

БИБЛИОГРАФИЯ

019.941:530.145

ВАЖНЕЙШИЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ**(к выходу первого тома избранных научных трудов Нильса Бора)**

Нильс Бор. **И з б р а н н ы е н а у ч н ы е т р у д ы**, в двух томах (серия «Классики науки»). Том 1, 1909—1925, М., «Наука», 1970, 584 стр., ц. 2 р. 77 к.

Вслед за завершением четырехтомного собрания научных трудов Альберта Эйнштейна в серии «Классики науки» вышел первый том избранных научных трудов другого великого физика-теоретика XX века — Нильса Бора. Такое собрание трудов Бора издается впервые. В данном томе вошли основные работы Бора за период, предшествующий созданию квантовой механики, в том числе его знаменитая работа 1913 г. по теории атома, которая положила начало важнейшему этапу развития квантовой теории и значение которой трудно переоценить.

Выход этого тома избранных трудов Бора особенно важен потому, что история развития квантовой теории в период 1913—1925 гг. часто излагается неверно, в ряде монографий и учебников дается неправильная формулировка и оценка постулатов Бора, о чем будет подробнее сказано ниже. Теперь не только немногие специалисты, но и широкий круг физиков сможет ознакомиться с классическими трудами Бора, повяты глубину его физических идей, правильно представить развитие этих идей.

В первый том включено 27 работ, опубликованных с 1909 по 1925 г. Из крупных работ не вошли в том (помимо неопубликованной докторской диссертации 1911 г. «Исследования по электронной теории металлов») лишь две работы — большая работа «О квантовой теории линейчатых спектров», напечатанная по-английски в трудах Копенгагенской академии (Danske Vidensk. Selsk. Skrifter 8, p. IV, 1 (1913)), и работа «Линейчатые спектры и строение атома», напечатанная по-немецки (Ann. d. Phys. 71, 228 (1923)). В томе опубликованы все остальные крупные работы, в том числе самые важные, и ряд статей небольшого объема, также содержащих существенный материал. Ранее из этих 27 работ были переведены на русский язык лишь Нобелевская лекция Бора (работа 22) и три обобщающих доклада Бора, вошедшие в сборник «Три статьи о спектрах и строении атома» (перевод С. И. Вавилова, М.—Пг., Госиздат, 1923), который сейчас является библиографической редкостью. В томе эти три статьи (работы 7, 14 и 19) воспроизведены в переводе С. И. Вавилова (заново сверенном). Заметим, что переводы всех остальных работ, вошедших в том (включая Нобелевскую лекцию), сделаны специально для данного издания. Переводчики И. В. Андреев, И. М. Дремин, Т. С. Петелина, А. М. Френк и В. Я. Френкель в основном справились со сложной задачей правильной передачи английского и немецкого текста статей Бора, написанных трудным для перевода языком (18 работ переведены с английского и 9 работ с немецкого). Следует отметить большую работу, проведенную составителем тома У. И. Франкфуртом и его редактором С. И. Лариним; удачно составлены У. И. Франкфуртом и А. М. Френком краткие комментарии к статьям. Следует только пожалеть, что библиография работ Бора будет помещена лишь во втором томе (в комментариях на нее даны ссылки). Нужно также отметить, что в тексте имеется некоторое число опечаток и мелких недосмотров.

Том начинается первыми двумя работами Бора 1909 и 1910 гг. (работы 1 и 2), единственными его экспериментальными исследованиями. Они посвящены определению коэффициента поверхностного натяжения воды. К вопросам поверхностного натяжения Бор вернулся через много лет — в 30-х годах — при разработке теории деления атомных ядер на основе капельной модели. К 1912 г. относится заметка Бора об электронной теории термоэлектрических явлений (работа 3) — единственная опубликованная статья, написанная на основе докторской диссертации 1911 г. посвященной объяснению совокупности свойств металлов, исходя еще из представлений классической электронной теории. Две статьи, 1913 г. (работа 4) и 1915 г. (работа 13), посвящены

теории торможения заряженных частиц при прохождении через вещество. Первая из этих работ выполнена Бором в 1912 г. в Манчестерской лаборатории Резерфорда, и явилась продолжением расчетов Дж. Дж. Томсона и Дарвина, основанных на классической теории. Во второй работе, тоже выполненной в Манчестере, где Бор преподавал в университете в 1914—1916 гг., изложены дальнейшие расчеты, также на основе классической теории. В этих работах показана зависимость скорости торможения от частот собственных колебаний электронов в атомах и произведено сравнение с опытом. В обеих работах в конце выражается благодарность Резерфорду. Исследованиями торможения заряженных частиц Бор неоднократно занимался и в последующие годы.

