

УДК 535.338

**К 100-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ ТЕОРИИ Н. БОРА****А.С. Яценко***Институт автоматизации и электрометрии СО РАН  
Новосибирск, Россия*

В статье представлены основные этапы развития учений о строении атома от древних философов до трех Нобелевских лауреатов прошлого века. Рассмотрены основы построения новых сверхтяжелых элементов.

*Ключевые слова:* Периодическая таблица элементов, атом, теоретические расчеты.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-1-7-13

Атом – это целая система, микрокосмос,  
в котором десятки электронов вращаются  
вокруг центрального ядра.

*А.Ф. Иоффе*

Физическая теория напоминает музыку,  
как ее определил Лейбниц.

*А. Эйнштейн*

Впервые понятие атома ввели более 2000 лет тому назад мыслители прошлого греки Лейкипп и Демокрит, римлянин Лукреций и индеец Канада [1]. Они полагали, что атом – «мельчайший кирпичик» мироздания и он неделим. Такое утверждение просуществовало довольно долго – 2500 лет. Открытие новых элементов навело мыслителей прошлого на их систематику. Главное – воспринимаемый мир. Они считали, что все вещества состоят из четырех вечно существующих элементов – земля, вода, огонь и воздух. Начиная с XVII века поиск новых элементов усилился благодаря работам Марце (1786), Дальтона (1801), Прюта (1815) и других. Наконец в 1860 году в Карлеуре (Германия) состоялся I Международный конгресс химиков, решения которого ознаменовали торжество атомно-молекулярного строения элементов. Но никто из специалистов ничего не мог сказать о строении самого атома. Были только догадки.

На основе данных о 62 элементах к тому времени начались попытки их классификации. Была принята табличная форма представления данных. Все авторы того времени исходили в своих исследованиях из случайных признаков, а не из совокупности физико-химических свойств элементов. Полную таблицу 66 элементов представил в 1871 году Д. Менделеев [2, 3]. Автор так характеризовал свою работу: «До периодического закона простые тела представляли лишь отрывочные, случайные явления природы: не было поводов ждать каких-либо новых, а вновь находимые в своих свойствах были полной неожиданной новинкой.

---

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, № гос. регистрации 12.10.31.70.00.30.-4.

Яценко А.С. К юбилею Периодической таблицы Д. Менделеева. Сибирский физический журнал 2020 № 15, № 2.

Пять книг по оптическим спектрам атомов и ионов.

Периодическая законность первая дала возможность видеть не открытые еще элементы».

Понятие атома для многих людей становилось источником различных догадок. Например, в 1901 году француз Ж. Перрен впервые выдвинул гипотезу о планетарном строении атома.

Активно изучать атом начал английский ученый Дж. Томсон (1856–1940).

В 1897 году при исследовании катодных лучей он открыл электрон – частицу с отрицательным зарядом [4, 5]. А в 1903 году предложил свою модель атома – положительно заряженную сферу с вкрапленными в нее электронами.

В 1910 году Э. Резерфорд (1871–1937) уточнил модель атома Томсона. Используя  $\alpha$ -лучи – положительно заряженные частицы при облучении металлической тонкой фольги, исследователи обнаружили, что некоторые частицы отскакивали как при упругом ударе [6, 7]. Резерфорд объяснил это тем, что положительный заряд атома сосредоточен в центре атома. «Это был совершенно невероятный случай в моей жизни», – вспоминал он. Через год (1911) Резерфорд открыл атомное ядро и представил планетарную модель атома. Согласно классической механике электрон должен двигаться по постоянной орбите вокруг ядра без потери энергии на излучение. Однако планетарная модель не выполняется по следующим причинам:

- наличие других орбит, так как вычисление электронных орбит с большим числом электронов задача сложная, траектории орбит будут приближены;
- движение электронов устойчиво в механическом отношении, а в электродинамике неустойчиво;
- неприменимость законов механики и электродинамики к движению электронов.

Открытые в 1860 году оптические спектры не определялись моделями Томсона и Резерфорда. Объяснение спектральных законов не удавалось также установить числом электронов в атоме.

