спектральной, а первую проблему рассмотрел и для возбужденных состояний.

Новыми идеями, имеющими фундаментальное значение и означавшими наиболее решительный разрыв с классическими представлениями, были идея стационарных состояний атомной системы и идея частот излучательных переходов между стационарными состояниями, отличных от частот движения в этих состояниях атомных систем. Сочетание первой идеи с идеей квантования энергии вещества, а второй идеи с идеей дискретности процессов испускания и поглощения излучения, нашло свое выражение в двух постулатах Бора (см. выше, с. 255). Именно в ч. I трилогии Бор выдвинул эти постулаты, дал их первоначальные формулировки и исходя из них раскрыл физическую сущность закономерностей в линейчатых спектрах атомов, что положило начало развитию теоретической спектроскопии (²⁸, с. 32). Вместе с тем Бор сделал предположения, которые легли в основу его модельной теории атома, и, что особенно существенно, впервые применил идею соответствия между квантовой и классической теориями (о которой писал, как о «самой красивой аналогии», в письме Резерфорду 21 марта 1913 г.; см. выше, с. 270). Важнейшим конкретным результатом, полученным Бором и произведшим особенно большое впечатление на ученых, его современников, было теоретическое определение постоянной Ридберга.

Разберем подробнее содержание первой части трилогии как основной работы Бора при создании им квантовой теории атома — работы, в которой он добился решающих успехов и которая определила дальнейшее развитие этой теории, заслуженно носящей название теории Бора. В первых трех параграфах — § 1 (Общие соображения), § 2 (Испускание линейчатых спектров) и § 3 (Общие соображения. Продолжение) — рассматриваются основы теории одноэлектронных атомов, § 4 посвящен поглощению излучения, а § 5 (Основное состояние атомной системы) — соображениям, касающимся сложных атомов, а также молекул, и обсуждаемым более детально во второй и третьей частях трилогии.

В § 1 Бор рассматривает для одноэлектронных атомов движение электрона вокруг ядра («на основе модели резерфордовского типа») по различным

*) Бор вводит заряд ядра E и для атома водорода полагает $E = e$, где e — заряд электрона. Таким образом, $E = Ze$, где Z — атомный номер.

стационарным круговым орбитам, характеризуемым определенными дискретными значениями энергии связи электрона W (равной его кинетической энергии E_{kin} , совпадающей для круговой орбиты с энергией вращения E_{rot}), частоты вращения ν_{rot} и радиуса орбиты a . Эти значения Бор получает из условия квантования

$$W = E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} nh\nu_{\text{rot}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (8)$$

аналогичного планковскому закону квантования гармонического осциллятора (2) и дающего при $n = 1$ основное состояние, и при $n > 1$ возбужденные *).

С помощью условия (8) и из соотношений между E_{rot} и a ($E_{\text{rot}} = E_{\text{kin}} = -E_{\text{pot}}/2 = Ze^2/2a$ и $E_{\text{rot}} = ma^2\omega^2/2 = 2\pi^2ma^2\nu_{\text{rot}}^2$) находятся значения $W = E_{\text{rot}}$, ν_{rot} и a , выраженные через n и постоянные m , e и \hbar , для одноэлектронного атома с заданным Z **):

$$W = \frac{2\pi^2me^4Z^2}{n^2\hbar^2}, \quad \nu_{\text{rot}} = \frac{4\pi^2me^4Z^2}{n^3\hbar^3}, \quad 2a = \frac{n^2\hbar^2}{2\pi^2me^2Z}. \quad (9)$$

Применяя формулы (9) для атома водорода ($Z = 1$, $E = eZ = e$) в основном состоянии ($\tau = n = 1$). Бор получает «величины того же порядка, что и линейные размеры атома, оптические частоты и ионизационные потенциалы» (5, с. 88): $2a = 1,1 \cdot 10^{-8}$ см, $\nu_{\text{rot}} = 6,2 \cdot 10^{15}$ с $^{-1}$, $W/e = 13$ В.

Круговые орбиты с разными значениями n и с зависящими от n дискретными значениями W , ν_{rot} и a — «ряд конфигураций системы» — согласно Бору соответствуют «состояниям системы, в которых нет излучения, а потому они будут стационарными, пока система не будет возмущена извне» (5, с. 88). Здесь Бор впервые дает определение стационарного состояния. Сочетание идеи квантования энергии атомной системы с идеей существования стационарных состояний, сохраняющих свою энергию (в противоречии с классической электродинамикой), составляет характерную особенность первого постулата Бора, который пока Бор не сформулировал в виде отдельного положения, но уже сделал основой всего дальнейшего рассмотрения.

Важнейшим для Бора является вопрос о дискретности процессов испускания излучения. Бор пишет: «Существенным пунктом планковской теории излучения является утверждение, что излучение энергии атомной системы происходит не непрерывно, как принято в классической электродинамике, а, напротив, определенными отдельными актами испускания» (5, с. 87). Рассматривая дискретные акты испускания квантов энергии $h\nu_{\text{rad}}$, где ν_{rad} — частота излучения, Бор делает решительный шаг, особенно резко противоречащий классической электродинамике и состоящий в отказе от отождествления частоты излучения с частотой движения в излучающей атомной системе. Такое отождествление считалось очевидным и было общепринятым в соответствии с представлениями классической электродинамики, его придерживались Планк, Эйнштейн, а вслед за ними и другие ученые.

Планк полагал частоту испускаемого и поглощаемого излучения равной частоте колебаний своего «резонатора»: $\nu_{\text{rad}} = \nu_{\text{vibr}}$. В квантовой теории теплоемкостей⁴⁸ Эйнштейн считал, что частота поглощаемого инфракрасного

* Условие (8) представляет обобщение условия (7) в резерфордском меморандуме (см. выше, с. 264). Бор его получает в § 1, предполагая, что при захвате электрона ядром на круговую орбиту с заданным n испускается n квантов энергии $h\nu_{\text{rad}}$ с общей энергией $nh\nu_{\text{rad}}$ и что $\nu_{\text{rad}} = \nu_{\text{rot}}/2$. Если исходить из закона квантования (2), $E = nh\nu_{\text{vibr}}$, и учесть, что для гармонического осциллятора средняя кинетическая энергия равна средней потенциальной, то $E_{\text{kin}} = nh\nu_{\text{vibr}}/2$ и условие (8) получается по аналогии; на такой путь получения этого условия Бор указал впоследствии (см. 7, с. 162). Более подробное обсуждение первоначального подхода Бора (от которого он потом отказался) и противоречивости данного подхода см. в 13, р. 267.

** Мы приводим формулы (8) и (9) в современных обозначениях. Бор в 5 (с. 87) обозначает n через τ , ν_{rot} через ω , а заряд ядра через E ($E = Ze$, см. примечание на с. 271). В формулах (9) у него в W и $\omega = \nu_{\text{rot}}$ входит $e^4E^2 = e^4Z^2$, а в $2a$ $eE = e^2Z$.

излучения совпадает с частотой колеблющегося в твердом теле иона. Такое же предположение делалось и для вращения молекул, например, Бьерум приравнивал $\nu_{\text{rad}} = \nu_{\text{rot}}$ (см. выше, с. 257). Как «оптический резонатор» рассматривал атом водорода А. Гааз, впервые применивший квантовую теорию в 1910 г. для определения характеристик основного состояния этого атома (на работу Гааза⁷⁰ ссылается Бор, см. ⁵, с. 88).

Рассматривая работы Никольсона⁶⁴ (см. выше, с. 267) и критикуя их, Бор подчеркивает: «В расчетах Никольсона частота линий в спектре отождествляется с частотой колебаний механической системы, находящейся в точно заданном положении равновесия. Поскольку применяется теория Планка, мы можем ожидать, что излучение испускается квантами. Но системы, подобные рассматриваемым здесь, у которых частота является функцией энергии, не в состоянии испускать конечное количество монохроматического излучения, ибо по мере излучения меняется энергия системы, а следовательно, и частота» (⁵, с. 89). Далее Бор говорит о теории Никольсона, «что в такой форме теория представляется неспособной объяснить известные законы Бальмера и Ритца, охватывающие частоты линий в спектрах обычных элементов». И Бор объясняет данные законы на основе допущения об испускании монохроматического излучения при переходе между стационарными состояниями. Это допущение он формулирует в конце § 1 и развивает в § 2. Бор пишет, что оно «находится в явном противоречии с общепринятым пониманием электродинамики, но представляется необходимым для объяснения экспериментально установленных фактов» (⁵, с. 90). Для самих стационарных состояний Бор, наоборот, делает допущение о применимости к ним классической механики «поскольку известно, что при расчете движения электронов обычная механика теряет свою абсолютную применимость и справедлива только для средних значений. С другой стороны, при расчетах динамического равновесия в стационарном состоянии, в котором нет относительных смещений частиц, нет необходимости различать действительные движения и средние» (там же).

Свои «основные допущения» Бор формулирует следующим образом:

«1. Динамическое равновесие системы в стационарных состояниях можно рассматривать с помощью обычной механики, тогда как переход системы из одного стационарного состояния в другое нельзя трактовать на этой основе.

2. Указанный переход сопровождается испусканием *монохроматического* излучения, для которого соотношение между частотой и количеством выделенной энергии именно такое, которое дает теория Планка» (там же).

Второе допущение представляет первоначальную формулировку второго постулата Бора (условия частот (1), согласно которому изменение энергии системы равно $h\nu_{\text{rad}}$). Здесь уже сочетается идея дискретности процесса испускания излучения с идеей частоты перехода ν_{rad} , отличной от частот механического движения в комбинирующих стационарных состояниях.

Первое допущение легло в основу модельной теории атома, которая получила развитие во второй и третьей частях трилогии, в последующих работах самого Бора и особенно в работах Зоммерфельда, а затем и многих других ученых. Следует сразу отметить, что вопрос о применимости модельной теории, которую Бор развивал, начиная с резерфордовского меморандума, всегда стоял перед Бором и он уже в конце 1913 г. в докладе о спектре водорода говорил: «Если мы желаем вообще составить наглядное представление о стационарных состояниях, у нас нет других средств, *по крайней мере сейчас*, кроме обычной механики» (⁷, с. 161. Курсив мой. — М. Е.). В последующие годы у Бора сомнения в применимости классической механики к стационарным состояниям все усиливались, что можно проследить по его многочисленным высказываниям, некоторые из которых будут приведены в дальнейшем.

Здесь уместно подчеркнуть, что два сделанные Бором допущения относились к двум различным аспектам его теории (см. выше, с. 254) и что лишь в дальнейшем он четко выделил основные постулаты о стационарных со-

стояниях и частотах излучательных квантовых переходов, как наиболее общие предположения, не зависящие от конкретных моделей атомных систем.

Поэтому нельзя говорить о данных допущениях, как о «двух знаменитых постулатах» Бора, что сделано в интересной монографии по методологии квантовой теории (71, с. 119). Первое из допущений было лишь промежуточным этапом в развитии квантовой теории, в то время как второе сохранилось и в созданной позже последовательной квантовой теории, где оно выводится.

Исключительно важным явилось истолкование Бором в § 2 закономерностей в линейчатых спектрах атомов. Эти закономерности для спектральных линий атома водорода выражаются, как известно, обобщенной формулой Бальмера, которую мы запишем в форме

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) = T(n_2) - T(n_1) \quad (10)$$

как разность двух спектральных термов вида $T(n) = R/n^2$ (σ и λ — волновое число и длина волны излучения, R — постоянная Ридберга, n_1 , n_2 и n — целые числа; при $n_2 = 2$ и $n_1 = 3, 4, 5, \dots$ получается спектральная серия Бальмера). В случае многоэлектронных атомов, для которых наблюдаются спектральные серии, справедлив комбинационный принцип Ридберга — Ритца, согласно которому

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = T_r(n_2) - T_s(n_1), \quad (11)$$

где $T_1(n)$, $T_2(n)$, $T_3(n)$, \dots — функции от целого числа n , имеющие приближенный вид $T_i = R/(n + \alpha_i)^2$, где α_i — постоянные (r и s — возможные значения i).

Именно из формул типа (10) и (11) исходил Бор при интерпретации спектральных закономерностей. Он ссылается на работу Ритца 1908 г. 72, в которой был сформулирован комбинационный принцип. В общей форме этот принцип может быть представлен для атомов в виде $\sigma = T_j - T_k$, где T_j и T_k — два члена полного набора спектральных термов, характеризующих данный атом (см., например, 73, с. 13).

Умножение формул (10) и (11) на скорость света c дает частоты спектральной линии $\nu_{\text{rad}} = c\sigma = c/\lambda$ как разность двух членов типа $cT(n)$, а последующее умножение на постоянную Планка h дает дискретное значение испускаемой (или поглощаемой) атомом энергии $h\nu_{\text{rad}}$ как разность двух членов типа $hcT(n)$, имеющих размерность энергии. Для атома водорода Бор отождествил эти члены с энергиями связи электрона W в двух стационарных состояниях с $n = n_1$ и $n = n_2$. Согласно первой формуле (9) при $Z = 1$ $W_n = 2\pi^2me^4/n^2h^2$ и Бор получает следующий результат:

«Количество энергии, испускаемой при переходе системы из состояния, соответствующего $n = n_1$, в другое, где $n = n_2$, будет

$$W_{n_2} - W_{n_1} = \frac{2\pi^2me^4}{h^2} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right). \quad (12)$$

Предполагая теперь, что рассматриваемое излучение монохроматично и что количество испускаемой энергии равно $h\nu_{\text{rad}}$, где ν_{rad} — частота излучения, получаем

$$W_{n_2} - W_{n_1} = h\nu_{\text{rad}}, \quad (13)$$

и отсюда

$$\nu_{\text{rad}} = \frac{2\pi^2me^4}{h^3} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right). \quad (14)$$

Мы видим, что это соотношение объясняет закономерность, связывающую линии спектра водорода» (5, с. 91).

Формула (13) и представляет записанное в явной форме знаменитое условие частот Бора (1) (для энергий связи мы имеем $W_{n_1} = -E_1$ и $W_{n_2} = -E_2$, где E_1 и E_2 — энергии комбинирующих стационарных состояний, отсчиты-

ваемые от границы ионизации атома водорода). В этом условии частота $\nu_{\text{рад}}$ не совпадает с частотами движения $\nu_{\text{рот}} = 4\pi^2 m e^4 / n^3 h^3$ (см. вторую формулу (9) при $Z = 1$) в стационарных состояниях.

Для постоянной $2\pi^2 m e^4 / h^3$ (равной cR^*), в формуле (14) Бор находит, исходя из известных в то время значений e , e/m и h , значение $3,1 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, сравнивает его с эмпирическим значением $3,290 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ и пишет: «Соответствие между теоретическим и наблюдаемым значениями лежит в пределах ошибок измерений постоянных, входящих в теоретическую формулу» (5, с. 92).

Таким образом, Бор сумел теоретически найти значение постоянной Ридберга, о чем он писал Резерфорду еще в марте 1913 г. (см. выше, с. 269) и что явилось очень большим его успехом.

Бор объясняет различное число линий серий Бальмера, наблюдаемых в спектрах испускания, тем, что диаметр орбиты электрона пропорционален n^2 (согласно последней формуле (9)) и только в достаточно разреженных газах могут осуществляться переходы из стационарных состояний с большими значениями n , когда диаметр орбиты велик.