Все остальные работы, включенные в первый том и относящиеся к 1913—1925 гг., посвящены квантовой теории атомных систем. Именно в этих работах Бор ввел новые представления о закономерностях микроскопических явлений, отличных от закономерностей макроскопических явлений, что затем сыграло решающую роль в создании квантовой механики и квантовой электродинамики. Можно проследить развитие Бором его теории атома на протяжении указанного периода, причем необходимо подчеркнуть две стороны теории Бора, — с одной стороны, основные ее предположения о существовании стационарных состояний и об оптических квантовых переходах между ними (два основных постулата Бора), которые были затем всесторонне подтверждены экспериментально и получили обоснование в квантовой механике и квантовой электродинамике, и, с другой стороны, конкретную модель атома Бора, в которой движение рассматривается на основе классической механики при дополнительных условиях квантования. Отметим, что в ряде книг («Атомная физика» Макса Борна, «Атомная физика» Э. В. Шпольского, том первый, «Оптика. Строение атома. Атомное ядро» М. И. Корсунского, и другие) дано правильное изложение теории Бора, однако в значительной части физической литературы, особенно учебной, смешиваются эти две стороны теории Бора, в число основных постулатов Бора неправильно включается условие квантования круговых орбит, говорится о том, что теория Бора оказалась неверной, не уточняя, что это относится только к конкретной модели, а не к основным постулатам, и т. д. *). Часто недооценивается и значение развития Бором принципа соответствия, что явилось подготовкой к созданию квантовой механики и квантовой электродинамики.

Работы Бора по квантовой теории атомных систем открываются статьей «О строении атомов и молекул», три части которой были опубликованы во второй половине 1913 г. в журнале «Philosophical Magazine» (работа 5, о которой упоминалось в начале рецензии). Бор исходил из модели атома Резерфорда. Уже в первой части этой статьи Бор, опираясь на теорию Планка, сделал основные допущения, позволившие физически объяснить комбинационный принцип Ритца, получить значение постоянной Ридберга и интерпретировать спектры водорода и ионизованного гелия, что явилось замечательным успехом теории Бора. Свои основные допущения, в применении к модели атома Резерфорда, Бор формулирует следующим образом (стр. 90):

«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».

Далее Бор разъясняет:

«Первое допущение напрашивается само собой, 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. Второе допущение находится в явном противоречии с общепринятым пониманием электро-

* Такое смешение имеет место, например, в «Курсе общей физики» Г. А. Зисмана и О. М. Годеса, томе III (4-е изд., «Наука», М., 1970), стр. 267—268, в недавно вышедшем и в целом удачном «Введении в атомную физику» Л. Л. Гольдина и Г. И. Новиковой («Наука», М., 1969), § 28, где, в частности, говорится, что «постулаты Бора в существенной мере утратили свое значение и в настоящее время представляют главным образом исторический интерес»; при этом постулаты Бора авторы формулируют неточно и насчитывают их три, включая в число постулатов условие квантования момента количества движения электрона, движущегося по разрешенной орбите. По мнению рецензента, основные постулаты Бора должны излагаться в курсе атомной физики в разделе, посвященном экспериментальным основам квантовой теории, а модельные представления теории Бора следует рассматривать отдельно; их краткий разбор на основе квазиклассического приближения вполне уместен и после изложения фундаментальных положений квантовой механики.

динамики, но представляется необходимым для объяснения экспериментально установленных фактов».

Для получения сериальной формулы для спектра водорода Бор делает и более специальное допущение о том, что энергия W захвата электрона в стационарное состояние равна $W = \tau h \frac{\omega}{2}$, где τ — целое число, h — постоянная Планка, а ω — частота обращения электрона по круговой орбите. Весьма существенно, что Бор затем обосновывает это допущение, требуя, чтобы частота перехода ν из состояния с $\tau = N$ в состояние с $\tau = N - 1$ равнялась при больших τ «в соответствии с обычной электродинамикой» частоте обращения электрона ω . Это требование представляет первоначальную форму принципа соответствия.