В 1913 году модель Резерфорда начал совершенствовать Н. Бор (1885–1962). Он отнесся к его модели более «серьезно», чем другие ученые. Бору было ясно, что модель атома можно использовать не только для объяснения некоторых экспериментов, но и для создания теории о свойствах атома. «Выяснение природы, установленной Д. Менделеевым периодичности изменения свойств, обнаруживаемой в ряду элементов, расположенных в порядке увеличения атомного номера, требует рассмотрения особенностей в последовательном заполнении электронной оболочки атомов», – писал он [9].

В своей Нобелевской речи 11 декабря 1922 года в Стокгольме Бор предпочел обсуждать периодическую таблицу в виде лестницы датского химика Ю. Томсена (1826–1909) (рис. 1). «Если в системе элементы расположены в порядке увеличения атомного веса, оставив некоторые незанятые, то химические и физические родственные элементы появляются через определенные промежутки (периоды). Незанятые клетки – неоткрытые элементы. Если их сравнить с положением уже известных, то можно предсказать свойства еще неоткрытых элементов. Предсказания могут служить для нахождения еще неоткрытых элементов, так как родственные элементы имеют тенденции следовать друг за другом», – описал схему лестницы датский физик К. Меллер Построенной Бором **теории** предложено принципиально новое решение для объяснения линейчатых спектров атомов и их закономерности, которые исследователи установили экспериментально [8–11]. Решить эту задачу можно было с помощью теории квантов, начало которой было положено М. Планком (1900), для объяснения термодинамических свойств абсолютно черного тела. Излучаться может только определенная порция – квант энер-

гии излучения. Бор сохранил все основные черты в модели Резерфорда. Атом Резерфорда и квант действия Планка – основные моменты теории атома Бора. Атом – типичный объект квантовой механики. Электрон, как материальная точка, вращающаяся вокруг массивного ядра, характеризуется его энергией, механическим моментом, проекцией момента и проекцией спина на какую-нибудь ось. Все четыре величины в сложном атоме не являются точными постоянными движения для отдельного электрона. Однако метод самосогласованного поля позволяет разделить движение отдельных электронов, чтобы характеризовать состояние каждого. При движении по стационарной орбите, согласно законам электродинамики, электрон не может излучать. Излучение непрерывно убывает, электрон будет приближаться к ядру, его частота обращения будет увеличиваться. При этом момент количества движения на орбите равен целому кратному из постоянной Планка, деленной на  $2\pi$ .  $p = nh/2\pi$ , где  $h$  – постоянная Планка. Это квантовое условие для орбитального момента. И здесь Н. Бор ввел понятие об орбитах, в которых электрон не излучает. Метод отбора таких стационарных орбит – метод квантования, который является целевым обобщением идеи Планка (обмен энергиями между телами и полем излучения выражается с помощью постоянной Планка  $mvr = n$ ).

