

## **НИЛЬС БОР И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА** (к 125-летию со дня рождения)

**С.П.Кудрявцев, И.А.Осипова**

(Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия)

Седьмого октября 2010 г. исполняется 125 лет со дня рождения выдающегося физика XX столетия Нильса Бора. Влияние его работ на развитие физики атома и квантовой теории трудно переоценить. Между тем, в учебной литературе, в высказываниях некоторых физиков прослеживается мнение, что работы Бора устарели и имеют чисто исторический интерес, в них мало математики. В статье мы попытаемся оценить роль Бора в создании квантовой механики и проследить влияние работ и личности Бора на учёных, которые были основателями квантовой механики.

Нильс Бор родился 7 октября 1885 г. в семье известного физиолога, профессора Копенгагенского университета Христиана Бора. Свою любовь к научным исследованиям отец передал детям. Не случайно, что его младший сын Харальд стал известным математиком, а старший Нильс – автором квантовой модели атома, создателем нерелятивистской квантовой механики и капельной модели ядра. В 1903 г. Бор поступил в Копенгагенский университет. Ещё в студенческие годы он выполнил конкурсную работу по определению коэффициента поверхностного натяжения воды методом колебания струи, удостоенную в 1907 г. золотой медали Датского Королевского общества. Эта работа продемонстрировала талант Бора-теоретика и тонкого экспериментатора, правда это была единственная его завершённая экспериментальная работа. Как теоретик, он развил теорию Рэлея, на которой базировался эксперимент. Бор дополнил её учетом влияний окружающего воздуха, конечности амплитуд колебаний струн и вязкости жидкости [1]. Спустя два года эта первая работа Бора была опубликована в трудах Лондонского Королевского общества. В 1911 г. Бор защитил докторскую диссертацию на тему «Анализ электронной теории металлов», после чего приехал на стажировку в Кембридж к автору открытия электрона и одному из создателей электронной теории и одной из первых моделей атома Дж.Дж.Томсону. Бор очень высоко ценил Томсона и надеялся обсудить с ним проблемы теории электронов, магнетизма, излучения, однако взаимоотношения не сложились. Трудно понять, почему так произошло. Известно, что по инициативе Томсона в 1895 г. в Кембридже произошла реформа, согласно которой в университет стали допускаться выпускники университетов из других стран для занятий научными исследованиями и получения степени. Томсон был очень внимателен к этим студентам-исследователям, подбирал для них темы, всячески помогал. Готовившиеся к печати статьи, проблемы обсуждались и в стенах лаборатории, и в Кавендишском физическом обществе,

организованным Томсоном. Дружескому общению и взаимопониманию учителя и учеников содействовали вечерние встречи у Томсона за чаем. Но к Бору Томсон отнёсся прохладно. Возможно в какой-то степени сыграли споры Бора и Томсона о природе диамагнетизма. Но Томсон не нашел времени для прочтения диссертации Бора, и она не была опубликована. Лишь небольшая заметка из диссертации была издана в 1912 г. в *Phil. Mag.* (1912, v.23, p.984-988).

В Кавендишской лаборатории Бор по поручению Томсона начал экспериментальную работу с каналовыми лучами. Он собрал вакуумную систему, но эксперимент не пошёл. В том же году ученик Томсона Чарльз Томас Рис Вильсон (1869-1959) сконструировал замечательный прибор, сыгравший большую роль в изучении ядерных процессов – камеру Вильсона. Тогда же на ежегодном традиционном обеде в Кембридже выступил один из выдающихся учеников Томсона – Резерфорд, который высоко отозвался об изобретении Вильсона. На этом обеде Бор впервые услышал Резерфорда, руководившего в то время физической лабораторией в Манчестере. Резерфорд произвел на Бора огромное впечатление. Их личная встреча была организована приятелем отца, работавшим в университете Манчестера. «Во время беседы, в которой Резерфорд с подлинным энтузиазмом говорил о многих новых перспективах развития физики, - вспоминает Бор, - он любезно согласился на мою просьбу о том, чтобы присоединиться к группе, работающей в его лаборатории, после того как ранней весной 1912 г. я должен был закончить свои занятия в Кембридже; там я был сильно увлечен оригинальными идеями Дж.Дж.Томсона, касающимися электронного строения атомов» [2, с.309].