Следует подчеркнуть, что Бор получает для круговых орбит, как следствие своих допущений, условие квантования момента импульса, $M = \tau \frac{h}{2\pi}$. Как известно,

до Бора квантование момента импульса рассматривал Никольсон (на которого Бор ссылается); однако Никольсон отождествлял частоту линий в спектре с частотой колебания рассматриваемой механической системы, что у Бора имеет место только в предельном случае. Именно предположение Бора о частоте перехода, отличной от собственных частот системы и определяемой по формуле $W_2 - W_1 = h\nu$ разностью энергий двух стационарных состояний, означало решительный разрыв с классическими представлениями. В статье разбирается и целый ряд вопросов, касающихся строения атомов с различным числом электронов и строения молекул, причем, естественно, на этом этапе развития теории многие вопросы не могли быть еще решены. Особого внимания заслуживают резкие работы, «Заключительные замечания», где очень четко сформулированы основные предположения и полученные результаты.

В небольшой статье «Спектры водорода и гелия» (работа 6), датированной 8 октября 1913 г. и помещенной в «Nature», рассмотрено отличие постоянной Ридберга водорода и понижованного гелия и показано наличие полного совпадения теории и эксперимента при учете движения ядра, что явилось, как известно, новым блестящим успехом теории Бора.

Очень большой интерес представляет работа 7 — доклад Бора, прочитанный 20 декабря 1913 г. в Копенгагене и опубликованный в начале 1914 г. на датском языке. Он затем вошел первой статьей в уже упомянутый сборник «Три статьи о спектрах и строении атома». В докладе особенно важно четкое разделение общих предположений о стационарных состояниях и квантовых переходах между ними и конкретных предположений, связанных с применением классической механики. О них Бор пишет (стр. 161): «Предположим, что для вычисления числа обращений электрона в стационарных состояниях системы можно воспользоваться полученной ранее формулой для ω (речь идет о классической формуле, связывающей ω с энергией W . — М. Е.). Такое предположение естественно. Если мы желаем вообще составить наглядное представление о стационарных состояниях, у нас нет других средств, по крайней мере сейчас (курсив мой. — М. Е.), кроме обычной механики». Сразу после этого используется соответствие (как и в работе 5, но еще более четким образом) с классической электродинамикой в предельном случае больших квантовых чисел и отсюда получается значение постоянной Ридберга. Свой доклад Бор заканчивает словами (стр. 167) «...Я хотел бы выразить надежду, что я выразился достаточно ясно и вы поняли то резкое противоречие между изложенными соображениями и поразительно гармоничным кругом представлений, которые называют классической электродинамикой. В то же время я стремился пробудить в вас надежду, что, быть может, именно подчеркивание указанного противоречия приведет со временем к определенной связи и в новых представлениях. Стремление разрешить «указанное противоречие», поиск «определенной связи и в новых представлениях» характерны для последующих работ Бора.

Из работ Бора 1914 г. следует отметить большую статью «О влиянии электрических и магнитных полей на спектральные линии» (работа 9), являющуюся прямым продолжением основной работы 5 (она также была напечатана по-английски в «Phil. Mag.»). В ее начале (§ 1) четко сформулированы основные общие положения. В явном виде выписывается соотношение $h\nu = A_1 - A_2$ (A_1 и A_2 — энергии состояний «элементарной системы») и вводится понятие о стационарных состояниях, а лишь затем рассматривается «механическая интерпретация упомянутых стационарных состояний» и применяются соображения соответствия. Главное внимание уделено влиянию на спектр электрического поля (§ 2) и магнитного поля (§ 3) и объясняются общие черты эффектов Штарка и Зеемана.

В начале 1915 г. вышла небольшая статья Бора (также в «Phil. Mag.») «О сериальном спектре водорода и строении атома» (работа 10), в которой Бор впервые обращает внимание на релятивистские поправки, связанные с изменением массы электрона со скоростью и имеющие порядок $(v/c)^2$. Этот вопрос, следуя Бору, вскоре подробно разработал Зоммерфельд, давший известную теорию тонкой структуры спектральных линий атома водорода и водородоподобных атомов.

Работой, завершающей первый цикл работ Бора по квантовой теории атома, явилась статья, опубликованная в «Phil. Mag.» в сентябре 1915 г., «О квантовой теории излучения и структуре атома» (работа 12). В начале этой работы в специальном параграфе перечислены и обсуждены шесть общих предположений теории (от А до F), причем первые два предположения сформулированы следующим образом (стр. 195).