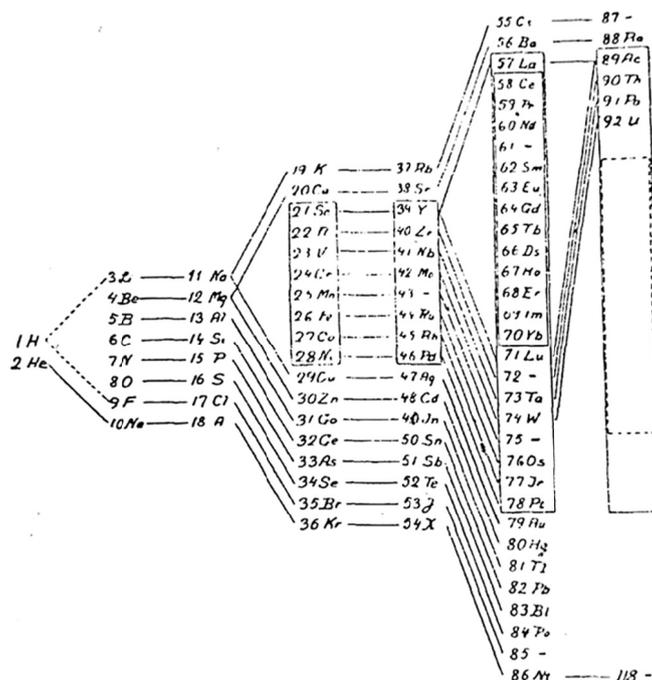


Рис. 1 – Естественная система элементов

Fig. 1 – Natural system of elements

Вот как представил **первый постулат о стационарных орбитах** автор [8]: «Среди мыслимых состояний движения атомной системы имеется ряд так называемых стационарных состояний, относительно которых предполагается, что движение частиц в этих состояниях, подчиняясь в значительном объеме классическим механическим законам, отличается, однако, своеобразной механически необъяснимой устойчивостью, в результате которой следует, что всякое остаточ-

ное изменение движения системы должно состоять в полном переходе из одного стационарного состояния в другое». Этот постулат относится к общей устойчивости атома, выражающейся в химических и физических свойствах элемента. Электроны могут находиться только на «разрешенных» орбитах, для которых выполняется условие  $mvr = n\hbar$ , где  $m$  – масса электрона;  $v$  – линейная скорость электрона на орбите радиусом  $r$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots$  – целое положительное число. Из законов классической механики следует что энергия электрона и радиусы «разрешенных» орбит могут принимать только дискретные значения. Числа  $n$  выглядели как номера орбит. Величина  $n = 1$  соответствует основному состоянию атома, а  $n = 2, 3, \dots$  – возбужденные состояния.

Бор утверждает далее, что излучение происходит в том случае, когда электрон «перескакивает» с одной стационарной орбиты на другую с меньшей энергией. При этом электрон излучает квант электромагнитного излучения – фотон, энергия которого равна разности энергий электрона на начальной и конечной орбите, деленной на  $h$ .

Вот как представил свой второй постулат Н. Бор [8]: «В самих стационарных состояниях, в противоречии с классической электромагнитной теорией, излучение не происходит, однако процесс перехода между двумя стационарными состояниями может сопровождаться электромагнитным излучением, обладающих теми же свойствами, как излучение, посылаемое на основании классической теории электрической частицей, совершающей гармонические колебания с постоянной частотой. Эта частота  $\nu$  не находится, однако, в простом отношении к движению частиц атома и определяется условием  $E_1 - E_2 = \nu h$ ,  $E_1 > E_2$ , где  $E_1, E_2$  – значение атомной энергии в двух стационарных состояниях». Равенство исходит из закона сохранения энергии (**второй постулат Бора, условие частот**). Этот постулат соответствует существованию спектров, состоящих из резких линий.

Почему именно такие орбиты? Ответить на это может современная квантовая механика. Бор же этого сделать не мог и поэтому назвал свое предположение постулатом. Как он догадался, что постоянную Планка надо делить на  $2\pi$ , чтобы получить значение момента импульса на орбите? По его словам, путем чистой подгонки к формуле Бальмера  $\nu = R(1/m^2 - 1/n^2)$ , где  $R$  – постоянная Ридберга;  $n, m$  – целые положительные числа. С другим коэффициентом ничего не получалось.

Работа Бора была настолько из ряда вон выходящей, что сразу же взбудоражила все научное сообщество. В адрес молодого ученого и его «странной теории» было высказано немало скептических и даже враждебных слов. «Незрелая помесь идей Планка со старой механикой» – так о ней отзывались приверженцы классической физики. Ее не приняли многие известные ученые – Дж. Томсон, Дж. Рэлей, П. Зеeman, М. Борн и другие. Однако со временем они согласились с его доводами. Резерфорд вспоминал: «Мне чрезвычайно импонировало то, с какой настойчивостью он защищал каждое слово, выражение, цитату». Венгерский химик Д. Хевеши в письме к Бору писал: «Когда я спросил А. Эйнштейна, что он думает о вашей теории, он ответил, что это очень интересная и важная теория». А академик В. Гинзбург вспоминал: «Полвека назад великий физик зажег маяк, который долгие годы освещал дорогу физикам всего мира». Английский физик Дж. Джинс утверждал: – «Доктор Бор пришел к чрезвычайно остроумному, оригинальному и убедительному толкованию законов спектральных линий... Сегодня единствен-

ным важным подтверждением правильности этих предположений является тот факт, что они действуют на практике». Нидерландский физик Г. Лоренц в письме к Бору писал: «Первое полное впечатление о Ваших теориях у меня сложилось после нашей беседы в саду у сэра Лоджа».