Свою теорию Бор затем применяет для объяснения происхождения наблюдавшихся спектральных серий с полуцелыми значениями n . Он обосновывает их принадлежность не водороду, как предполагалось ранее, а гелию. Для атома гелия $Z = 2$, $W_n = 8\pi^2 m e^4 / n^2 h^2$ (см. (9)) и формула, аналогичная формуле (14), имеет вид

$$\nu_{\text{рад}} = \frac{8\pi^2 m e^4}{n^2 h^3} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) = \frac{2\pi^2 m e^4}{n^2 h^3} \left[\frac{1}{(n_2/2)^2} - \frac{1}{(n_1/2)^2} \right]. \quad (15)$$

Бор пишет: «... С помощью описанной выше теории можно естественным образом объяснить эти серии, если приписать их гелию» (5, с. 92). Данное предположение Бора очень быстро, в том же 1913 г., блестяще подтвердилось опытами Э. Эванса и А. Фаулера, причем небольшие расхождения с формулой (15) Бор убедительно объяснил в статье 6 (см. также доклад 7) отличием приведенной массы атома водорода от приведенной массы атома гелия (в уточненные формулы (14) и (15) вместо массы электрона m должна входить приведенная масса $mM/(M + m)$, где M — масса ядра, различная для атомов водорода и гелия). Это стало еще одним большим успехом теории Бора.

Бор также вкратце рассматривает, опираясь на комбинационный принцип в форме (11), и вопрос о закономерностях в спектрах многоэлектронных атомов. Он пишет: «То обстоятельство, что частота может быть представлена в виде разности двух функций от целых чисел, позволяет заключить, что происхождение линий в данных спектрах подобно тому, какое мы приняли для водорода. Это значит, что линии соответствуют тому излучению, которое имеет место при переходе системы из одного стационарного состояния в другое» (6, с. 94).

Отметим, что Бор правильно объясняет одинаковость для всех элементов постоянной R в выражении Ридберга $T_i = R/(n + \alpha_i)^2$ (см. (11)) тем, что «на электрон, находящийся на большом расстоянии от ядра», т.е. для больших n , в многоэлектронном атоме будет действовать сила, «примерно та же, что и в предыдущем случае, когда электрон связывался ядром водорода» (там же). Как известно, в настоящее время уделяется большое внимание таким, так называемым ридберговским, состояниям внешнего электрона.

Самого Бора не удовлетворяло, несмотря на успехи его теории, ее обоснование, исходя из закона квантования энергии (8), аналогичного планковскому закону (2)**). Уже в конце § 1 Бор пишет: «Однако мы можем (см.

*) Бор в трилогии 5 и в ряде последующих статей обозначает ее через K . R выражается в см^{-1} , K — в с^{-1} (в статье 6 через K обозначена постоянная, обратная постоянной $Z^2 R$; в этой статье $K_{\text{H}} = 1/R_{\text{H}}$, а $K_{\text{He}} = 1/4R_{\text{He}}$).

**) От предположения, что при захвате электрона ядром на круговую орбиту с заданным n испускается n квантов энергии $h\nu_{\text{рад}} = h\nu_{\text{рот}}/2$ (см. примечание на с. 272), Бор в § 3 отказался (5, с. 94).

§ 3) получить соотношения (9) для стационарных состояний, применяя предположения несколько другого вида» (5, с. 90). После рассмотрения в § 2 испускания линейчатых спектров и объяснения спектральных закономерностей Бор дает второй вывод основных формул (9) (следовательно и постоянной Ридберга), при котором впервые была применена идея соответствия между квантовой и классической теориями.

Для нахождения энергии связи электрона W Бор сперва использует вместо условия квантования (8) более общее условие $W = E_{\text{rot}} = f(n) h\nu_{\text{rot}}$, где $f(n)$ — некоторая функция от целого числа n . Вместо первой формулы (9) получается $W = W_n = \pi^2 m e^4 Z^2 / 2 h^2 f^2(n)$ и из сравнения с формулой (12) следует, «что для получения формулы, аналогичной формуле для серии Бальмера, мы должны положить $f(n) = \alpha n$ » (5, с. 95), где α — коэффициент, подлежащий определению (это соответствует $W_n = E_{\text{rot}} = \alpha n h \nu_{\text{rot}}$, ср. (7) в резерфордском мемораандуме*). Для нахождения α Бор применяет идею соответствия. Он требует, чтобы «в соответствии с классической электродинамикой» в предельном случае больших значений n частота излучения ν_{rad} при переходе между соседними стационарными состояниями с энергиями W_n и W_{n-1} совпадала с частотой обращения электрона ν_{rot} (предельный случай малых частот излучения, т.е. больших длин волн).

В формуле типа (14) надо заменить $n_1/2$ и $n_2/2$ на $f(n_1)$ и $f(n_2)$, что при $f(n) = \alpha n$, $n_1 = N$, $n_2 = N - 1$ дает, для больших N

$$\nu_{\text{rad}} = \frac{W_{n_2} - W_{n_1}}{h} = \frac{\pi^2 m e^4 Z^2}{2 \alpha^2 h^3} \frac{(2N-1)}{N^2(N-1)^2} \approx \frac{\pi^2 m e^4 Z^2}{\alpha^2 h^3 N^3}. \quad (15')$$

Для ν_{rot} при замене, во второй формуле (9), $n/2$ через $f(n)$ получается при $n = N$

$$\nu_{\text{rot}} = \frac{\pi^2 m e^4 Z^2}{2 h^3 f^2(n)} = \frac{\pi^2 m e^4 Z^2}{2 \alpha^2 h^3 N^3}. \quad (16)$$

Частоты ν_{rad} и ν_{rot} приближенно совпадают, при больших N — лишь при $\alpha = 1/2$. Это дает условие (8) и формулы (9).

Бор также рассматривает переход между стационарными состояниями с $n = N$ и с $n = N - s$, где $s \ll N$, и получает при $f(n) = \alpha n = n/2$, $\nu_{\text{rad}} = s \nu_{\text{rot}}$. По этому поводу он пишет: «Возможность испускания излучения с такой частотой можно объяснить также из аналогии с обычной электродинамикой, поскольку электрон, движущийся по эллиптической орбите вокруг ядра, испускает излучение, которое по теореме Фурье может быть разложено на компоненты с частотами $s \nu_{\text{rot}}$, где ν_{rot} — частота обращения электрона» (5, с. 96). Впоследствии Бор использовал подобные соображения при выводе правил отбора, исходя из принципа соответствия (см. ниже, с. 289).

Изложив свой второй вывод основных формул (9), Бор возвращается «к вопросу о значении соответствия между наблюдаемыми и вычисленными значениями константы в формуле (14) для серии Бальмера в спектре водорода» (5, с. 96). Он пишет, что «из изложенного выше мы приходим к тому же выражению для константы, что и в формуле (14). При этом надо только допустить, во-первых, что излучение испускается в виде квантов $h\nu_{\text{rad}}$ и, во-вторых, что частота излучения, испускаемого при переходе между последовательными стационарными состояниями, совпадает с частотой обращения электрона в области «больших длин волн» (там же).

Сразу отметим, что во втором выводе Бор, наряду с идеей соответствия между квантовой и классической теориями в ее первоначальной форме, продолжает использовать условие квантования энергии электрона, как и в первом выводе, — условие планковского типа, хотя и более общего вида, с заменой в формуле (8) $n/2$ функцией $f(n)$. Наиболее последовательный третий вывод Бор дал в докладе⁷ в декабре 1913 г. В этом очень важном и ясном выводе Бор, вообще, не использует равенства, аналогичного планковскому за-

*) Бор обозначает $\alpha = c$ и, как и раньше, $n = \tau$.

кону (2), и подчеркивает: «Учитывая, однако, насколько по-разному используется это равенство здесь и в теории Планка, я считаю ошибочным принимать в основу упомянутую формальную аналогию; в своем изложении я пытался, насколько возможно, от нее освободиться» (7, с. 163).

В третьем выводе Бор для круговой орбиты электрона в атоме водорода пользуется соотношением $v_{\text{rot}}^2 = 2W^3/\pi^2 m e^4$ *) и для стационарного состояния с энергией связи $W = W_n = hcR/n^2$ получает

$$v_{\text{rot}}^2 = \frac{2R^3 h^3 c^3}{\pi^2 m e^4 n^6}. \quad (17)$$

С другой стороны, для перехода между стационарными состояниями с $n_1 = n + 1$ и $n_2 = n$ согласно обобщенной формуле Бальмера (10) получаем

$$v_{\text{rad}} = c\sigma = cR \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2} \right], \quad (18)$$

что для больших n приближенно дает $v_{\text{rad}} = 2cR/n^3$ (т. е. $v_{\text{rad}}^2 = 4c^2 R^2/n^6$). Бор приравняет частоту излучения v_{rad} числу обращений электрона v_{rot} , получает $v_{\text{rot}} = 2cR/n^3$ (т. е. $v_{\text{rot}}^2 = 4c^2 R^2/n^6$) и пишет (7, с. 162): «Сравнивая это выражение с (17), мы видим, что n в этом равенстве сокращается и для R получаем

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{ch^3} \text{ »} \quad (19)$$

В своем докладе 7 Бор приводит только данный, третий вывод, полностью основанный на идее соответствия между квантовой и классической теориями**).

Применив идею соответствия уже при втором выводе формул (9) и этим обосновав коэффициент $\alpha = 1/2$ в условии квантования (8), Бор в конце § 3 получает как следствие квантование момента импульса электрона на круговой орбите. Он пишет (5, с. 96):

«Хотя, естественно, не может быть и речи о механическом обосновании приведенных в этой работе расчетов, тем не менее можно дать очень простую интерпретацию расчетов на с. 87 ***) с помощью понятий обычной механики. Если через M обозначить момент импульса электрона, вращающегося вокруг ядра, то для круговой орбиты сразу имеем $\pi M = E_{\text{kin}}/v_{\text{rot}}$, где v_{rot} — частота обращения, а E_{kin} — кинетическая энергия электрона. Для круговой орбиты $E_{\text{kin}} = W$ (см. с. 86 ****)), а следовательно, из формулы (8) получаем

$$M = nM_0, \quad \text{где } M_0 = \frac{h}{2\pi} = 1,04 \cdot 10^{-27} \text{ »} \quad (20)$$

В дальнейшем Бор широко применяет в модельной теории атома именно условие (20) квантования момента импульса для круговых орбит, которое он формулирует следующим образом: «В стационарном состоянии системы момент импульса электрона, вращающегося вокруг ядра, равняется целому кратному некоторой универсальной величины независимо от заряда ядра» (5, с. 97).

В конце § 3 Бор пишет: «Большое количество различных стационарных состояний наблюдается только при исследовании поглощения и испускания излучения» (там же). Процессы поглощения он затем разбирает в § 4 (ранее он рассматривал, в § 1—3, только процессы испускания). «В большинстве других физических явлений», указывает Бор, «атомы вещества находятся только в одном определенном состоянии, а именно в состоянии при низкой

*) Которое вытекает из соотношений $W = -E_{\text{pot}}/2 = e^2/2a$ и $W = E_{\text{pot}} = -1/2 m a^2 \omega^2 = 2\pi^2 m a^2 v_{\text{rot}}^2$; ср. выше, с. 272.

***) Именно этот вывод, наиболее характерный для подхода Бора, целесообразно приводить, по мнению автора, при изложении теории Бора курсах атомной физики (как делает, например, Борн в 35).

****) Речь идет о формулах (8) и (9).

*****) Бор ссылается на начало § 1.

температуре». Этот случай «основного» состояния — того «из стационарных состояний, при образовании которого было испущено наибольшее количество энергии», Бор разбирает в § 5.

Поглощение излучения в § 4 Бор рассматривает как процесс, обратный процессу испускания излучения, т. е. как переход из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией, для атома водорода — переход $n_2 \rightarrow n_1$, где $n_1 > n_2$. Бор объясняет опыты по поглощению паров натрия «переходами системы между двумя состояниями, одним из которых является основное», а наличие поглощения у водорода «только в светящемся состоянии» поглощением атомами водорода в стационарных состояниях с $n \geq 2$ (речь идет о сериях Бальмера и Пашена, для которых $n_2 = 2$ и $n_1 = 3$). И он вновь подчеркивает отличие частоты перехода ν_{rad} от частоты движения электронов: «Насколько сильно приведенное выше объяснение отличается от объяснения, основанного на обычной электродинамике, видно наиболее ясно из того факта, что мы вынуждены были допустить поглощение системой электронов излучения, частота которого отличается от частоты колебаний электронов, вычисленной обычным образом» (5, с. 98).

Весьма существенным является рассмотрение Бором поглощения излучения, приводящего к ионизации (фотоионизации, по современной терминологии) и связанного с переходом из стационарных состояний с дискретными значениями энергии в «такое состояние системы, в котором электрон свободен, т. е. обладает достаточно большой энергией, чтобы удалиться от ядра бесконечно далеко». И далее Бор пишет: «Если предположить, что движение электрона описывается обычной механикой и что нет (заметного) излучения энергии, то полная энергия системы (как и в ранее рассмотренных стационарных состояниях) постоянна. Должна существовать полная непрерывность между обоими видами состояний, потому что различие между частотами и размерами системы в последовательных стационарных состояниях убывает с возрастанием n » (там же). Таким образом, Бор рассматривает для электрона наряду с финитным движением инфинитное — полный энергетический спектр. Он делает вывод о том, что «поглощение излучения возможно не только между двумя различными стационарными состояниями *), но и между стационарным состоянием и состоянием, в котором электрон свободен» (там же). Бор указывает, что «частота этого излучения должна определяться равенством $E = h\nu_{\text{rad}}$, где E — разность полных энергий системы в обоих состояниях», и что «такое поглощение в точности совпадает с тем, которое наблюдается в опытах по ионизации ультрафиолетовым светом и рентгеновскими лучами» (5, с. 99). Здесь Бор, ссылаясь на работу Эйнштейна 48, пишет, что «этим путем получается такое же выражение для кинетической энергии электрона, вырванного из атома...», и приводит уравнение $E_{\text{kin}} = h\nu_{\text{rad}} - W$, где « W — общая энергия, выделенная при первоначальном присоединении электрона».

Бор также объясняет результаты известных «опытов Вуда 74 по поглощению света в парах натрия», подчеркивая, что «мы должны предположить, что за этим поглощением следует испускание энергии, возвращающее систему в первоначальное состояние. Если между системами нет соударений, то эта энергия испускается в виде излучения, частота которого равна частоте поглощенного излучения; таким образом, происходит по существу не поглощение, а только рассеяние первоначального излучения. Действительное поглощение произойдет только в том случае, если благодаря соударениям эта энергия превратится в кинетическую энергию свободных частиц» (5, с. 99).

Наконец, Бор делает предположение о том, что «монохроматическое рентгеновское излучение испускается при рекомбинации системы после предва-

*) Речь идет о стационарных состояниях с дискретными значениями энергии, т. е. о случае финитного движения.

рительного удаления сильно связанного электрона, например при соударении с катодными частицами»⁶, с. 100). Этот вопрос Бор затем рассмотрел во второй части трилогии⁵, с. 127), а более детальное объяснение характеристического рентгеновского излучения дал, опираясь на теорию Бора, в 1914 г. В. Коссель⁷⁶.