«А. Атомная система обладает состояниями, в которых не происходит излучения, связанного с потерей энергии, даже если частицы движутся друг относительно друга и Герда по ионизации в парах ртути», которые, как известно, дали непосредственное экспериментальное подтверждение двух основных предположений Бора. Интересно подчеркнуть, что Бор правильно интерпретирует значение ускоряющей разности потенциалов 4,9 e, при которой начинается потеря электронами энергии, как потенциал возбуждения, а не как потенциал ионизации; последнее было предположено Франком и Герцем, и они лишь впоследствии признали правильность интерпретации Бора.

В. Любое испускание или поглощение энергии будет соответствовать переходу между двумя стационарными состояниями. Излучение при таком переходе обладает определенной частотой, которая определяется соотношением

$$h\nu = A_1 - A_2, \quad (1)$$

где h — постоянная Планка; A_1, A_2 — значения энергии системы в двух стационарных состояниях».

Бор указывает на большую общность этих предположений по сравнению с остальными, «так как они позволяют дать простое объяснение общему комбинационному принципу для спектральных линий» (здесь Бор ссылается на начало статьи 9). Можно видеть, какое внимание Бор уделяет правильной формулировке основных предположений. Весьма важным в статье явилось обсуждение «недавних замечательных экспериментов Франка и Герца по ионизации в парах ртути», которые, как известно, дали непосредственное экспериментальное подтверждение двух основных предположений Бора. Интересно подчеркнуть, что Бор правильно интерпретирует значение ускоряющей разности потенциалов 4,9 e, при которой начинается потеря электронами энергии, как потенциал возбуждения, а не как потенциал ионизации; последнее было предположено Франком и Герцем, и они лишь впоследствии признали правильность интерпретации Бора. По предельной серии Пашена Бор определял потенциал ионизации атома ртути как равный 10,5 e (современное значение 10,44 e). В конце статьи Бор разбирает результаты исследований Мозли (после гибели Мозли в 1915 г. Бор написал обзор его научной деятельности, приведенный в рецензируемом томе целиком в комментариях к работе 8; см. стр. 568) и объяснение возникновения рентгеновских спектров, данное Косселем. Бор показывает, на основе экспериментальных значений Мальмера, что для рентгеновских линий хорошо выполняются комбинационные соотношения, данные Косселем на основе квантовой теории атома.

Следующая важная работа Бора «О серийных спектрах элементов» (работа 14, — вторая статья в сборнике «Три статьи о спектрах и строении атома») относится уже к 1920 г. (как указывалось выше, работа Бора 1918 г., напечатанная в трудах Копенгагенской академии, в рецензируемый том не вошла; она была посвящена общей формулировке принципа соответствия, и ее содержание вкратце изложено в комментариях; см. стр. 572). Это доклад Бора, сделанный в Берлине 27 апреля 1920 г. Важным шагом вперед явилось развитие Бором принципа соответствия; Бор пишет (стр. 250): «...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 системы 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». В статье рассматривается возникновение серийных спектров элементов с учетом классификации состояний электронов при помощи двух квантовых чисел, причем широко используется принцип соответствия.

Еще более важная работа Бора «Строение атомов и связи с физическими и химическими свойствами элементов» (работа 19, — последняя статья в сборнике «Три статьи о спектрах и строении атома») была опубликована по-датски в конце 1921 г. и в немецком переводе в начале 1922 г.; ее основой явился доклад Бора 18 октября 1921 г. в Копенгагене. В данной работе Бор дал физическую теорию периодической системы. Это явилось важнейшим приложением теории Бора *). Основные, самые общие предположения сформулированы в работе в виде двух (и только двух!) постулатов, которые представляют уточнение общих предположений в предшествующих работах, начиная с 1913 г. Бор формулирует эти постулаты следующим образом (стр. 319): «Согласно первому постулату существуют особые состояния атома, в которых последний не излу-

*) Подробное рассмотрение данной работы было произведено рецензентом в статье «Периодический закон Д. И. Менделеева, спектры и строение атома» (УФН 100, 5 (1970)).