Теория атома Бора явилась большим достижением в развитии и обосновании атомной спектроскопии. Она стала основой большого числа работ, установивших ряд важных экспериментальных фактов. К недостаткам теории следует отнести ее логическую противоречивость. Глубокий анализ теории Бора показывает некую непоследовательность. Ведь с использованием законов классической механики в теории принимаются противоречивые постулаты классике. Атом – типичный объект квантовой механики. Энергия электрона в атоме – один из возможных уровней. Бор так характеризовал роль своей теории [8]: «Развитие атомной теории привело к классификации обширных областей наблюдения и указало путь пополнения этой классификации предсказанием новых фактов». С помощью своей теории в 1913 году Бор создал первую квантовую теорию атома водорода, объяснил спектр иона гелия и вычислил постоянную Ридберга. Построил в 1913–1921 годах модели атомов других элементов. В 1921–1922 годах Бор объяснил особенности периодической таблицы всех элементов. Классификация уровней энергии и переходов в атомных системах упростило процедуру сбора спектральных данных.

Своей теорией Бор как бы обобщил представления других исследователей. Например, Брэком определен число электронов в атоме методом Томсона. В 1910 году А. Гаас предложил идею атома, в которой попытался связать характер излучения со структурой атома. В 1912 году Дж. Франк и Г. Герц доказали существование в атоме дискретных уровней энергии, подтвердив теорию Бора. В 1912 году А. Зоммерфельд использовал теорию Бора на многократно периодические системы.

В последнее 60 лет появились первые сведения о ядрах новых элементов с  $Z = 104–118$  [12]. В периодической таблице они пока не нашли законного места (рис. 2, лицевая обложка журнала [12]). Все данные пока теоретические.

72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

Рис. 2 – Место сверхтяжелых элементов в периодической таблице

Fig. 2 – Place of superheavy elements in the periodic table

Например, в печати подробно обсуждается вопрос о 118 элементе, является ли он благородным газом. Но все это подтвердить могут только экспериментальные данные.

Вполне возможно их место – в третьей строке таблицы после лантанидов и трансурановых. Однако Ю. Оганесян говорит о возможности существования 287 новых таких элементов. И где их располагать в таблице?

Н. Бор отмечал также, что пока «теория в значительной мере находится еще в начальной стадии и существуют еще многие основные вопросы, ожидающие ответа».

**Данная работа предназначена как методическое пособие широкому кругу читателей – студентов, аспирантов и научных инженеров, занимающихся вопросами атомной спектроскопии, физики плазмы и астрофизики.**

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Диоген Лаэртский.** О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов. – М.: Мысль, 1979. – 620 с.
2. **Кедров Б.М.** Прогнозы Менделеева в атомистике. В 3 т. – М.: Атомиздат, 1977–1979. – 3 т.
3. **Менделеев Д.И.** Сочинения. В 25 т. – М.: Химтеориздат, 1934–1954.
4. **Тимирязев А.К.** Жизнь и труды Дж. Томсона // *Успехи химии.* – 1941. – Т. 10, № 1. – С. 101–110.
5. **Капцов Н.А.** Джозеф Томсон // *Советская наука.* – 1940. – № 10. – С. 88–108.
6. **Резерфорд Э.** Избранные научные труды: в 2 кн. – М.: Наука, 1971–1972. – 2 кн.
7. **Капица П.Л.** Воспоминания о профессоре Эрнесте Резерфорде // *Успехи физических наук.* – 1938. – Т. 19, № 1. – С. 1–17.
8. **Бор Н.** О строении атомов // *Успехи физических наук.* – 1923. – № 4. – С. 417–448.
9. **Бор Н.** Три статьи о спектрах и строении атомов. – М.: Мосполиграф, 1923. – 156 с.
10. **Мигдал А.Б.** Квантовая физика и Нильс Бор. – М.: Знание, 1987. – 64 с.
11. **Кляус Е.М., Франкфурт У.И., Френк А.М.** Нильс Бор, 1885–1962. – М.: Наука, 1977. – 384 с.
12. **Oganessian Y.** Super heavy elements: on the 150th anniversary of the discovery of the periodic table of elements // *Nuclear Physics News.* – 2019. – Vol. 29. – P. 5–10.