Очень большой интерес представляют соображения Бора, связанные с «опытами с рентгеновскими лучами». Он пишет, что эти опыты «позволяют думать, что на основе обычной электродинамики нельзя рассматривать не только испускание и поглощение излучения, но даже и соударения двух электронов, из которых один является связанным в атоме» (там же), и что «из рассмотрения столкновения между свободным и связанным электронами вытекает, что связанный электрон не может приобретать энергию меньшую, чем разность энергий между двумя последовательными стационарными состояниями, а следовательно, свободный электрон, сталкивающийся с ним, не может терять меньшее количество энергии»⁵, с. 101). Таким образом, наряду с *излучательными* квантовыми переходами Бор рассмотрел и *безызлучательные* квантовые переходы связанного электрона в атоме. Подобные переходы при столкновениях электронов заданной скорости (т. е. определенной кинетической энергии) с атомами ртути были, как известно, экспериментально обнаружены в знаменитых опытах Д. Франка и Г. Герца⁷⁶, в согласии с предсказанием Бора (о котором Франк и Герц не знали).

Следует специально отметить, что все выводы из своей теории, сделанные Бором в § 4, в том числе касающиеся многоэлектронных атомов, были правильными. Они базировались на той части его теории, которая была связана с его двумя основными постулатами о стационарных состояниях и об излучательных переходах, но не с конкретными результатами модельной теории (ср. выше, с. 254). В отличие от этого рассмотрение Бором в § 5 основного состояния многоэлектронной атомной системы опиралось на модельные представления о движении электронов по законам классической механики при дополнительных квантовых условиях и притом о движении по круговым орбитам (только для которых кинетическая энергия электрона постоянна и однозначно связана с его моментом импульса).

Мы не будем подробно разбирать содержание § 5, отметим лишь, что Бор применяет «легко доказуемую теорему»: «*В любой системе, состоящей из покоящегося ядра и электронов, движущихся по круговым орбитам со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света, кинетическая энергия численно равна половине потенциальной*»⁵, с. 105). Отсюда он получает, как и для одноэлектронного атома, что $W = E_{\text{kin}}$, где W — энергия образования системы «из частиц, бесконечно удаленных друг от друга и не обладающих скоростью друг относительно друга», а E_{kin} — «кинетическая энергия электронов при их окончательном расположении в системе».

В конце § 5 Бор высказывает следующую гипотезу: «*В любой молекулярной системе, состоящей из положительно заряженных ядер и электронов, где ядра находятся в покое друг относительно друга, а электроны движутся по круговым орбитам, момент импульса относительно центра орбиты для каждого электрона в основном состоянии будет равняться $h/2\pi$, где h — постоянная Планка*»⁵, с. 106). Данную гипотезу Бор применил, как основную, во второй и третьей частях трилогии, которые будут кратко рассмотрены в следующем разделе (см. ниже, с. 281). Однако эта гипотеза оказалась неудовлетворительной даже в рамках модельной теории.

В заключение данного раздела необходимо подчеркнуть, что именно первая часть трилогии в § 1—4 содержала фундаментальные новые идеи Бора по квантовой теории, их успешное применение к одноэлектронным атомам и ряд существенных выводов общего характера в отношении многоэлектронных атомов и их спектров, что определило ее исключительно важное место в развитии квантовых представлений. Очень четкое изложение своих идей и результатов Бор дал в уже неоднократно цитировавшемся докладе⁷. Он

заключает этот доклад так: «Прежде чем закончить, я хотел бы выразить надежду, что я выражался достаточно ясно и вы поняли то резкое противоречие между изложенными соображениями и поразительно гармоническим кругом представлений, которые называют классической электродинамикой. В то же время я стремился пробудить в вас надежду, что, может быть, именно подчеркивание указанного противоречия приведет со временем к определенной связи и в новых представлениях» (7, с. 167).

5. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ АТОМОВ И ПОПЫТКИ СОЗДАНИЯ ТЕОРИИ МНОГОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ (1913—1917 гг.)

В исследованиях Бора на протяжении десятилетия (1913—1923 гг.) после решающих успехов, которых он достиг весной 1913 г. в первой части трилогии⁵, можно выделить три периода. В первый период, с лета 1913 г. до конца 1917 г., Бор, продолжая разрабатывать теорию одноэлектронных атомов, уделял большое внимание многоэлектронным системам, развивал модельную теорию периодического движения электронов по круговым орбитам и, встретив большие трудности, стремился их преодолеть. Во второй период, с конца 1917 г. до конца 1920 г., Бор добился успехов в развитии принципа соответствия и теории сериальных спектров атомов и перешел на новой основе к физическому объяснению периодических свойств элементов. В третий период (1921—1923 гг.) Бор разработал теорию периодической системы в тесной связи с теорией оптических и рентгеновских спектров атомов; вместе с тем он искал путей преодоления принципиальных трудностей не удовлетворявшей его модельной теории, которые нашли разрешение лишь в квантовой механике. Мы рассмотрим исследования Бора в эти три периода в данном разделе и двух следующих разделах соответственно.

В первый период Бор продолжал в 1913 — 1914 учебном году преподавание в Копенгагенском университете, а после начала Первой мировой войны с осени 1914 г. до лета 1916 г. два года работал в Англии в Манчестерском университете, куда поехал по предложению Резерфорда. 20 мая 1914 г. Резерфорд написал Бору (1, р. 593) об освободившейся должности лектора и что он «желал бы получить молодого человека, обладающего некоторой оригинальностью», а 19 июня 1914 г. Бор ответил ему (1, р. 594): «Я не знаю, как выразить мою радость, что Вы предложили мне вакантную должность лектора на следующий год, и с каким большим удовольствием я соглашаюсь на это». Два года в Манчестере Бор находился в тесном контакте с Резерфордом, а летом 1916 г. возвратился в Данию и с сентября 1916 г. стал работать профессором Копенгагенского университета.

Свои работы данного периода Бор публиковал по-английски в журналах «Philosophical Magazine» и «Nature». Он напечатал ряд больших статей — ч. II и ч. III трилогии⁵ в сентябре и в ноябре 1913 г.,⁷⁷ и⁷⁸ в марте 1914 г. и в сентябре 1915 г.,⁶⁰ в ноябре 1915 г. (продолжение его статьи⁵⁹; см. выше, с. 262). Бор также опубликовал несколько писем —⁶ в октябре 1913 г. (см. выше, с. 275),⁷⁹ в январе 1914 г.,⁸⁰ в феврале 1915 г. (где он обратил внимание на необходимость учета релятивистского эффекта зависимости массы электрона от его скорости),⁸¹ в июле 1915 г. В январе 1916 г. Бор направил в «Philosophical Magazine» статью «О применимости квантовой теории к периодическим системам»⁸², от публикации которой он затем отказался (см. ниже, с. 284) и в 1916 и 1917 гг. результатов своих исследований не печатал. Ряд материалов, характеризующих эти исследования, напечатан в¹.

Уже в начале рассматриваемого периода результаты, полученные Бором в первой части его трилогии, привлекли большое внимание ученых (см. 1, р. 122, и¹³, с. 107) и, в частности, обсуждались в сентябре 1913 г., при его участии, на годичном собрании Британской ассоциации по развитию науки в Бирмингеме⁸³. Ряд выдающихся ученых, в частности Д. Джинс, выступивший в Бирмингеме с докладом, высоко оценил эти результаты. Специально

следует отметить, что очень большой интерес к работе Бора проявил Зоммерфельд, пославший ему 4 сентября 1913 г. открытку, в которой писал: «Меня давно занимает проблема выражения постоянной Ридберга — Ритца при помощи величины h Планка... Хотя в данный момент я еще несколько скептически отношусь к моделям атома в целом, тем не менее вычисление этой постоянной, бесспорно, является настоящим подвигом» (13, с. 168). Как известно, в дальнейшем именно Зоммерфельд внес очень большой вклад в развитие модельной теории атома.

Необходимо вместе с тем подчеркнуть, что многие ученые не соглашались с идеями Бора и критиковали его теорию. Потребовалось несколько лет, пока эти идеи получили широкое признание.

Опубликованные осенью 1913 г. вторая и третья части трилогии⁵ были посвящены главным образом теории основного состояния многоэлектронных систем — «систем, содержащих только одно ядро», т. е. атомов (ч. II), и «систем с несколькими ядрами», т. е. молекул (ч. III). В этом отношении они явились непосредственным продолжением и развитием резерфордского меморандума (см. выше, с. 263) и в них также рассматривались электронные конфигурации и устойчивость атомов и молекул. Отличие заключалось в том, что Бор исходил, вместо квантового условия (7), из соответствующей квантовому условию (8) при $n = 1$ гипотезы о равенстве в основном состоянии момента импульса каждого электрона относительно центра своей круговой орбиты универсальной величине $h/2\pi$ (6, с. 108, 132), как это было предположено в конце ч. I трилогии.

Для атомов Бор по-прежнему рассматривает (в § 2—4 ч. II) распределение электронов на коаксиальных кольцах. Он определяет устойчивость кольца из n электронов, вращающихся вокруг ядра с заданным Z (которое он обозначает через N), по отношению к колебаниям, перпендикулярным к плоскости кольца, и получает, что единственное кольцо устойчиво при $n \leq 8$, если $Z = 10$, при $n \leq 10$, если $Z = 20$, и при $n \leq 13$, если $Z = 40$. Бор приходит к заключению, что электроны в сложных атомах должны распределяться по ряду колец. Для атомов лития и бериллия ($Z = 3, 4$) он предполагает наличие 2 электронов на внутреннем кольце и 1 и 2 электронов соответственно на внешнем кольце, а для последующих легких атомов с $n \leq 24$ получает распределение по кольцам, учитывая периодичность свойств элементов, в частности наличие характерного периода, равного 8. Согласно его схеме на внутренних кольцах может находиться по 8, 4 или 2 электрона, а на внешнем от 1 до 4 электронов, в соответствии с валентностью элемента.

Для молекул Бор рассматривает (в § 2—5 ч. III) устойчивость систем, состоящих из двух ядер и одного кольца электронов, перпендикулярного оси молекулы, в частности устойчивость молекулы водорода, а также процесс образования двухатомной молекулы из двух атомов.

Бору не удалось получить, на основе рассмотрения движения электронов в основном состоянии многоэлектронных систем по круговым орбитам с $n = 1$, существенных и убедительных результатов, имеющих количественный характер, и в дальнейших исследованиях рассматриваемого периода. О том, что Бор сам не был удовлетворен результатами этих исследований и чувствовал необходимость отказа от ряда представлений, свидетельствует его письмо Усену 28 сентября 1914 г. В этом письме Бор писал (1, р. 562): «Для систем, состоящих из более чем двух частиц, нет простого соотношения между энергией и числом обращений и по этой причине соображения, подобные тем, которые я использовал ранее, не могут быть применены для определения «стационарных состояний» системы. Я склонен полагать, что в этой проблеме скрыты очень значительные трудности, которые могут быть преодолены лишь путем отказа от обычных представлений в еще большей степени, чем это требовалось до сих пор, и что единственной причиной достигнутых успехов является простота рассмотренных систем» (т. е. одноэлектронных атомов).

Отметим, что в этом же письме Бор писал о своей поездке в Германию: «В начале летних каникул я совершил небольшую поездку в Германию с моим братом и встретился с несколькими физиками — Дебаем, Вином, Зоммерфельдом. Я ранее никогда не встречал кого-либо из немецких физиков и получил большое удовольствие от бесед с ними». В дальнейшем у Бора наладились очень тесные контакты с рядом немецких физиков.

Во второй части трилогии Бором были рассмотрены также вопросы характеристического рентгеновского излучения (в § 5) и радиоактивных явлений, включая закон радиоактивного смещения, а в «заключительных замечаниях» в третьей ее части Бор перечисляет основные предположения, сделанные в трилогии. Он формулирует их следующим образом⁶, с. 147):

1. Испускание (или поглощение) энергии происходит не непрерывно, как это принимается в обычной электродинамике, а только при переходе системы из одного стационарного состояния в другое.

2. Динамическое равновесие системы в стационарных состояниях определяется обычными законами механики, тогда как для перехода системы между различными стационарными состояниями эти законы недействительны.

3. Испускаемое при переходе системы из одного стационарного состояния в другое излучение монохроматично и соотношение между его частотой ν_{rad} и общим количеством излученной энергии E дается равенством $E = h\nu_{\text{rad}}$, где h — постоянная Планка.

4. Различные стационарные состояния простой системы, состоящей из вращающегося вокруг положительного ядра электрона, определяются из условия, что отношение между общей энергией, испущенной при образовании данной конфигурации, и числом оборотов электронов является целым кратным $h/2$. Предположение о том, что орбита электрона круговая, равнозначно требованию, чтобы момент импульса вращающегося вокруг ядра электрона был бы целым кратным $h/2\pi$.

5. «Основное» состояние любой атомной системы, т. е. состояние при котором излученная энергия максимальна, определяется из условия, чтобы момент импульса каждого электрона равнялся $h/2\pi$.

Мы видим, что Бор еще не выделяет наиболее общие предположения, включая в «основные предположения» и ряд положений модельной теории, притом различной общности. Такое выделение он сделает лишь в дальнейшем.

Первоначально предполагавшееся рассмотрение магнетизма (о чем он писал Резерфорду; см. выше, с. 269) Бор не включил в статью⁵. Однако сохранились его черновики¹, р. 254—265), посвященные магнетизму и свидетельствующие о трудностях, с которыми Бор встретился при попытках дать объяснение эффекта Зеемана согласно квантовой теории. Вместе с тем встал вопрос и об объяснении открытого И. Штарком в ноябре 1913 г.⁸⁴ явления расщепления спектральных линий в электрическом поле, получившего название эффекта Штарка.

О «недавнем открытии Штарка, что электрическое поле вызывает расщепление линий водорода и гелия, очень похожее на эффект Зеемана», Резерфорд написал Бору 11 декабря 1913 г. (¹, р. 589) и советовал ему «написать что-нибудь об эффекте Зеемана и электрическом эффекте, если возможно согласовать их с Вашей теорией». Бор ответил Резерфорду 21 декабря 1913 г. (¹, р. 590): «Я очень благодарю Вас, что Вы любезно привлекли мое внимание к открытию Штарка. Никто в Копенгагене не получил отписка его статьи и поэтому я написал ему с просьбой об отписке. Я получил его несколько дней назад, но я еще не смог составить точного мнения об интерпретации результатов. Я могу только сказать, что один из наиболее характерных фактов, а именно быстрое возрастание эффекта электрического поля с увеличением номера линии в соответствующей спектральной серии как раз то, что следовало ожидать на основе предположения о стационарных состояниях... Как только я составлю более подробное представление о возможной интерпрета-

ции результатов Штарка, я напишу Вам, а также последую Вашему совету, как только смогу, опубликовать что-то об этом и об эффекте Зеемана».

Бор быстро подготовил статью ⁷⁷ об эффектах Штарка и Зеемана. В ней он объяснил влияние электрического поля на спектр водорода деформацией круговой орбиты электрона и показал, «что задача допускает лишь две стационарные орбиты электрона» (⁷⁷, с. 176). Он получил расщепление спектральных линий на две компоненты, пропорциональное напряженности электрического поля и разности квадратов $n_1^2 - n_2^2$ квантовых чисел n_1 и n_2 комбинирующих стационарных состояний.