В апреле 1912 г. Бор приехал в Манчестер. История позаботилась о том, чтобы Бор вначале поработал с автором первой модели атома, а затем приехал к автору планетарной модели, и на её основе создал квантовую модель атома. «В это время вокруг Резерфорда группировалось большое число молодых физиков из разных стран мира, привлечённых его чрезвычайной одарённостью как физика и редкими способностями как организатора научного коллектива», - вспоминал Бор [2, с.302-303]. В это время здесь работали Х.Гейгер, Е.Марсден, К.Фаянс, Г.Г.Дж.Мозли, Г.Хевеши и Дж.Чедвик. В Манчестере Бор подготовил статью «Теория торможения заряженных частиц при их прохождении через вещество» [3, с.83]. Планетарная модель атома, плодотворное значение которой было осознано Бором во время его пребывания в Манчестере, была положена им в основу первой квантовой модели. В течение этого же года были опубликованы три знаменитые статьи Бора «О строении атомов и молекул», открывшие путь к атомной квантовой механике. Он объединил предшествующие результаты исследований, принял модель атома Резерфорда, предположил квантовый характер излучения и пришёл к выводу о том, что для стационарной орбиты электрона в атоме момент

импульса электрона квантуется  $mvr = \frac{n\hbar}{2\pi}$ , а при переходе из одного состояния в другое излучается энергия  $h\nu$ , равная разности энергий в стационарных состояниях  $E_1 - E_2 = h\nu$ , а частота излучения, соответствующая «... переходу между (n+1)-м и n-м состояниями, задается выражением  $\nu = Rc\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2}\right)$ » [3, с.162]. Само понятие стационарного

состояния совершило смятие в умах физиков. Для классической физики существование стационарных состояний было невозможно. Кроме того, революционный характер имело положение Бора, что частота излучения света равнялась половине угловой частоты вращения электрона [5, с.222].

Бор нашёл выражение для постоянной Ридберга  $R = \frac{2\pi^2 e^4 m}{ch^3}$  и подсчитал её значение, которое оказалось равным  $109675 \text{ см}^{-1}$ .

Бор применил квантовую теорию к периодической системе элементов Менделеева. Он пришел к выводу о том, что место элемента в системе определяется не атомным весом, а зарядом ядра. Этим Бор объяснил необходимость поменять местами некоторые элементы, например, калий и аргон, а открытый Урбаном элемент с номером 72, помещённый к редким землям, с точки зрения заполнения электронных оболочек, согласно значениям главного квантового числа, должен быть гомологом циркония. Костер и Хевеши проверили и подтвердили это предположение, открыв гафний, оказавшийся действительно гомологом титана и циркония. Квантовая теория была применена Бором и к объяснению возникновения рентгеновских лучей. Ещё один успех теории Бора связан с истолкованием серии Пикеринга. Бор утверждал, что серия принадлежит спектру ионизированного гелия, а не водорода, как у Пикеринга. Учитывая массу электрона и ядер водорода и гелия, он пришел к соотношению

$$K = \lambda \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = \frac{ch^3(M+m)}{2\pi^2 E^2 e^2 Mm}, \text{ из которого получил } K_H = 91153 \cdot 10^{-10},$$

$$K_{He} = 22779 \cdot 10^{-10}, \text{ а их отношение } \frac{K_H}{K_{He}} = 4,0016 \text{ находится в точном}$$

соответствии с экспериментальными данными. Теория Бора объяснила ряд явлений флюоресценции, расщепление спектральных линий в электрическом поле (эффект Штарка), нормальный эффект Зеемана и т.д.

Впоследствии, когда квантовая теория получила развитие и всеобщее признание, в 1937 г., Резерфорд писал «Я считаю первоначальную квантовую теорию спектра, выдвинутую Бором, одной из наиболее революционных из всех когда-либо созданных в науке... В результате дальнейших усовершенствований, главным образом внесённых самим Бором, и видоизменений, произведенных Гейзенбергом, Шредингером и Дираком, изменилась вся математическая теория и были введены идеи

волновой механики. Совершенно независимо от этих дальнейших усовершенствований я рассматриваю труды Бора как величайший триумф человеческой мысли» [5, с.490-491].