## TO THE 100TH ANNIVERSARY OF THE THEORY OF N. BOHR

Yatsenko A.S.

*Institute of Automation and Electrometry, SB RAS, Novosibirsk, Russia*

The article presents the main stages of the development of the teachings on the structure of the atom from ancient philosophers to three Nobel laureates of the last century. The basics of constructing new superheavy elements are considered.

*Keywords:* Periodic table of elements, atom, theoretical calculations.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-1-7-13

## REFERENCES

1. Diogenes Laertes. *O zhizni, ucheniyakh i izrecheniyakh znamenitykh filosofov* [About the life, teachings and sayings of famous philosophers]. Moscow, Mysl' Publ., 1979. 620 p. (In Russian).
2. Kedrov B.M. *Prognozy Mendeleeva v atomistike.* V 3 t. [Mendeleev's forecasts in atomistics. In 3 vols]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977–1979.
3. Mendeleev D.I. Op. in 25 volumes. Moscow: Himteorizdat, 1934.
4. Timiryazev A.K. Zhizn' i trudy Dzh. Tomsona [Life and works of J. Thomson]. *Uspekhi khimii = Russian Chemical Reviews*, 1941, vol. 10, no. 1, pp. 101–110. (In Russian).
5. Kaptsov N.A. Dzhozef Tomson [Joseph Thomson]. *Sovetskaya Nauka*, 1940, no. 10, pp. 88–108.
6. Rutherford E. *Izbrannye nauchnye trudy.* V 2 kn. [Selected scientific works. In 2 bk.]. Moscow, Nauka Publ., 1971–1972.
7. Kapitsa P.L. Vospominaniya o professore Erneste Rezerforde [Memories of Professor Ernest Rutherford]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*, 1938, vol. 19, no. 1, pp. 1–17. (In Russian).
8. Bohr N. O stroenii atomov [On the structure of atoms]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*, 1923, no. 4, pp. 417–448. (In Russian).
9. Bohr N. *Tri stat'i o spektrakh i stroenii atomov* [Three articles on the spectra and structure of atoms]. Moscow, Mospoligraf Publ., 1923. 156 p. (In Russian).
10. Migdal A.B. *Kvantovaya fizika i Nil's Bor* [Quantum Physics and Niels Bohr]. Moscow, Znanie Publ., 1987. 64 p.

11. Klyaus E.M., Frankfurt W.I., Frenk A.M. *Ni's Bor, 1885–1962* [Niels Bohr]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 384 p.
12. Oganessian Y. Super heavy elements: on the 150th anniversary of the discovery of the periodic table of elements. *Nuclear Physics News*, 2019, vol. 29, pp. 5–10.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



**Яценко Алексей Степанович** – родился в 1941 году, канд. техн. наук, ведущий инженер, Институт автоматизации и электротехники СО РАН. Область научных интересов: спектроскопия атомов и ионов. Опубликовано около 40 работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Коптюга, д. 1. E-mail: yignatenko\_yulia@mail.ru).

**Yatsenko Aleksey Stepanovich.** (b. 1941) – Candidate of Sciences (Eng.), leading engineer, Institute of Automation and Electrometry SB RAS. (Address: 1, Koptuyuga Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: yignatenko\_yulia@mail.ru).

*Статья поступила 18 ноября 2021 г.  
Received November 18, 2021*

---

**To Reference:**

Yatsenko A.S. K 100-letnemu yubileyu teorii N. Bora [To the 100th anniversary of the theory of N. Bohr]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 1 (54), pp. 7–13. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-1-7-13.