По порядку величины вычисленные значения расщепления линий серии Бальмера H_β ($n_1 = 4$, $n_2 = 2$) и H_γ ($n_1 = 5$, $n_2 = 2$) оказались в согласии с экспериментальными данными для расстояний «между двумя компонентами, поляризованными параллельно напряженности электрического поля» (вычисленные значения превышали экспериментальные примерно на 1/3).

Это была первая теория, хотя еще и не совершенная, эффекта Штарка.

Для объяснения эффекта Зеемана, «чтобы получить связь с обычной механикой и одновременно сохранить согласие с опытом» (⁷⁷, с. 182) Бор предположил, что в магнитном поле (вызывающем «вращение вокруг направления поля с частотой τ ») энергия атома водорода в стационарных состояниях не изменяется, а условие частот $E_1 - E_2 = h\nu_{\text{rad}}$ заменяется, для колебаний, перпендикулярных полю, равенством $E_1 - E_2 = h(\nu_{\text{rad}} \mp \tau)$. Такое предположение оказалось неверным, однако в то время отсутствовало представление о вырождении уровней энергии (по современной терминологии) и их возможном расщеплении. В результате Бор не смог объяснить и расщепление спектральных линий при эффекте Штарка больше, чем на две компоненты. Несовершенство модельной теории Бора этого периода, ограничивавшейся рассмотрением круговых орбит, характеризуемых только одним квантовым числом n (определяющим как энергию электрона, так и его момент импульса), особенно ярко проявилось при рассмотрении влияния внешних полей на спектральные линии. По этой же причине Бора постигли неудачи при рассмотрении электронных конфигураций сложных атомов во второй части трилогии и при попытках объяснения периодического закона. В рамках модельной теории решение всех этих задач оказалось возможным лишь на основе применения обобщенных квантовых условий Бора — Зоммерфельда.

Более успешным было рассмотрение Бором вопросов строения атома в статье 1915 г. ⁷⁸. В начале статьи Бор пишет о своей теории: «Так как теория подверглась критике и, кроме того, в последнее время были получены важные экспериментальные результаты, относящиеся к затронутому вопросу. в настоящей работе будет сделана попытка рассмотреть ряд вопросов более детально». Далее Бор характеризует свои общие предположения в виде шести пунктов (A, B, C, D, E, F), причем первые два он формулирует следующим образом (⁷⁸, с. 195):

«А. Атомная система обладает состояниями, в которых не происходит излучения, связанного с потерей энергии, даже если частицы движутся друг относительно друга и, согласно обычной электродинамике, излучение должно иметь место. Такие состояния называются «стационарными» состояниями рассматриваемой системы.

В. Любое испускание или поглощение энергии будет соответствовать переходу между двумя стационарными состояниями. Излучение при этом обладает определенной частотой, которая определяется соотношением $h\nu_{\text{rad}} = E_1 - E_2$, где h — постоянная Планка; E_1 , E_2 — значения энергии системы в двух стационарных состояниях.»

Пункт С совпадает с предположением 2 в ч. III трилогии (см. выше, с. 273) о применимости классической механики к «динамическому равновесию системы в стационарных состояниях», а согласно пункту D для одноэлектронного атома имеет место соотношение (8) между энергией и частотой. Далее Бор пишет: «До сих пор мы рассматривали системы, содержащие только один

электрон; однако предположения А и В, по-видимому, справедливы и в общем случае, так как они позволяют дать простое объяснение общему комбинационному принципу для спектральных линий» (78, с. 196). В качестве прямого подтверждения предположения А Бор ссылается на опыты Эйнштейна и В. де Гааза ⁸⁵, которые «указывают на то, что электроны могут вращаться в атомах, не излучая энергии» (78, с. 197).

Для многоэлектронных систем Бор, по-прежнему, приводит, в качестве пункта Е, гипотезу о равенстве момента импульса каждого электрона $h/2\pi$ для основного состояния (сформулированную в конце первой части трилогии; см. выше, с. 279), а в качестве пункта F предположение, что «конфигурация, удовлетворяющая условию Е, является устойчивой, если отвечающая ей полная энергия меньше, чем для любой другой конфигурации, удовлетворяющей тому же условию для моментов импульса электронов» (78, с. 197). Именно это условие Бор применял в трилогии.

Существенно, что Бор в виде отдельного и притом первого предположения (А) впервые выделяет постулат о стационарных состояниях, а в качестве второго предположения (В) приводит условие частот, подчеркивая общность этих предположений. Уже здесь на первых двух местах стоят два основных постулата Бора (ср. выше, с. 255) и лишь затем перечисляются предположения модельной теории.

В статье ⁷⁸ Бор впервые обсуждает (в конце § 3, посвященного спектрам систем, содержащих более одного электрона) результаты опытов Франка и Герца ⁷⁶. Он правильно интерпретирует значение $4,9 В$, соответствующее появлению «ультрафиолетовой линии ртути с длиной волны 2536 \AA » (78, с. 210), как потенциал возбуждения, а не как потенциал ионизации атома ртути (что было предположено Франком и Гером). Бор пишет: «Если приведенные рассуждения правильны, то это означает, что измерения Франка и Герца подтверждают теорию, рассмотренную в данной работе» (там же).

В последнем параграфе статьи ⁷⁸ (§ 4, посвященном высокочастотным спектрам) Бор рассматривает результаты исследований характеристических рентгеновских спектров, выполненных Мозли, и указывает, что «вся проблема в значительной степени прояснилась в результате недавних интересных исследований Косселя ⁷⁵». Бор подчеркивает, что на основе предположений Косселя получаются «простые соотношения между частотами ν_{rad} различных линий», которые «соответствуют обычному комбинационному принципу» (78, с. 212).

Следующую большую статью ⁸² Бор подготовил, продолжая развивать модельные представления о движении электронов по круговым орбитам, к началу 1916 г. Она была посвящена применению квантовой теории к движениям, характеризуемым, как было подчеркнуто выше, одним квантовым числом для каждого электрона.

Эта статья была представлена Резерфордом в журнал «Philosophical Magazine» в январе 1916 г. и должна была быть опубликована в апрельском номере. Однако после знакомства с работами Зоммерфельда (см. ниже, с. 286) Бор отказался от публикации данной статьи *).

Во введении к статье Бор пишет: «Квантовая теория была установлена как попытка преодолеть определенные трудности, которые возникают при применении обычной механики или электродинамики к атомным системам. Главные предположения теории поэтому неизбежно должны рассматриваться как постулаты, никаких обоснований которых не может быть дано на базе обычной механики и электродинамики. В то же время естественно встает вопрос, можно ли представить эти постулаты во взаимно согласованной форме, охватывающей разные весьма отличные применения. В настоящее время на это нельзя ответить в общем виде, поскольку теория до сих пор

*) Сохранилась ее корректура; она воспроизведена в ¹. Ее немецкий перевод был напечатан в сборнике ⁸⁶ вместе с переводами ранее опубликованных статей Бора.

была дана в определенной форме только для периодических систем, и представляется, что обобщение теории на другие системы связано с большими трудностями. В частном случае периодических систем, однако, положительный ответ, по-видимому, может быть дан, и в данной статье будет сделана попытка показать это» (1, р. 433).

Мы не будем подробно анализировать эту статью, которую Бор не стал публиковать, а дадим лишь краткую ее характеристику. В ней ярко проявилось стремление Бора к общей постановке вопросов и к четкой формулировке основных положений.

Уже во введении Бор приводит постулат о стационарных состояниях, включая в него и представление о квантовых переходах: «Фундаментальное допущение, на котором основываются соображения, следующее: Что атомная система может постоянно находиться лишь в определенном ряде состояний, соответствующих дискретному ряду значений ее энергии, и что любое изменение энергии системы, включая поглощение и испускание элетромагнитного излучения, должно происходить путем перехода между двумя такими состояниями. Эти состояния обозначаются как «стационарные состояния» системы» (1, р. 434).

Именно данная формулировка легла в основу последующих формулировок Бором его первого постулата (см. ниже, с. 288).

В § 1 статьи Бор рассматривает, исходя из модельной теории, «условия, которые должны выполняться в стационарных состояниях периодической системы». При этом «для любой периодической системы, которая содержит лишь одну движущуюся частицу», вместо условия (8) для круговых орбит, в котором кинетическая энергия $E_{\text{kin}} = E_{\text{rot}} = nh\nu_{\text{rot}}/2$ постоянна, Бор вводит более общее условие $\bar{E}_{\text{kin}} = nh\nu_{\text{per}}/2$, где ν_{per} — частота периодического движения, а \bar{E}_{kin} — среднее значение E_{kin} за полный период. Для периодических систем, содержащих несколько частиц, Бор предполагает это условие справедливым для каждой частицы в отдельности. Бор подчеркивает важность для квантовой теории инвариантности величины $E_{\text{kin}}/\nu_{\text{per}}$ и ссылается на известную работу П. Эренфеста⁸⁷ об адиабатических инвариантах. Однако такой подход не дает новых результатов для электрона в атоме, вращающегося вокруг ядра под действием кулоновской силы, когда частота обращения $\nu_{\text{per}} = \nu_{\text{rot}}$ будет той же самой «для каждого состояния, соответствующего тому же значению $\bar{E}_{\text{kin}}/\nu_{\text{rot}}$ » (т. е. для разных эллиптических орбит при заданной полной энергии E), и можно «рассматривать только круговую орбиту электрона» (с наибольшим моментом импульса $nh/2\pi$). Бор и не мог получить новых результатов, пока характеризовал орбиту электрона только одним квантовым числом n и не было еще представления о вырожденных стационарных состояниях, отличающихся значениями других квантовых чисел.

В § 2 Бор рассматривает, на основе условия частот, «излучение, испущенное и поглощенное при переходе между двумя стационарными состояниями». Он подчеркивает, опираясь на идею соответствия, что условие частот в приложении к атому водорода, $E_{n_2} - E_{n_1} = h\nu_{\text{rad}}$, может рассматриваться как обобщение соотношения $E_{n+1} - E_n = h\nu_{\text{rad}}$ для планковского осциллятора. Бор также указывает, что эти соотношения «формально согласуются с дебаевской теорией температурного излучения» (речь идет о работе Дебая⁵²; см. выше, с. 258).

Отметим, что Бор применяет условие частот и к вращательным спектрам двухатомных молекул, ссылаясь на работы Бьерума (см. выше, с. 257). Исходя из квантования энергии вращения молекулы $E_{\text{rot}} = n^2h^2/8\pi^2J$ (согласно условию $E_{\text{kin}} = nh\nu_{\text{rot}}/2$), Бор получает частоту перехода $\nu_{\text{rad}} = h(n_2^2 - n_1^2)/8\pi^2J$. Интересно, что он высказывает предположение (по аналогии с проявлением в инфракрасных спектрах поглощения только основного гармонического колебания, а не обертонов) о наличии переходов только между соседними стационарными состояниями, $n_1 = n$ и $n_2 = n + 1$, и находит для

таких переходов $\nu_{\text{rad}} = (h/4\pi^2J)(2n + 1)/2$. Здесь содержится идея правил отбора. Впоследствии Бор сформулировал ряд правил отбора на основе принципа соответствия (см. ниже, с. 289).

Наконец, в последнем § 3 Бор впервые разбирает вопрос, ссылаясь на Планка, о вероятностях стационарных состояний при статистическом равновесии периодических систем. Он использует представление о фазовом пространстве и о фазовых интегралах, которые он записывает для одной степени свободы в виде $Q = \int p dq = 2\bar{E}_{\text{kin}}/\nu_{\text{per}} = nh$, а для системы с r степенями свободы в виде $Q = C (nh)^r$, где C — «численная постоянная, зависящая от природы системы». Бор исходит из предположения, что вероятность стационарного состояния системы, «для которой каждая орбита периодична», может быть получена заменой дифференциала энергии dE в выражении, «выведенном на основе обычной статистической механики», величиной $h\nu_{\text{per}}$. Именно это предположение он приводит в конце статьи в качестве четвертого (и последнего). В качестве первого и третьего Бор приводит первый и второй основные постулаты, а в качестве второго дается соотношение модельной теории $\bar{E}_{\text{kin}} = nh\nu_{\text{per}}/2$, где ν_{per} — частота периодического движения (т. е. в частных случаях ν_{vibr} и ν_{rot}). Других предположений Бор уже не включает.

Вскоре после отправки статьи ⁸² в «Philosophical Magazine» Бор познакомился со статьями Зоммерфельда ^{88,89}, сформулировавшего обобщенные квантовые условия для систем с многими степенями свободы и весьма успешно применившего их для решения трехмерной задачи о движении электрона в одноэлектронном атоме с введением трех квантовых чисел и для объяснения тонкой структуры спектральных линий как релятивистского эффекта (на что Бор ранее указывал в заметке ⁸⁰) с введением постоянной тонкой структуры α (см. например, ⁷³, с. 22). Это было большим успехом в развитии модельной теории атома (которую можно обоснованно называть теорией Бора — Зоммерфельда), за которым последовало ее быстрое развитие вплоть до 1925 г., когда была создана квантовая механика.

Бор сразу очень высоко оценил достижения Зоммерфельда, не стал печатать свою статью ⁸² и занялся ее коренной переделкой, уже с учетом результатов работ Зоммерфельда.

Бор сразу написал Зоммерфельду (19 марта 1916 г. см. ¹, р. 603) о его «прекрасных и чрезвычайно интересных статьях» как о «Ваших блестящих и весьма важных результатах». А в письме Усену (17 марта 1916 г. ¹, р. 571) Бор писал: «Эта работа Зоммерфельда в значительной степени изменила современное положение квантовой теории...» Вместе с тем он отмечал, что «прекрасные результаты Зоммерфельда исключительно хорошо укладываются в мои соображения».

Отметим, что до Зоммерфельда независимо обобщенные квантовые условия были сформулированы В. Вильсоном, а также Д. Ишиварой (см. например, ²⁰, р. 92), а на работы которых Бор ссылаясь в статье ⁸² (¹, р. 275). Однако только Зоммерфельд применил эти условия к атомным спектрам и сразу добился больших успехов, что и определило решение Бора о переработке статьи ⁸².

Работа Бора по переделке статьи ⁸² заняла у него более полутора лет, до конца 1917 г. За это время появились знаменитые статьи Эйнштейна ^{90,91}, в которых два основных постулата Бора о стационарных состояниях и об излучательных квантовых переходах были применены при рассмотрении равновесия излучения с веществом. В данных статьях Эйнштейн ввел носящие его имя коэффициенты, определяющие вероятности излучательных квантовых переходов, спонтанных и вынужденных. В исследованиях Бора идеи Эйнштейна нашли важные применения (наряду с результатами Зоммерфельда) при подготовке им, на основе полной переработки статьи ⁸², фундаментальной статьи ⁹, которая стала началом следующего периода в его научной деятельности.

6. ПРИНЦИП СООТВЕТСТВИЯ И ТЕОРИЯ СЕРИАЛЬНЫХ СПЕКТРОВ] АТОМОВ (1917—1920 гг.)