Осенью 1916 г. Бор стал профессором Копенгагенского университета. Продолжая развивать свою теорию, Бор в 1918 г. формулирует свой знаменитый принцип соответствия, который в широком смысле утверждал, что квантовая механика должна приводить к тем же результатам, которые следуют из классической теории, когда она в предельном случае относится к большим телам или макротраекториям. Макс Борн говорил, что этот принцип на десятилетие определил развитие теоретической физики. «... Зоммерфельд назвал принцип соответствия «волшебной палочкой», при помощи которой может быть открыт ряд атомных явлений и их законов» [6, с.381].

В 1921 г. на Блегдамсвей был открыт Институт теоретической физики, которым Бор руководил до конца своей жизни. Личность Бора привлекала сюда теоретиков со всех стран мира: Крамерс, Хевеши, Борн, Паули, Гейзенберг и др. В 1922 г. Бору была присуждена Нобелевская премия по физике. Весной 1923 г. в институт Бора приезжает Гейзенберг. Началось их тесное плодотворное сотрудничество. Квантовая теория Бора постепенно получает признание и развитие. В 1925 г. Гейзенберг в сотрудничестве с Борном и Иорданом разрабатывают математический аппарат квантовой механики, Паули формулирует свой принцип запрета, Улунбек и Гаудсмит открывают спин электрона. В 1926 г. Шрёдингер, опираясь на идеи де Бройля, создает волновую механику. В 1927 г. Гейзенберг выдвигает принцип неопределенности. В этом же году Бор выдвигает свой принцип дополненности. Согласно этому принципу, понимание природы материи требует учёта как волновых, так и квантовых свойств частиц материи. Гейзенберг считал, что соотношение неопределенностей «представляет собой лишь частный случай общего принципа дополненности» [1, с.18].

Интерпретация квантовой механики в духе Бора и его школы, копенгагенской школы, вызвала яростную критику Эйнштейна, который считал, что в квантовой механике далеко отошли от причинного описания в пространстве и времени. «Квантовая теория, - писал Бор, - характеризуется признанием принципиальной ограниченности классических физических представлений в применении к атомным явлениям. Но, несмотря на затруднения, возникающие при формулировке содержания квантовой теории, её суть... может быть выражена... в так называемом квантовой постулате. Согласно этому постулату, каждому атомному процессу свойственна существенная прерывность или, скорее, индивидуальность, совершенно чуждая классической теории и выраженная планковским квантом действия. Этот постулат включает в себя отказ от причинного пространственно-временного описания атомных процессов» [8].

Несмотря на разногласие среди ученых, трактование квантовой механики Бора и его школы стало общепризнанным, принцип неопределенности, дополнительности и соответствия, законы квантовой механики являются фундаментальными законами природы, а имя Бора навсегда останется в истории естествознания как основателя квантовой механики.

#### Литература

1. Нильс Бор. Жизнь и творчество: сб. ст. – М.: Наука, 1967.
2. Кудрявцев, П.С. Избранное / П.С.Кудрявцев, С.П.Кудрявцев. – Тамбов, 2004. – С.309.
3. Бор, Нильс. Избранные научные труды. Т.1: статьи 1909-1925. – М.: Наука, 1970. – С.8-18.
4. Полак, Л.С. Возникновение квантовой теории атома. (Модель атома Резерфорда-Бора) // Тр. Ин-та истории естествознания и техники. Т.19. – М.: Изд-во АН СССР, 1957.
5. Резерфорд, Эрнест. Избранные научные труды. – М.: Наука, 1972.
6. Шрёдингер, Эрвин. Избранные научные труды по квантовой механике. – М.: Наука, 1976.
7. Кудрявцев, С.П. История и методология естествознания. Ч.1. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2006.
8. Бор, Нильс. Избранные научные труды. Т.1: статьи 1909-1925. – М.: Наука, 1970. – С.30.