чает энергии, хотя частицы совершают ускоренные движения одна относительно другой. Далее предполагается, что эти так называемые *стационарные состояния* обладают своеобразной устойчивостью такого рода, что атому нельзя сообщить энергию или отнять ее от него иначе как процессом, переводящим атом из одного стационарного состояния в другое. По *второму постулату* всякое излучение атома, связанное с переходом между двумя стационарными состояниями, состоит всегда из чисто гармонических волн. Частота этих волн не зависит непосредственно от движения атома и определяется так называемым *условием частот*. Согласно этому условию, произведение частоты колебаний на универсальную постоянную, введенную Планком, равняется всей излученной при данном процессе энергии. Для процесса перехода между двумя стационарными состояниями с соответственными значениями энергии E' и E'' находим, следовательно,

$$h\nu = E' - E'', \quad (1)$$

где h — постоянная Планка, ν — частота колебаний излучения». В работе также дается краткое рассмотрение принципа соответствия. Интересно заключение работы (стр. 375): «...Существует некоторая внутренняя связь в представлениях о строении атома, как это мы пытались показать. С другой стороны, очевидна незаконченность наших соображений в двух направлениях: в отношении разработки деталей и в отношении обоснования общих исходных положений. Однако, по-видимому, нет другого пути для продвижения в области изучения атома, кроме того, которому следовали до сих пор, пути напряженного одновременного развития наших представлений в обоих направлениях». В последующем Бор продолжал уделять особое внимание «обоснованию общих исходных положений».

К 1923 г. относится работа Бора «Влияние электрических и магнитных полей на спектральные линии» (работа 21), в которой очень широко применяется принцип соответствия. Основные два постулата в этой работе и в Нобелевской лекции Бора (работа 22), прочитанной 11 декабря 1922 г., формулируются так же, как в работе 19. В том же 1923 г. Бор опубликовал статью «Рентгеновские спектры и периодическая система элементов» (совместно с Костером, статья 23) и статью «О применении квантовой теории к строению атома. 1. Основные постулаты квантовой теории» (работа 24). В этой последней статье в § 1 главы I, «Стационарные состояния», формулируется первый основной постулат, и в § 1 главы II, «Процессы излучения», — второй основной постулат*), Бор подчеркивает (стр. 502), что второй постулат «приводит к усилению разрыва с классической электродинамикой, намеченного еще первым постулатом», и указывает, что мы «вынуждены еще дальше отойти от обычного описания природы» (т. е. классического описания), принимая, что процесс испускания или поглощения зависит как от начального, так и от конечного состояния. Далее он говорит: «...Мы естественно приходим к методу рассмотрения, который впервые был применен Эйнштейном в его выводе закона теплового излучения на основе постулата квантовой теории в данной здесь форме. Согласно этому способу рассмотрения мы не интересуемся «причиной» появления переходов с излучением, а просто принимаем, что эти процессы подчиняются *вероятностным законам*» и еще далее (стр. 504): «Несмотря на большое значение эйнштейновского способа рассмотрения, вследствие его несомненного успеха, во многих отношениях он может рассматриваться лишь как предварительное, решение» В следующих параграфах главы II Бор рассматривает ряд вопросов, связанных с принципом соответствия, а в главе III, «О формальной природе квантовой теории», разбирает вопрос о различных путях преодоления «принципиальных трудностей, возникающих при попытке указать появление прерывностей в атомных процессах при применении понятий классической электродинамики». В конце статьи Бор выражает надежду (стр. 525) «на будущую последовательную теорию, которая одновременно будет воспроизводить наиболее характерные для применения черты квантовой теории и тем не менее сможет рассматриваться как обобщение классической электродинамики».

Такой подход Бора сыграл исключительную роль в скором времени при создании квантовой механики. Бором была сделана попытка, совместно с Крамерсом и Слетером, в статье 1924 г. «Квантовая теория излучения» (работа 25) построить квантовую теорию с отказом от выполнения законов сохранения энергии и импульса в элементарных процессах при статистическом сохранении этих величин. Однако, в связи с результатами опытов Боте и Гейгера по рассеянию рентгеновских лучей, установивших выполнение законов сохранения в элементарном процессе рассеяния, Бор в июле 1925 г. в послесловии к статье «О действии атомов при соударении» (работа 27, последняя в рецензируемом томе) отказывается от статистической теории законов сохранения и пишет (стр. 560), что «нужно быть готовым к тому, что желаемое обобщение классической электродинамики потребует решительной ломки понятий, на которых до сих пор было

*) Ту же формулировку двух основных постулатов Бор дает и в написанной им статье «Атом» во втором томе «Британской Энциклопедии» («Encyclopedia Britannica», издание 1928 г.). Любопытно отметить, что в последних изданиях «Британской Энциклопедии» дается статья «Атом», в которой приводятся... 4 постулата Бора (1).

основано описание природы». Эта решительная ломка понятий была вскоре осуществлена. Она составила новый этап развития квантовой теории и получила очень глубокую интерпретацию в последующих работах и самого Бора, которые войдут во второй том избранных произведений.

М. А. Ельяшевич