В период с конца 1917 г. до конца 1920 г. основные исследования Бора были посвящены развитию идеи соответствия между квантовой и классической теориями и применению этой идеи в теории атомных спектров.

В данный период Бор был профессором Копенгагенского университета. С осени 1916 г., у него начал работать ассистентом приехавший из Голландии Х. Крамерс, ставший ближайшим его помощником. После окончания Первой мировой войны Бор приступил с 1919 г. к организации при Копенгагенском университете Института теоретической физики. К этому времени работы Бора уже получили широкую известность и он поддерживал научные связи с многими зарубежными учеными, в частности с Зоммерфельдом в Германии, вел обширную переписку и встречался с ними.

После публикации в 1918 г. работы ⁹ (первая ее часть появилась в марте, вторая — в декабре), Бор продолжал развивать свои новые идеи об интенсивностях в спектрах и правилах отбора, высказанные в этой работе на основе принципа соответствия. В 1919 — 1920 гг. он выступал с рядом докладов о своих исследованиях: в апреле 1919 г. в Лейдене о «Проблемах атома и молекулы» (², р. 201), в декабре 1919 г. и в феврале 1920 г. у себя в Копенгагене «О программе новейшей атомной физики» в Химическом обществе (², р. 221) и «О взаимодействии между излучением и веществом» в Королевской Датской академии (⁹, р. 227), в апреле 1920 г. «О сериальных спектрах элементов» в Берлине в Немецком физическом обществе. На основе берлинского доклада он опубликовал в сентябре 1920 г. в недавно начавшем выходить немецком журнале «Zeitschrift für Physik» важную статью ¹⁰ (она вошла затем как вторая статья в сборник ⁸) — следующую большую работу после статьи ⁹ 1918 г. Наконец, в декабре 1920 г. Бор сделал в Копенгагене в Физическом обществе доклад «Некоторые соображения о строении атомов» (³, р. 43); в результате развития высказанных в данном докладе идей в следующем 1921 г. он создал физическую теорию периодической системы элементов (см. ниже, раздел 7).

В основной работе рассматриваемого периода «О квантовой теории линейчатых спектров» ⁹, Бор в очень интересном введении характеризует успехи, достигнутые в развитии теории таких спектров Зоммерфельдом и вслед за ним другими учеными, в том числе в объяснении эффектов Штарка и Зеемана, и далее пишет: «Несмотря на большой прогресс, достигнутый в этих исследованиях, остаются нерешенными многие трудности фундаментального характера, касающиеся не только ограниченной применимости методов, используемых при расчете частот в спектре заданной системы, но в особенности вопроса о поляризации и интенсивности испускаемых спектральных линий. Эти трудности связаны внутренним образом с радикальным отходом от обычных идей механики и электродинамики, проявляющимся в основных принципах квантовой теории, и с тем, что до сих пор не оказалось возможным заменить эти идеи другими столь же согласованными и развитыми» (², р. 70). Бор указывает, что и в данном направлении «недавно достигнут большой успех», и ссылается на работы Эйнштейна ⁹⁰, ⁹¹ и Эренфеста ⁸⁷ (а также на последующие работы Эренфеста). Задачу работы ⁹ Бор формулирует следующим образом: «При данном состоянии теории может представлять интерес сделать попытку обсудить с единой точки зрения различные ее применения и, в особенности, рассмотреть лежащие в ее основе допущения в их связи с обычной механикой и электродинамикой. Такая попытка была предпринята в данной статье и будет показано, что кажется возможным пролить некоторый свет на еще нерешенные трудности, если попытаться проследить аналогию между квантовой теорией и обычной теорией как можно дальше» (там же).

Введение датировано ноябрем 1917 г., и в нем указывается, что работа разделена на четыре части: ч. I «содержит краткое обсуждение общих

принципов теории и рассмотрение применений общей теории к периодическим системам с одной степенью свободы и к упомянутому классу непериодических систем *)», ч. II «содержит подробное обсуждение теории спектра водорода с целью иллюстрировать общие соображения», ч. III «содержит обсуждение вопросов, возникающих в связи с объяснением спектров других элементов», ч. IV «содержит общее обсуждение теории строения атомов и молекул на основе применения квантовой теории к ядерной модели атома».

В 1918 г. Бор опубликовал только ч. I и ч. II; ч. III была напечатана лишь в ноябре 1922 г.⁸² в виде, как она была написана весной 1918 г., но с дополнением, датированным сентябрем 1922 г. и характеризующим развитие теории атомных спектров в 1919 — 1922 гг. В конце ч. III Бор благодарит своих сотрудников за «ценную помощь», особенно Крамерса, «который не только внес существенный вклад в предмет, но и любезно помогал мне в редактировании рукописи всех частей работы» (2, р. 184). Ч. IV вообще не была опубликована, сохранились лишь ее черновики (2, р. 186).

Посвященную общей теории линейчатых спектров ч. I работы⁹ Бор начинает с изложения общих принципов и прежде всего формулирует два «фундаментальные предположения», на которых базируется эта теория, — постулат о стационарных состояниях и постулат об излучательных квантовых переходах. Именно начиная с этой работы Бор приводит только эти два основных постулата и стремится их сформулировать возможно точнее.

Первый постулат Бор формулирует как и в статье⁸² (см. выше, с. 289), причем применяет термин «полный переход», которым пользуется и в дальнейшем. Он дает следующую формулировку второго постулата: «Излучение, поглощенное или испущенное при переходе между стационарными состояниями, является монохроматическим и обладает частотой ν_{rad} , определяемой соотношением $E' - E'' = h\nu_{\text{rad}}$, где h — постоянная Планка и где E' и E'' — значения энергии двух рассматриваемых состояний» (9, р. 71).

Бор подчеркивает дискретность излучательных переходов между стационарными состояниями и неприменимость к таким переходам «обычной электродинамики». Он рассматривает коэффициенты Эйнштейна $A_{n''n'}^{\text{sp}}$, $B_{n''n'}^{\text{sp}}$ и $B_{n''n'}^{\text{ind}}$ для спонтанного и вынужденного испусканий и для поглощения как величины, характеризующие «вероятности переходов» между стационарными состояниями с энергиями E' и E'' , и пишет, что эти коэффициенты являются константами, которые «зависят только от рассматриваемых стационарных состояний» (2, р. 73). Бор указывает, говоря о выводе Эйнштейном закона излучения Планка с использованием условия частот (1), что «теория Эйнштейна может рассматриваться как очень непосредственное подтверждение этого условия» (там же). Далее Бор пишет: «В последующем обсуждении применение квантовой теории для определения линейчатого спектра заданной системы не будет необходимым, совершенно так же, как и в теории теплового излучения вводить детальные представления о механизме перехода между двумя стационарными состояниями. Мы покажем, однако, что условия, которые будут использованы для определения значений энергии в стационарных состояниях, такого типа, что частоты, вычисленные согласно (1), в пределе, когда движения в последовательных стационарных состояниях отличаются друг от друга очень мало, будут стремиться совпасть с частотами, которые можно ожидать согласно обычной теории излучения для движения системы в стационарных состояниях. Чтобы получить необходимую связь с обычной теорией излучения в пределе медленных колебаний, мы поэтому непосредственно приходим к определенным выводам о вероятности перехода между двумя стационарными состояниями. Это приводит опять к определенным общим соображениям о связи между вероятностью перехода между любыми двумя стационарными состояниями и движением системы в таких со-

*) Бор во введении говорит о непериодических движениях «простого типа» и о «более расширенном классе непериодических систем» в связи с теорией эффекта Штарка.

стояниях. Будет показано, что это проливает свет на вопрос о поляризации и интенсивности различных линий в спектре заданной системы» (2, р. 74).

Бор также указывает на связь его соображений с адиабатической гипотезой Эренфеста (которую он называет принципом «механической преобразуемости» стационарных состояний).

В случае системы с одной степенью свободы периодическое движение с частотой $\nu_{\text{рег}}$ Бор разлагает на гармонические частоты $\tau\nu_{\text{рег}}$ ($\tau = 1, 2, 3, \dots$) с коэффициентами разложения C_τ , которые непосредственно определяют согласно «обычной электродинамике интенсивности излучений, соответствующих различным значениям τ » (2, р. 81). Он пишет, что мы должны ожидать для больших значений квантового числа n , что «эти коэффициенты будут согласно квантовой теории определять *вероятность спонтанного перехода* из заданного стационарного состояния, для которого $n = n'$, в соседнее состояние, для которого $n = n'' = n - \tau$. И далее: «... Мы можем ожидать, что также для малых значений n амплитуда гармонических колебаний, соответствующих заданному значению τ , будет каким-то образом давать меру вероятности перехода между двумя состояниями, для которых $n' - n'' = \tau$. Таким образом, в общем случае будет иметься определенная вероятность, что атомная система в стационарном состоянии спонтанно перейдет в любое другое состояние меньшей энергии, но если для всех движений заданной системы коэффициенты C в (14) *) равны нулю для некоторых значений τ , то следует ожидать, что не будут возможны переходы, для которых $n' - n''$ равно одному из этих значений» (2, р. 82). Мы видим, что применение идеи соответствия приводит к правилам отбора, в частности к правилу отбора $\Delta n = n' - n'' = 1$ для гармонического осциллятора ($C_\tau = 0$ при $\tau > 1$).

Для систем с многими степенями свободы Бор рассматривает условно-периодическое движение, характеризуемое s частотами движения и s квантовыми числами, и приходит к аналогичным результатам (коэффициенты C_τ заменяются коэффициентами типа $C_{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_s}$ и их равенство нулю определяет правила отбора для заданной системы).

В ч. II работы ⁹ Бор успешно применяет полученные им в ч. I результаты к атому водорода и рассматривает с единой точки зрения, трактуя как малые возмущения (следуя Зоммерфельду), тонкую структуру спектральных линий и их расщепление во внешних электрических и магнитных полях. В отличие от работы ⁷⁷ 1914 г., когда Бору не удалось детально интерпретировать эффекты Штарка и Зеемана (см. выше, с. 283), теперь он это делает, учитывая снятие вырождения внешним полем и правила отбора для введенного Зоммерфельдом квантового числа, определяющего проекцию момента импульса на направление поля. При этом получается и объяснение поляризации компонент штарковского и зеемановского расщеплений.

Об успехах, достигнутых в работе ⁹ в 1918 г., Бор в конце 1919 г. говорил в докладе «О программе новейшей атомной физики» (2, р. 223): «Соображения... аналогии между обычной теорией излучения и квантовой теорией приводят к рассмотрению условий, определяющих стационарные состояния в несколько отличном свете. В то время как раньше отправной точкой было надлежащее обобщение условия, дающего возможные значения планковского осциллятора, является также возможным такое рассмотрение проблемы, при котором стремятся определять стационарные состояния, учитывая данную аналогию». Отметим, что Бор еще говорит, как и в работе ⁹, об аналогии, не применяя термина «соответствие».

Из общих соображений Бора в это время следует еще отметить его оценку состояния теории взаимодействия излучения с веществом, данную им в докладе на эту тему в феврале 1920 г. (2, р. 235): «Мы должны допустить, что

*) Бор ссылается на формулу разложения координаты $\xi = \sum_{\tau} C_{\tau} \cos 2\pi (\tau\nu_{\text{рег}}t + c_{\tau})$, где C_{τ} и c_{τ} — постоянные коэффициенты.

в настоящее время у нас полностью отсутствует какое-либо действительное понимание взаимодействия между светом и веществом; в самом деле, по мнению многих физиков едва ли возможно предположить какую-либо картину, одновременно объясняющую явления интерференции и фотоэлектрический эффект, не вводя коренных изменений в точки зрения, на основе которых мы до сих пор пытались объяснить естественные явления». Необходимо подчеркнуть, что и в последующие годы, вплоть до создания квантовой механики и квантовой электродинамики, Бор остро ощущал отсутствие адекватной теории взаимодействия излучения с веществом.

Итоги своих исследований 1918 — 1920 гг. Бор изложил в статье «О серийных спектрах элементов»¹⁰. Мы ограничимся лишь общей характеристикой этой широко известной статьи. Бор дает четкую формулировку соответствия между квантовой и классической теориями, уже пользуясь терминами «соответствие» и «принцип соответствия», которые он применяет и в

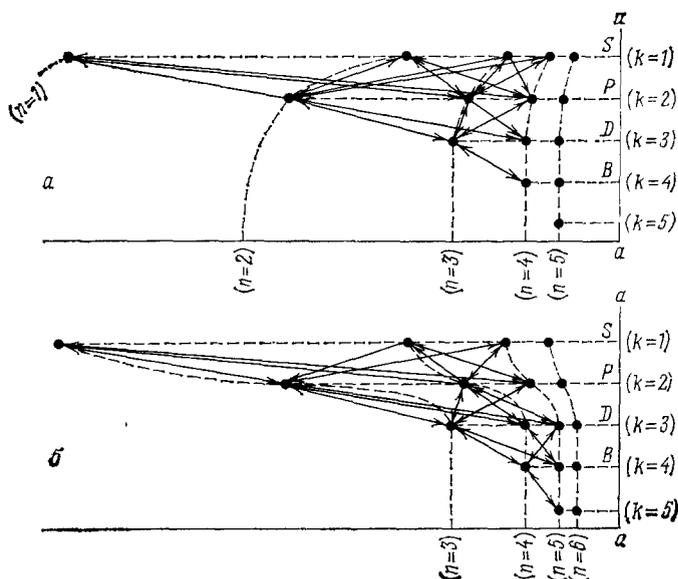


Рис. 2. Схема серийного спектра атома натрия согласно ¹⁰ (а) и ¹¹ (б)

последующих работах. Бор пишет: «Процесс излучения, связанный с переходом из одного стационарного состояния в другое, не может быть прослежен в деталях с помощью обычных электромагнитных представлений. Свойства излучения атома с точки зрения этих представлений обусловлены непосредственно движением систем и разложением этих движений на гармонические компоненты. Тем не менее оказалось, что существует далеко идущее соответствие между различными типами возможных переходов от одного стационарного состояния к другому, с одной стороны, и различными гармоническими компонентами разложения — с другой. Таким образом, рассматриваемая теория спектров может считаться до некоторой степени обобщением представлений обычной теории излучения»¹⁰, с. 250). А дальше он говорит об «упомянутом выше принципе соответствия»¹⁰, с. 252).

Наряду со спектром водорода Бор рассматривает серийные спектры многоэлектронных атомов и приводит¹⁰, с. 256) «теоретическую схему образования серийного спектра натрия» (рис. 2, а), на которой показаны допускаемые правилами отбора переходы между стационарными состояниями, характеризующимися двумя квантовыми числами n и k . Первое из них определяет последовательные состояния одного типа (S, P, D, . . .), а второе — величину момента импульса $M = kh/2\pi$ для эллиптической орбиты с отношением малой

полуоси к большой равным k/n ($k = 1, 2, 3, \dots$ для состояний типа $S, P, D, \dots; n \geq k$). Данная схема представляет собой первоначальный вариант хорошо нам знакомых схем уровней энергии, а характеристики стационарных состояний при помощи квантовых чисел n и k для каждого электрона в сложном атоме были широко использованы Бором в его последующих работах.

Бор также уделяет большое внимание теории эффектов Штарка и Зеемана, подчеркивая значение применения принципа соответствия для нахождения правил отбора и распределения интенсивностей компонент в картине расщепления.

В конце статьи Бор кратко останавливается на вопросе о строении атомов и молекул и отказывается от своих прежних представлений об электронных кольцах, которые он использовал ранее во второй и третьей частях трилогии⁵ (см. выше, с. 281). Бор пишет: «... Уже невозможно оправдать предположение, введенное для предварительной ориентировки, что в нормальных состояниях электроны движутся по геометрически особенно простым орбитам, подобным „электронным кольцам“ (10, с. 283), и далее указывает, что «мы вынуждены искать более сложные формы движения» (10, с. 284). Такие поиски привели Бора уже в 1921 г. к его теории периодической системы элементов (см. следующий раздел).

7. ФИЗИЧЕСКОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. ТРУДНОСТИ МОДЕЛЬНОЙ ТЕОРИИ И ПОИСКИ ПУТЕЙ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ (1921—1923 гг.)

1921 — 1923 гг. были периодом исключительно напряженной и разно-сторонней работы Бора. Он достиг больших конкретных успехов в развитии физической теории периодической системы элементов (которой начал заниматься еще в 1912 г., см. выше, с. 263), в объяснении их оптических и рентгеновских спектров. Вместе с тем Бор уделял значительное внимание общим вопросам квантовой теории, пониманию ее основ, глубоко осознавал трудности модельной теории атома и стремился их преодолеть. В отличие от предшествующего периода, когда он напечатал лишь две большие статьи^{9,10}, Бор опубликовал за 1921 — 1923 гг. целый ряд работ, в том числе фундаментальных. Он неоднократно выступал с докладами в Копенгагене и за границей, читал циклы лекций в Англии, Германии и США, встречался со многими зарубежными учеными, расширялись его научные связи.

Бор проводил свои исследования в организованном им в 1920 г. Институте теоретической физики Копенгагенского университета. Торжественное открытие Института состоялось в марте 1921 г. и на нем Бор выступил с речью; в ней он много говорил о международном сотрудничестве ученых, которому придавал большое значение (см. 2, р. 283). В Институте вели исследования вместе с Бором Х. Крамерс, О. Клейн, С. Росселанд и другие молодые его сотрудники. К Бору приезжали работать многие физики из разных стран. Стала складываться копенгагенская научная школа по теоретической физике. Работы самого Бора получили широкую известность и всеобщее признание, в 1922 г. ему была присуждена Нобелевская премия «за заслуги в изучении строения атома и его излучения».

По вопросам строения атома Бор в 1921 г. опубликовал два важных письма^{93,94} (в марте и в октябре) и статью общего характера⁹⁵ (в апреле); в сборнике⁸⁶ переводов своих статей 1913 — 1916 гг. он дал предисловие⁹⁶. Сохранились его черновые материалы этого времени о строении атома (см. 3, р. 99). В октябре 1921 г. Бор сделал в Копенгагене в Физическом обществе большой доклад «Строение атома в связи с физическими и химическими свойствами элементов», на основе которого он опубликовал весьма важную и обстоятельную статью¹¹, сперва по-датски, а затем, в марте 1922 г., в немецком переводе в «Zeitschrift für Physik» (она вошла, в дополненном ви-

де, третьей статьей в сборник⁸⁾. В 1923 г. Бор напечатал в январе и в мае две большие статьи о спектрах (по-немецки)²⁹ (совместно с Д. Костером) и³⁰.

Вопросам, связанным с применением принципа соответствия и с общими проблемами квантовой теории, с ее трудностями, был посвящен ряд работ Бора. В 1921 г. он опубликовал статью о поляризации излучения⁹⁷ (она вышла в августе) и подготовил доклад на Третьем Сольвеевском конгрессе «О применении квантовой теории к проблемам атома»⁹⁸. Конгресс состоялся в апреле 1921 г., но Бор не смог принять в нем участия из-за сильного переутомления и его доклад был сделан Эренфестом, который дополнил этот доклад своими соображениями о принципе соответствия⁹⁹. Бор продолжал работу по применению квантовой теории к общим проблемам атома (сохранились его черновые материалы, см. ², р. 397). В 1922 г. в марте Бор сделал доклад в Лондонском Физическом обществе «Влияние электрических и магнитных полей на спектральные линии», содержащий применения принципа соответствия (доклад был опубликован позже, в июле 1923 г.¹⁰⁰), а в июне напечатал письмо о правилах отбора¹⁰¹). В январе 1923 г. Бор опубликовал в «Zeitschrift für Physik» большую и принципиально важную статью¹² об основных постулатах квантовой теории (продолжение этой статьи, посвященное теории сериальных спектров, Бор не опубликовал; сохранился его черновик, см. ², р. 501).

Итоги развития квантовой теории атома за десятилетие Бор подвел в декабре 1922 г. в своей Нобелевской лекции «Строение атома»¹⁰², в начале которой он сказал: «... Я полагаю, что поступлю в согласии с традициями Нобелевского фонда, если я построю это сообщение как обзор развития, происходившего в последние годы в области физики, к которой относится данная работа» (³, р. 429).

Среди циклов лекций Бора особенно большой успех имели семь лекций о квантовой теории строения атома, прочитанные им в Германии в Гёттингенском университете в июне 1922 г. и получившие впоследствии название «Боровского фестиваля» (см. ²², р. 259). Сохранились представляющие большой интерес подробные записи этих лекций; они опубликованы в ³, р. 341. Также опубликованы (см. ², р. 584) конспекты более позднего цикла из шести лекций, прочитанных Бором в Йельском университете в Нью-Хейвене (США) в октябре 1923 г. («Силлимановских лекций»). В лекциях Бор всегда уделял большое внимание принципиальным вопросам квантовой теории.

В данной статье нет возможности дать подробный анализ даже наиболее важных работ Бора периода 1921 — 1923 гг., к которым относятся статья¹¹ о физических и химических свойствах элементов *), статья¹² об основных постулатах квантовой теории и итоговая Нобелевская лекция о строении атома¹⁰². Мы ограничимся рассмотрением вопросов, связанных с общим подходом Бора к постановке и решению проблем квантовой теории атома, особенно ярко проявившемся в перечисленных работах, и с его оценкой трудностей этой теории.

Прежде всего необходимо подчеркнуть, что Бор уделяет весьма большое внимание общим положениям теории — ее двум постулатам и принципу соответствия. В статье¹¹ и лекции¹⁰² он четко характеризует данные постулаты, а в посвященной им статье¹² их детальное рассмотрение занимает центральное место. Глава I этой статьи «Стационарные состояния» начинается с § 1, носящего название «Первый основной постулат», а глава II («Процессы излучения») — с § 1, носящего название «Второй основной постулат». Бор пишет о первом постулате, что «требование, содержащееся в этом постулате, противоречит классической теории» (¹², с. 483), а о втором постулате, что «он приводит к усилению разрыва с классической электродинамикой, намеченного еще первым постулатом» (¹², с. 502). Очень большое место в работах

*) Детальный разбор этой статьи, содержащей изложение физической теории периодической системы элементов Д. И. Менделеева, выполнен автором в статье ⁷³ (см. также ¹⁰³).

Бора занимает принцип соответствия как важнейший общий принцип. В статье ¹¹ он пишет о «результатах, к которым приводит принцип соответствия в отношении вопроса об осуществимости переходов между различными парами стационарных состояний; эти результаты имеют решающее значение для следующего» (¹¹, с. 335; речь идет о правилах отбора для квантовых чисел, в частности, в сериальных спектрах типа, изображенного на рис. 2, а, который Бор привел в статье ¹⁰ (см. выше, с. 290) и вновь помещает в статье ¹¹, с. 333). В Нобелевской лекции Бор посвящает принципу соответствия отдельный раздел (¹⁰², с. 437) и отмечает его значение для интерпретации эффектов Зеемана и Штарка (что более подробно рассмотрено Бором в докладе ¹⁰⁰). Особенно много внимания Бор уделяет принципу соответствия в статье ¹² об основных квантовых постулатах в § 2—4 гл. II (которе не носят названия «Принцип соответствия», «Принцип соответствия и определение стационарных состояний», «Принцип соответствия и структура излучения»). Он пишет в начале первого из этих параграфов: «Несмотря на принципиальные расхождения постулатов квантовой теории с классической электродинамикой, оказалось все же возможным на основе соотношений (А) и (В) *) установить некоторым образом связь между процессом излучения и движением в атоме. При этом метод сопоставления дает объяснение тому, что законы классической теории пригодны для описания явлений в некоторой граничной области» (¹², с. 505).

Успех Бора в создании физической теории периодической системы элементов был обусловлен удачным сочетанием общих положений с наглядными представлениями модельной теории об эллиптических орбитах электронов в сложных атомах, характеризующихся двумя квантовыми числами, — главным квантовым числом n (этот термин Бор вводит в статье ¹¹, с. 337), аналогичным квантовому числу, определяющему энергию электрона в атоме водорода, и квантовым числом k ($k = 1, 2, \dots, n$), определяющим величину момента импульса электрона $M = kh/2\pi$ (такие орбиты Бор обозначает символом n_k).

Бор рассматривает «*распадающийся на Z ступеней*» процесс последовательного связывания электронов ядром с атомным номером Z и пишет, что «Для каждого такого *процесса присоединения* нужно ожидать собственного спектра» (¹¹, с. 330).

Отметим, что Бор сумел найти правильные значения главного квантового числа n для присоединяемых электронов, используя спектральные данные. Он приводит, в частности (см. ¹¹, с. 351), схему для сериального спектра натрия (рис. 2, б), на которой даны правильные значения для стационарных состояний внешнего электрона атома натрия n , в частности, $n = 3$ для основного состояния (на рис. 2, а была дана лишь относительная нумерация n и для основного состояния было положено $n = 1$).

Весьма существенно, что Бор наряду с представлениями модельной теории и данными о сериальных спектрах атомов учитывает, при определении последовательности связывания электронов на различные типы орбит с возрастающими значениями n , периодичность химических и физических свойств электронов. Он также использует, при определении чисел электронов на орбитах с заданным n и с различными k , соображения симметрии в отношении пространственного расположения орбит. В статье ¹¹ он не приводит никаких расчетов и применяет качественные соображения, в частности, о проникающих эллиптических орбитах, для которых «орбита валентного электрона частично проходит в область внутренних конфигураций» (¹¹, с. 352). Отметим, что Нобелевская лекция содержит наглядный рисунок, показывающий проникновение электронов с малыми значениями k ($k = 1, 2$), движущихся по сильно вытянутому эллиптическим орбитам, во внутренние области атома (¹⁰², с. 441).

*) Правил квантования Бора — Зоммерфельда (А) и условия частот (В).

Бор сумел найти правильные числа заполнения электронных орбит с различными значениями n (последовательных электронных слоев K, L, M, N, \dots) и, что было особенно существенно, убедительно показать, каким образом образуются группы переходных элементов в четвертом, пятом и шестом периодах и группа редкоземельных элементов в шестом периоде путем заполнения более внутренних орбит $3s, 4s, 5s$ и $4d$ (электронных оболочек $3d, 4d, 5d$ и $4f$ по современной терминологии²⁸).

Отметим, что Бор приводит таблицу (¹¹, с. 363) распределения электронов по орбитам для атомов инертных газов, считая, однако, на основе соображений симметрии, что при заданном n числа электронов с различными значениями k одинаковы (например, для Ag получается по 4 электрона 3_1 и 3_2 вместо 2 и 6, а для Xe по 6 электронов $3_1, 3_2$ и 3_3 вместо 2, 6 и 10). Как известно, правильные числа заполнения удалось найти еще в рамках модельной теории атома. В 1924 г. это сделал Э. Стонер и независимо Д. Мейн Смит, а в 1925 г. В. Паули их обосновал, исходя из своего знаменитого принципа запрета¹⁰⁴ (см., например,²², р. 667 и ⁷³, с. 36).

В дополнениях к тексту статьи¹¹ при ее опубликовании в сборнике⁸, а также в Нобелевском докладе¹⁰² Бор приводит периодическую таблицу в виде, наглядно показывающем заполнение внутренних слоев (см.⁴, с. 364, 420).

В физической теории периодической системы ярко проявилась исключительная интуиция Бора. Дальнейших успехов он достиг в объяснении спектров сложных атомов в статьях^{29,30}.

Итоги развития модельной теории атома и его спектров как Бором и Зоммерфельдом, так и многими другими учеными, нашли отражение в известной монографии Зоммерфельда «Строение атома и спектральные линии», вышедшей с 1919-го по 1924 г. четырьмя изданиями¹⁰⁵.

Однако наряду с крупными достижениями модельной теории атома Бора — Зоммерфельда эта теория встретила с большими и принципиальными трудностями, связанными с применениями к стационарным состояниям классической механики при искусственно накладываемых квантовых условиях. Эти трудности особенно проявились в 1922 — 1923 гг. В частности, Бору и Крамерсу не удалось правильно решить даже проблему простейшей двух-электронной системы — атома гелия, которой они занимались с 1916 по 1923 гг. (см.³, р. 36), а при объяснении строения электронных оболочек атома и спектральных данных приходилось исключать состояния электрона с $k = 0$, которым соответствовал момент импульса, равный нулю (в модельной теории случай, когда эллиптическая орбита вырождается в прямую, проходящую через ядро). Как известно, лишь в квантовой механике было показано, что орбитальный момент импульса электрона равен $M = (h/2\pi) \sqrt{l(l+1)}$, где $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ и S -состояния ($k = 1, l = n-1 = 0$) стали правильно рассматривать как соответствующие моменту импульса, равному нулю.

Бор отчетливо понимал неудовлетворительность модельной теории атома, ее принципиальные недостатки. Это видно из его высказываний весной 1922 г., как раз в то время, когда его успехи в создании физической теории периодической системы привлекли всеобщее внимание.

В письме А. Гаазу 11 апреля 1922 г. Бор писал о квантовой теории атома (², р. 647): «... Изложение этой теории («новейших теорий спектров и строения атома»), которое находят в большинстве специальных учебников, например в известном труде Зоммерфельда, по моему мнению, не кажется особенно подходящим ни в отношении предшествующего хода развития теории, ни в отношении ее теперешних точек зрения, чтобы дать читателю представление о принципах квантовой теории, которое будет соответствовать действительному содержанию теории». А в известном письме Зоммерфельду 20 апреля 1922 г. Бор высказался еще определеннее (², р. 691): «В последние годы я часто чувствовал себя в научном отношении очень одиноко, находясь

под впечатлением, что мои стремления систематически развивать, по мере моих лучших возможностей, принципы квантовой теории встречаются с очень малым пониманием. Для меня идет речь не о дидактических мелочах, но о серьезной попытке найти такую внутреннюю связь, которая позволила бы надеяться на создание надежной основы дальнейшего построения. Я хорошо понимаю, как еще мало выяснены вопросы и как я беспомощен в выражении моих мыслей в легко доступной форме». Далее Бор писал: «Подобные вопросы я рассмотрю глубже в статье, которая скоро появится в *«Zs. Phys.»* *) и которая будет содержать более подробное обсуждение высказываний, имеющих в моем докладе о строении атома **)» (там же).

О весьма глубоком подходе Бора, который он впоследствии развил в период становления квантовой механики, выдвинув принцип дополнительности, свидетельствует его беседа с Гейзенбергом в июне 1922 г. Гейзенберг, бывший тогда студентом Зоммерфельда в Мюнхенском университете, слушал в Гёттингене лекции Бора (см. выше, с. 292), на которых и познакомился с ним. О своей первой беседе с Бором во время прогулки Гейзенберг в очень инерсной книге воспоминаний³⁷ пишет: «Эта прогулка оказала сильнейшее влияние на мое последующее научное развитие, или, пожалуй, можно сказать лучше, что мое собственно научное развитие только и началось с этой прогулки» (37, S. 59). Гейзенберг приводит ряд высказываний Бора, который в начале беседы говорил об истории квантовой теории: «Исходным пунктом отнюдь не была мысль, что атом является планетной системой малого размера и что здесь можно было бы применять законы астрономии. Так буквально я всего этого никогда не принимал. Но для меня исходной точкой была устойчивость вещества, которая с точки зрения предшествующей физики ведь является абсолютным чудом» (37, S. 60). Об устойчивости вещества Бор далее сказал: «Вследствие устойчивости вещества пьютоновская физика не может быть справедливой внутри атома, она может в лучшем случае эпизодически давать отправную точку. И поэтому она также не может давать никакого наглядного описания строения атома, так как такое описание — именно потому, что оно должно быть наглядным, — должно было бы использовать понятия классической физики, которые, однако, уже больше не охватывают происходящего. Вы понимаете, что в такой теории пытаются, по существу, достичь чего-то совсем невозможного. Ибо мы должны что-то высказать о строении атома, однако, не обладаем никаким языком, при помощи которого могли бы сделать себя понятными ... В таком положении теория вообще не может объяснять в смысле, как обычно принято в науке. Речь идет о том, чтобы выявить взаимосвязи и осторожно ощупью идти вперед» (37, S. 62). На вопрос Гейзенберга о смысле «картин атомов», которые Бор показывал и обсуждал на своих лекциях, Бор ответил: «Эти картины ведь выводятся из опытов, или, если Вы хотите, угаданы, а не получены из каких-либо теоретических расчетов. Я надеюсь, что эти картины так хорошо описывают строение атома, но притом и только так хорошо, как это возможно на наглядном языке классической физики» (37, S. 63). О будущем физики Бор сказал: «Мы должны ожидать, что парадоксы квантовой теории, непонятные черты, связанные с устойчивостью вещества, будут с каждым новым опытом выступать во все более ярком свете. Когда это произойдет, то можно надеяться, что с течением времени образуются новые понятия, при помощи которых мы сможем охватить и эти не являющиеся наглядными процессы в атоме, но от этого мы еще весьма далеки» (37, S. 63).

Воспоминания Гейзенберга, несомненно, правильно передают общий характер взглядов Бора в тот период, его надежды на разрешение в будущем трудностей квантовой теории.

*) Речь идет о статье¹².

**) В докладе¹¹.

Особенно много внимания Бор уделял трудностям квантовой теории в последний год рассматриваемого периода — 1923 г. В это время весьма остро встал вопрос о связи волновых и корпускулярных представлений об электромагнитном излучении, после открытия в конце 1922 г. А. Комптоном получившего его имя эффекта изменения длины волны рентгеновских лучей при их рассеянии свободными (или слабо связанными) электронами¹⁰⁶. Данный эффект был объяснен самим Комптоном¹⁰⁷ и независимо Дебаем¹⁰⁸ как результат столкновений квантов излучения с электронами, в соответствии с гипотезой световых квантов Эйнштейна. Бор продолжал не соглашаться с этой гипотезой *) и искал других путей разрешения трудностей квантовой теории, еще стремился как-то согласовать квантовые представления с классической электродинамикой **).

Внимание Бора к общим вопросам физической теории в конце 1923 г. хорошо отражает краткая запись его лекции в одном из университетов США, прочитанной 29 октября этого года, «О некоторых философских аспектах современной теории атома» (2, р. 46):

«Постепенное развитие понятий, лежащих в основе науки. Развитие механики. Галилей, Ньютон и Эйнштейн. Независимость описания от субъективных условий. Электромагнитная теория. Фарадей, Максвелл. Электромагнитная теория света. Работы Эйнштейна. Форма законов классической физики, возможно, окончательная.

Законы атомного мира. Открытие атомистической структуры электричества и строение атома. Изменение характера физических соображений. Обратная проблема. Квантовая теория излучения. Парадокс. Невозможность компромисса. Описание атомного процесса с помощью соображений вероятности. Анализ понятия вероятности. Проблематичный характер выигрыша от создания картины, основанной на классических идеях. Анализ того, что означает объяснение в науке».

В своих черновых материалах 1923—1924 гг. «Проблемы теории атома» Бор писал (2, р. 569): «Современное состояние развития теории атома характеризуется проблемой объяснения типичных физических и химических свойств элементов, на основе общего знания составных частей атомов, полученного изучением явлений, не связанных непосредственно с этими свойствами. Наиболее характерной чертой попыток разрешить эту проблему является убеждение, что не может быть достигнуто никакого прогресса без существенного отказа от точек зрения, с помощью которых мы до сих пор пытались, с таким большим успехом, объяснить явления, которые непосредственно доступны наблюдению при помощи наших чувств и которые зависят от коллективного действия огромного числа атомов. Однако поисковый характер, которым неизбежно должны обладать усилия вскрыть законы, управляющие поведением отдельных атомов, едва ли можно подчеркнуть сильнее, чем признав, что не только описание свойств элементов, обоснованное на интерпретации

*) См. выше, с. 259. Перед открытием Комптона в статье¹² (в § 1 главы III, носящем название «Гипотеза световых квантов») Бор писал о ней: «...Гипотеза световых квантов непригодна для того, чтобы дать общую картину процессов, которая могла бы включать всю совокупность явлений, рассматриваемых при применении квантовой теории» (12, с. 518). Отметим, однако, что Бор положительно относился к идее квантования собственных колебаний поля излучения (см. выше, с. 258). Еще в конце 1913 г. в докладе⁷ он упоминает о выводе Дебаем (в работе⁵²) закона излучения Планка (7, с. 160), а в очень интересной статье⁹⁷ специально сравнивает выводы этого закона Эйнштейном⁹¹ и Дебаем⁵² и пишет: «Оба вывода следует считать очень важными, хотя общими у них являются лишь исходные предпосылки» (97, с. 294).

**) Как известно, Бор в 1924 г. пытался в работе¹⁰⁹ (совместно с Крамерсом и Д. Слетером) сохранить представления электромагнитной теории света за счет отказа от выполнения законов сохранения энергии и импульса при элементарных процессах. Лишь в мае 1925 г. в послесловии к статье⁶¹ Бор пришел к выводу о том, «что желаемое обобщение электродинамики потребует решительной ломки понятий, на которых до сих пор было основано описание природы» (61, с. 560). Однако разбор этих вопросов выходит за рамки нашего рассмотрения, ограничивающегося предшествующим периодом.

наблюдений на языке понятий классической физики, но даже наше знание составных частей атомов зависит, по природе вещей, от использования законов классической физики».

Мы видим, что здесь уже намечаются идеи Бора о роли классических понятий при описании микроскопических явлений. Бор приступал к глубокому анализу теории таких явлений с очень общих точек зрения, особенно характерному для последующих периодов его научной деятельности.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивая значение основополагающих исследований Бора по квантовой теории атома и принципу соответствия, выполненных им в 1912—1923 гг., следует, прежде всего, подчеркнуть трудность того решительного шага, который сделал Бор весной 1913 г. в первой части трилогии⁵, став на путь самого резкого разрыва с представлениями классической физики. Об этом особенно ярко свидетельствуют высказывания Резерфорда и Эйнштейна о теории Бора. Резерфорд впоследствии, в 1936 г., писал (¹¹⁰, с. 490): «Я считаю первоначальную квантовую теорию спектров, выдвинутую Бором, одной из самых революционных из всех когда-либо созданных в науке; и я не знаю другой теории, которая имела бы больший успех». И хорошо известно высказывание Эйнштейна в 1949 г. в его «Автобиографических заметках» (¹¹¹, с. 275), говорившего о следствиях закона Планка: «. . . Все мои попытки приспособить теоретические основы физики к этим результатам потерпели полную неудачу. Это было так, точно из-под ног ушла земля и нигде не было видно твердой почвы, на которой можно было бы строить. Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточно, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем — найти главные законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это мне кажется чудом и теперь. Это наивысшая музыкальность в области мысли».

Анализ работ Бора данного периода убедительно показывает, что важнейшее место в его исследованиях занимали фундаментальные новые идеи стационарных состояний и квантовых переходов между ними, нашедшие свое выражение в первом постулате и, применительно к излучательным переходам, во втором постулате (условии частот (1)).

Идея стационарных состояний базировалась на глубоком понимании Бором проблем устойчивости атомных систем, необъяснимой на основе как классической электродинамики, так и классической механики. Необходимо подчеркнуть, что вопросы механической устойчивости атомов и молекул рассматривались Бором уже в 1912 г. в «резерфордовском меморандуме», а затем в 1913 г. в ч. II и ч. III трилогии⁵. Вопросы устойчивости атомных систем по отношению к излучению Бор всегда подчеркивал, начиная в 1913 г. (в ч. I трилогии), как характерное свойство этих систем.

Идею квантовых переходов — скачкообразных («полных» по терминологии Бора) изменений энергии атомных систем, «квантовых скачков», — Бор развивал также с 1913 г., когда он раскрыл сущность спектральных закономерностей и объяснил комбинационный принцип Ридберга — Ритца. Важно, что уже в ч. I трилогии Бор рассмотрел, наряду с излучательными, и безызлучательные квантовые переходы.

В тесной связи с идеями о стационарных состояниях и об излучательных квантовых переходах Бор развивал и идею соответствия между квантовой и классической теориями, сначала, в 1913 г., в применении к частотам, а затем, начиная с 1917 г., к интенсивностям и поляризациям таких переходов. Весьма существенным было понимание Бором, на основе идеи соответствия, вероятностной природы излучательных квантовых переходов, что ярко проявилось при рассмотрении им в ч. I работы⁹ коэффициентов Эйнштейна.

Очень плодотворным было применение принципа соответствия при создании Бором в 1921—1923 гг. физической теории периодической системы элементов и дальнейшем развитии им теории атомных спектров в рамках модельной теории. Однако особенно важной оказалась роль принципа соответствия в 1925 г., когда Гейзенберг непосредственно опирался на этот принцип при создании квантовой механики в матричной форме, что было началом становления квантовой механики ¹⁴.

Следует специально подчеркнуть, что развитие современной физики показало, что принцип соответствия в общей форме как принцип связи между собой новых и старых физических теорий должен рассматриваться в качестве одного из важнейших методологических принципов физики ¹¹². Начало его развитию было положено Бором.

Сейчас, когда отмечается 100-летие со дня рождения Нильса Бора, нам особенно ясно непреходящее значение его исследований 1912—1923 гг. по квантовой теории атома и принципу соответствия.

Белорусский государственный университет
им. В. И. Ленина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B o h r N. Collected Works. V. 2. Work on Atomic Physics (1912—1917)/Ed. U. Hoeyer.— Amsterdam: North-Holland, 1981.
2. B o h r N. Collected Works. V. 3. The Correspondence Principle (1918—1923)/Ed. J. R. Nielsen.— Amsterdam: North-Holland, 1976.
3. B o h r N. Collected Works. V. 4. The Periodic System (1920—1923)/Ed. J. R. Nielsen.— Amsterdam: North-Holland, 1977.
4. Б о р Н. Избранные научные труды. т. I. Статьи. 1909—1925.— М.: Наука, 1970.
5. B o h r N. On the Constitution of Atoms and Molecules.— *Phil. Mag.*, 1913, v. 26, p. 1 (pt. I), 476 (pt. II), 857 (pt. III) (также ¹, p. 159; перевод в ⁴, с. 84).
6. B o h r N. The Spectra of Helium and Hydrogen.— *Nature*, 1913, v. 92, p. 231 (также ¹, p. 273; перевод в ⁴, с. 149).
7. B o h r N. Om brintspekret.— *Fysisk Tidsskrift*, 1914, v. 2, p. 97 (также ¹, p. 284; перевод в ⁴, с. 152).
8. B o h r N. Drei Aufsätze über Spektren und Atombau.— Braunschweig: Vieweg, 1922 (перевод: Б о р Н. Три статьи о спектрах и строении атомов./Пер. с нем. С. И. Вавилова.— М.; Л.: Гостехиздат, 1923).
9. B o h r N. On the Quantum Theory of Line Spectra.— *Kgl. Danske Vid. Selsk. Skr.*, 1918, v. 4, No. 1, p. (pt. I), p. 37 (pt. II) (также ², p. 65).
10. B o h r N. Über die Serienspektren der Elemente.— *Zs. Phys.*, 1920, Bd. 2, S. 423 (также ², p. 241; перевод в ⁴, с. 247).
11. B o h r N.— *Fysisk Tidsskrift*, 1921, v. 19, p. 153; Der Bau der Atome und die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Elemente.— *Ibidem*, 1922, Bd. 9, S. 1 (также ³, p. 181; перевод в ⁴, с. 318).
12. B o h r N. Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau. I. Die Grundpostulate der Quantentheorie.— *Ibidem*, 1923, Bd. 13, S. 117 (также ², p. 455; перевод в ⁴, с. 482).
13. Б о р Н. Жизнь и творчество: Сб. статей.— М.: Наука, 1967.
14. Е л њ я ш е в и ч М. А. От возникновения квантовых представлений до становления квантовой механики.— *УФН*, 1977, т. 122, с. 673.
15. B o h r N. Collected Works. V. 1. Early Work (1905—1911)/Ed. J. R. Nielsen.— Amsterdam: North-Holland, 1972.
16. Н о у е р U. Geschichte der Bohrschen Atomtheorie.— Weinheim: Physik Verlag, 1974.
17. Н о у е р U. Über die Rolle der Stabilitätsbetrachtungen in der Entwicklung der Bohrschen Atomtheorie.— *Arch. Hist. Exact Sci.*, 1973, v. 10, p. 177.
18. R o s e n f e l d L. Introduction.— In: B o h r N. On the Constitution of Atoms and Molecules.— Copenhagen: Munksgaard, 1963 (Papers of 1913 reprinted from the *Philosophical Magazine*).
19. H e i l b r o n J. L., K u h n T. S. The Genesis of the Bohr Atom.— In: Historical Studies in the Physical Sciences.— Philadelphia: Univ. Pennsylvania Press, 1969, v. 1, p. 211.
20. J a m m e r M. The Conceptual Development of Quantum Mechanics.— N. Y.: McGraw-Hill, 1966.
21. H u n d F. Geschichte der Quantentheorie.— 2. Aufl.— Mannheim: B. I. Wissenschaftsverlag, 1975 (перевод: Х у н д Ф. История квантовой физики.— Киев: Наукова думка, 1980).

22. Mehra J., Rechenberg H. The Historical Development of Quantum Theory. V. 1, pt. 1, 2. The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld. 1900—1925.— New York; Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 1982.
23. Кляус Е. М., Франкфурт У. И., Френк А. М. Нильс Бор.— М.: Наука, 1977.
24. Ельяшевич М. А. Важный этап развития квантовой теории [реп. на ⁴].— УФН, 1971, т. 103, с. 381.
25. Ельяшевич М. А. Истоки, возникновение и развитие квантовой теории.— В кн.: Физика XX века: развитие и перспективы. Сб. статей. М.: Наука, 1984, с. 9.
26. Печенкин А. А. Математическое обоснование в развитии физики.— М.: Наука, 1984, с. 172.
27. Bohr N. Atom.— In: Encycl. Britt.— 13th ed.— 1926, v. 2, p. 262 (также ³, p. 642).
28. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия.— М.: Физматгиз, 1962.
29. Bohr N., Coster D. Röntgenspektren und periodisches System der Elemente.— Zs. Phys., 1923, Bd. 12, S. 342 (также ³, p. 483; перевод в ⁴, с. 453).
30. Bohr N. Linienspektren und Atombau.— Ann. d. Phys., 1923, Bd. 71, S. 228 (также ³, p. 549).
31. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 2.— 3-е изд.— М.: Наука, 1981.
32. Гольдин Л. Л., Новикова Г. И. Введение в атомную физику.— М.: Наука, 1969.
33. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 3.— 2-е изд.— М.: Наука, 1981.
34. Atom (by A. P. French).— In: Encycl. Britt. (Chicago ed.).— 1969, v. 2, p. 703.
35. Борн М. Атомная физика.— 3-е изд./Пер. с англ.— М.: Мир, 1970.
36. Шпольский Э. В. Атомная физика. Т. I.— 7-е изд.— М.: Наука, 1984.
37. Heisenberg W. Der Teil und das Ganze: Gespräche im Umkreis der Atomphysik.— München: R. Piper Verlag (англ. перевод: Heisenberg W. Physics and Beyond: Encounters and Conversations.— N.Y.: Harper and Row, 1971).
38. Rutherford E. The Scattering of α - and β -particles by Matter and the Structure of the Atom.— Phil. Mag., 1911, v. 21, p. 669 (перевод в кн.: Резерфорд Э. Избранные научные труды. Строение атома и искусственное превращение элементов.— М.: Наука, 1972, с. 207).
39. Hermann A. Frühgeschichte der Quantentheorie (1899—1913).— Mosbach in Baden: Physik Verlag, 1969.
40. Kuhn T. S. Black-body Theory and the Quantum Discontinuity. 1894—1912.— Oxford: Oxford Univ. Press, 1978.
41. La Théorie du Rayonnement et les Quanta: Rapports et Discussions de la Réunion tenue à Bruxelles, 1911.— Paris: Gautier-Villars, 1912; Die Theorie der Strahlung und der Quanten.— Abhandl. Deutsch. Bunsenges., 1914, Bd. 3.
42. Mehra J. The Solvay Conferences on Physics: Aspects of the Development of Physics since 1911.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1975.
43. Planck M. Die Gesetze der Wärmestrahlung und die Hypothese der elementaren Wirkungsquanten.— In ⁴¹, S. 77 (перевод: Планк М. Избранные труды.— М.: Наука, 1975, с. 282).
44. Einstein A. Zum gegenwärtigen Stande des Problems der spezifischen Wärme.— In ⁴¹, S. 330 (перевод: Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966, т. III, с. 277).
45. Planck M. Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung.— Leipzig: J. A. Barth, 1906.
46. Einstein A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.— Ann. d. Phys., 1905, Bd. 17, S. 132 (перевод как в ⁴⁴, с. 92).
47. Einstein A. Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption.— Ibidem, 1906, Bd. 20, S. 199 (перевод: Ibidem, с. 128).
48. Einstein A. Die Plancksche Theorie und die Theorie der spezifischen Wärme.— Ibidem, 1907, Bd. 22, S. 180 (перевод: ibidem, с. 134).
49. Ельяшевич М. А. Вклад Эйнштейна в развитие квантовых представлений.— УФН, 1979, т. 128, с. 503.
50. Weiss P. Über die rationalen Verhältnisse der magnetischen Momente der Moleküle und das Magneton.— Phys. Zs., 1911, Bd. 12, S. 935.
51. Ehrenfest P. Zur Plancksche Strahlungstheorie.— Phys. Zs., 1906, Bd. 7, S. 528 (перевод: Эренфест П. Относительность. Кванты. Статистика. Сб. статей.— М.: Наука, 1972, с. 40).
52. Debye P. Der Wahrscheinlichkeitsbegriff in der Theorie der Strahlung.— Ann. d. Phys., 1910, Bd. 33, S. 1427.
53. Lorentz H. A. The Motion of Electrons in Metallic Bodies.— Proc. Amsterdam Acad., 1905, v. 7, p. 438, 585, 684.

54. Lorentz H. A. On the Emission and Absorption by Metals of Rays of Great Wavelengths.— *Ibidem*, 1903, v. 5, p. 666.
55. Thomson J. J. On the Structure of the Atom.— *Phil. Mag.*, 1904, v. 7, p. 237.
56. Thomson J. J. On the Theory of Radiation.— *Ibidem*, 1910, v. 20, p. 238.
57. Bohr N. Reminiscences of the Founder of Nuclear Science and of Some Developments Based on His Work.— *Proc. Phys. Soc.* 1961, v. 78, p. 1083 (перевод: Бор Н. Избранные научные труды. Т. II. Статьи. 1925—1961.— М.: Наука, 1971, с. 545; то же: УФН, 1963, т. 80, с. 215).
58. Darwin C. G. A Theory of Absorption and Scattering of α Rays.— *Phil. Mag.*, 1912, v. 23, p. 901.
59. Bohr N. On the Theory of the Decrease of Velocity of Moving Electrified Particles on Passing through Matter.— *Ibidem*, 1913, v. 25, p. 10 (также ¹, p. 17; перевод в ⁴, с. 63).
60. Bohr N. On the Decrease of Velocity of Swiftly Moving Electrified Particles in Passing through Matter.— *Ibidem*, 1915, v. 30, p. 581 (также ¹, p. 58; перевод в ⁴, с. 215).
61. Bohr N. Über die Wirkung von Atomen bei Stossen.— *Zs. Phys.*, 1925, Bd. 34, S. 142 (перевод в ⁴, с. 549).
62. Bohr N. The Penetration of Atomic Particles through Matter.— *Kgl. Danske Vid. Selsk. Skr.*, 1948, v. 18, No. 8 (перевод: Бор Н. Прохождение атомных частиц через вещество.— М.: ИЛ, 1950).
63. Bohr N., Lindhard J. Electron Capture and Loss by Heavy Ions Penetrating through Matter.— *Ibidem*, 1954, v. 28, N 7, p. 3 (перевод как в ⁵⁷, с. 445).
64. Nicholson J. W. The Constitution of the Solar Corona.— *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1912, v. 72, p. 139 (I), 677 (II), 729 (III).
65. McCormack R. The Atomic Theory of John William Nicholson.— *Arch. Hist. Exact Sci.*, 1966, v. 3, p. 160.
66. Hevesy G. Die Valenz der Radioelemente.— *Phys. Zs.*, 1913, Bd. 14, S. 49.
67. Van den Broek A. Die Radioelemente, das periodische System und die Konstitution der Atome.— *Ibidem*, S. 32.
68. Лисневский Ю. И. Атомные веса и возникновение ядерной физики.— М.: Наука, 1984.
69. El'yashovich M. A., Lisnevsky Yu. I. New Materials on the Life and Scientific Activities of A. J. van den Broek.— *Janus*, 1981, v. 68, p. 241.
70. Haas A. Der Zusammenhang des Planckschen Wirkungsquantums mit den Grundgrößen der Elektronentheorie.— In: *Jahrbuch Radiokt. und Elektr.*, 1910, Jg. 7, S. 261.
71. Алексеев И. С., Овчинников Н. Ф., Печенкин А. А. Методология обоснования квантовой теории (история и современность).— М.: Наука, 1984.
72. Ritz W. Über ein neues Gesetz der Serienspektren.— *Phys. Zs.*, 1908, Bd. 9, S. 521.
73. Елъяшевич М. А. Периодический закон Д. И. Менделеева, спектры и строение атома.— УФН, 1970, т. 100, с. 5.
74. Wood R. W. *Physical Optics*.— 2nd ed.— N.Y., 1911, p. 513.
75. Kossel W. Bemerkung zur Absorption homogener Röntgenstrahlen.— *Verhandl. Deutsch. Phys. Ges.*, 1914, Bd. 16, S. 898; Zur Absorption homogener Röntgenstrahlen. II.— *Ibidem*, S. 953.
76. Frank J., Hertz G. Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und den Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben.— *Ibidem*, S. 457; Über die Erregung der Quecksilberresonanzlinie 253,6 μm durch Elektronenstöße.— *Ibidem*, S. 512.
77. Bohr N. On the Effect of Electric and Magnetic Fields on Spectral Lines.— *Phil. Mag.*, 1914, v. 27, p. 506 (также ¹, p. 347; перевод в ⁴, с. 169).
78. Bohr N. On the Quantum Theory of Radiation and the Structure of the Atom.— *Ibidem*, 1915, v. 30, p. 394 (также ¹, с. 389; перевод в ⁴, с. 194).
79. Bohr N. Atomic Models and X-ray Spectra.— *Nature*, 1914, v. 92, p. 553 (также ¹, p. 303; перевод в ⁴, с. 168).
80. Bohr N. On the Series Spectrum of Hydrogen and the Structure of the Atom.— *Phil. Mag.*, 1915, v. 29, p. 332 (также ¹, p. 375; перевод в ⁴, с. 187).
81. Bohr N. The Spectra of Hydrogen and Helium.— *Nature*, 1915, v. 95, p. 6 (также ¹, p. 383; перевод в ⁴, с. 191).
82. Bohr N. On the Application of the Quantum Theory to Periodic Systems (фотовоспроизведено в ¹, p. 431).
83. *Physics at the British Association*.— *Nature*, 1913, v. 92, p. 305.
84. Stark J. Beobachtungen über den Effekt des elektrischen Feldes auf Spektrallinien.— *Sitzungsber. Press. Akad. Wiss.*, 1913, S. 932.
85. Einstein A., de Haas W. Experimenteller Nachweis der Ampèreschen Molekularströme.— *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, 1915, Bd. 17, S. 152 (перевод как в ⁴⁴, с. 363).
86. Bohr N. *Abhandlungen über Atombau aus den Jahren 1913—1916*.— Braunschweig: Vieweg, 1921.

87. E h r e n f e s t P. A Mechanical Theorem of Boltzmann and its Relation to the Theory of Energy Quanta.— Proc. Amsterdam Acad., 1913, v. 16, p. 591 (перевод как в⁵¹).
88. S o m m e r f e l d A. Zur Theorie der Balmerischen Serie.— Sitzungsber. Bayer. Akad. Wiss. (München), 1915, S. 425.
89. S o m m e r f e l d A. Die Feinstruktur des Wasserstoff- und der Wasserstoff-ähnlichen Linien.— Ibidem, S. 549.
90. E i n s t e i n A. Strahlung-Emission und -Absorption nach der Quantentheorie. Verh. Deutsch. Phys. Ges., 1916, Bd. 18, S. 318 (перевод как в⁴⁴, с. 386).
91. E i n s t e i n A. Zur Quantentheorie der Strahlung.— Phys. Zs., 1917, Bd. 18, S. 121 (перевод: Ibidem, с. 393).
92. B o h r N. On the Quantum Theory of Line Spectra.— Kgl. Danske Vid. Selsk. Skr., 1922, v. 4, No 1, p. 101 (pt. III) (также², p. 167).
93. B o h r N. Atomic Structure.— Nature, 1921, v. 107, p. 104 (также³, p. 71; перевод в⁴, с. 285).
94. B o h r N. Atomic Structure.— Ibidem, v. 108, p. 208 (также³, p. 175; перевод в⁴, с. 301).
95. B o h r N. Unsere heutige Kenntnis über Atome.— Die Umschau, 1921, Bd. 25, S. 229 (также³, p. 83).
96. B o h r N. Geleitwort — In⁸⁶, S. IV (также², p. 303; перевод в⁴, с. 304).
97. B o h r N. Zur Frage der Polarization der Strahlung in der Quantentheorie.— Zs. Phys., 1921, Bd. 6, S. 1 (также², p. 339; перевод в⁴, с. 293).
98. B o h r N. L'application de la théorie des quanta aux problèmes atomiques.— In: et électrons: Rapports et discussions du Atomes Conseil de physique Solvay. 1921.— Paris: Gautier-Villars, 1923, p. 228 (также², p. 364).
99. E h r e n f e s t P. Principe de correspondance.— Ibidem, p. 248 (также², p. 381).
100. B o h r N. The Effect of Electric and Magnetic Fields on Spectral Lines.— Proc. Phys. Soc., 1923, v. 35, p. 275 (также², p. 415; перевод в⁴, с. 380).
101. B o h r N. On the Selection Principle of the Quantum Theory.— Phil. Mag., 1922, v. 43, p. 1112 (также², p. 447; перевод в⁴, с. 376).
102. B o h r N. The Structure of the Atom.— Nature, 1923, v. 112, p. 29; Über den Bau der Atome.— Naturwissenschaften, 1923, Bd. 11, S. 606 (также³, p. 425; перевод в⁴, с. 417).
103. K r a g h H. Niels Bohr's Second Atomic Theory.— In: Historical Studies in the Physical Sciences.— Baltimore; London; The John Hopkins Univ. Press, v. 10, p. 123.
104. P a u l i W. Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren.— Zs. Phys., 1925, Bd. 31, S. 765 (перевод: Паули В. Труды по квантовой теории. 1920—1928.— М.: Наука, 1977, с. 645).
105. S o m m e r f e l d A. Atombau und Spektrallinien.— Braunschweig: Vieweg, 1919 (2. Aufl., 1921; 3. Aufl., 1922; 4. Aufl., 1924) (перевод: Зоммерфельд А. Строение атома и спектры/Пер. с 3-го нем. изд.— М.; Л.: Госиздат, 1926).
106. C o m p t o n A. H. Secondary Radiations Produced by X-rays.— Bull. Nat. Res. Council, 1922, v. 4 (pt. 2), No. 20, p. 1.
107. C o m p t o n A. H. A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements.— Phys. Rev., 1923, v. 21, p. 483.
108. D e b y e P. Zerstreung von Röntgenstrahlen und Quantentheorie.— Phys. Zs., 1923, Bd. 24, S. 161.
109. B o h r N., K r a m e r s H. A., S l a t e r J. C. The Quantum Theory of Radiation.— Phil. Mag., 1924, v. 47, p. 785 (перевод в⁴, с. 526).
110. R u t h e r f o r d E. Forty Years of Physics. II. The Development of the Theory of Atomic Structure.— In: Background to Modern Science.— Cambridge: 1940, p. 60 (перевод: Резерфорд Э. Избранные научные труды. Строение атома и искусственное превращение элементов.— М.: Наука, 1972, с. 485).
111. E i n s t e i n A. Autobiographisches (Autobiographical Notes).— In: Albert Einstein — Philosopher-Scientist.— Evanston, 1949, p. 1 (перевод: Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1967, т. IV, с. 259).
112. Принцип соответствия: Историко-методологический анализ.— М.: Наука, 1979.