

М.И. Баранов

## АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 3: ОТКРЫТИЕ И ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ АТОМА ВЕЩЕСТВА

*Наведено короткий нарис з усесвітньої історії вивчення і відкриття будови атомів матерії, що має фундаментальне значення для людства при пізнанні природи, розвитку науки і техніки.*

*Приведен краткий очерк из всемирной истории изучения и открытия строения атомов материи, имеющего фундаментальное значение для человечества при познании природы, развитии науки и техники.*

### ВВЕДЕНИЕ

Человечество в своей долгой истории многими столетиями шло к научному пониманию устройства окружающей природы и основ мироздания. Развив технику и накопив знания об устройстве макрообъектов, люди стали активно интересоваться устройством микрообъектов, образующих эти макрообъекты. Так шаг за шагом земляне проникали в скрытые от невооруженного человеческого взора завораживающие особенности строения материи и постепенно одну за другой открывали подлинные тайны нашей природы. Первооткрыватель периодического закона химических элементов, выдающийся русский ученый-химик Дмитрий Иванович Менделеев (1834-1907 гг.) [1] резко ощущал научную неудовлетворенность от того, что в то далекое от нас время (второй половины 19-го и начала 20-го столетий) он не мог ответить ни себе ни другим людям на вопрос о глубинных причинах открытой им в 1869 году периодичности изменения свойств элементов или видов (сортов) атомов [1, 2]. По этому поводу он тогда говорил следующее [3]: *"Не зная ничего о природе элементов, мы не понимаем причины периодического закона. Лишь накапливая испытанные законы, то есть служа добыче истины, мы можем надеяться мало-помалу поднять завесу, скрывающую от нас причины тайны природы"*. Д.И. Менделеев как истинный ученый не сомневался, что в скором времени эти причины будут раскрыты мировой физической и химической наукой. Для их раскрытия ученым было необходимо, прежде всего, понять и изучить устройство многообразных микроскопических "кирпичиков" мироздания – атомов вещества.

### 1. ВКЛАД РУССКИХ УЧЕНЫХ В ТЕОРИЮ СТРОЕНИЯ АТОМОВ

Здесь следует отметить то, что еще в самом начале 19-го столетия (задолго до открытия периодического закона химических элементов) русский ученый, профессор Московского университета имени М.В. Ломоносова Михаил Григорьевич Павлов высказывал достаточно определенные мысли о возбуждении электрических сил в процессе химических превращений веществ и об участии *электрических зарядов* в построении атомов известных науке элементов [1, 3]. По этому поводу он в 1819 году написал [3]: *"Элементы имеют планетарное строение"*. Относительно строения простейшего из атомов – атома водорода *H* он, опережая тогдашнюю науку почти на столетие, утверждал следующее [3]: *"Первый элемент построен из "плюс" и "минус" электрического заря-*

*да"*. Как гениально этот русский ученый-химик предвосхитил созданные лишь в первые десятилетия 20-го столетия научные представления о строении этого самого простейшего атома вещества! К этому следует добавить то, что в начале 90-х годов 19-го столетия в журнале Русского физико-химического общества (РФХО) была опубликована серия статей другого русского ученого Б. Чичерина о строении атомов в связи с открытой не так давно в России периодической системой химических элементов Д.И. Менделеева. В них он писал [3]: *"Атом не есть простое, однородное тело, как обыкновенно предполагают, держась древних метафизических представлений. Он образует сложное соединение, которое имеет центр и окружность. Находящаяся на его окружности масса не сливается с центральным ядром, а отстаёт от него на некотором расстоянии"*. По представлению этого русского ученого-физика получалось, что атом представляет собой подобие микроскопической солнечной системы с центральным ядром и сгруппировавшимися вокруг него телами "окружности". Центральное ядро атома несет *положительный электрический заряд*, который компенсируется *отрицательным электрическим зарядом* тел указанной "окружности" [2, 3]. По мнению русского физика Б. Чичерина, строение данной "окружности" атома и число ее отрицательно заряженных тел, а также число и размеры круговых орбит этих тел, вращающихся вокруг центрального ядра атома, зависит от положения химического элемента в периодической системе Д.И. Менделеева [3]. Причем, по его утверждению, чем дальше расположен химический элемент в периодической таблице элементов Д.И. Менделеева, тем больше у него должно быть орбит на упомянутой "окружности" атома. В своих статьях в журнале РФХО он считал, что соединение атомов в молекулы происходит путем взаимодействия внешних отрицательно заряженных частей этих атомов [3]. Какое поразительное интуитивное видение и предсказание по строению и соединению атомов вещества! Необходимо подчеркнуть то, что в указанных работах Б. Чичерина периодический закон Д.И. Менделеева [1, 2] стал впервые выступать в качестве незаменимого химико-физического инструментария для раскрытия тайн построения атомов земной материи.

Большим вкладом в физическую науку об атомах стали экспериментальные исследования выдающегося русского ученого-физика Александра Григорьевича Столетова (1839-1896 гг.) по взаимодействию света с веществом [2, 3]. Эти актиноэлектрические опыты А.Г. Столетова (таким термином их называл сам ав-

тор, а по существу это были исследования фотоэлектрического эффекта, открытого в 1887 году выдающимся немецким физиком Генрихом Герцем (1857-1894 гг.) [2, 4]), выполненные им в период 1888-1889 годов, показали, что при облучении светом от "вольтовой" дуги (в том числе и ультрафиолетовыми лучами) любое электронейтральное тело приобретает **положительный электрический заряд**. Если же облучению указанными световыми лучами с определенной длиной их волны подвергнуть электрически отрицательно заряженное тело, то оно может потерять свой избыточный **отрицательный электрический заряд**. В первом случае из опытов А.Г. Столетова следовало, что световые лучи удаляли из физического тела отрицательное электричество. Вследствие чего оно становилось электрически положительно заряженным. Во втором случае под действием света электрически заряженное тело теряло приданное ему опять-таки отрицательное электричество. Откуда же берется у электронейтрального тела отрицательное электричество? Не входит ли оно в состав его (этого тела) материала и соответственно атомов? Вот к таким любопытным вопросам и мыслям приводили самого А.Г. Столетова результаты его данных экспериментальных исследований со светом. Ясно увидев природу этого физического явления, он однако до открытия носителей элементарного отрицательного электричества – электронов еще не мог раскрыть его подлинную сущность. Хотя он тогда писал [2]: "*Лучи вольтовой дуги, падая на поверхность отрицательно заряженного тела, уносят с него заряд*". Это позже выяснилась физическая сущность исследуемого им нового явления – происходило вырывание электронов световыми квантами (порциями) энергии из структуры тела.

Следует указать, что к аналогичным научным мыслям и физическим выводам приводили А.Г. Столетова и результаты его иных исследований, связанных, в частности, с поведением электрически нейтральных металлов при их интенсивном нагревании. Из-за значительного нагрева (резкого повышения температуры) их металлической структуры они приобретали избыточный **положительный электрический заряд**. Данный электрический заряд мог возникать вследствие потери нагреваемым металлом части входящих в его состав носителей отрицательного электричества (как выяснилось чуть позже – свободных отрицательно заряженных электронов, открытых в 1897 году выдающимся английским физиком Джозефом Томсоном (1856-1940 гг.) при экспериментальном исследовании прохождения электричества в электрогазоразрядной трубке [2, 4]). Но все вещества состоят из микроскопических атомов. Значит, при определенных внешних воздействиях на вещество (например, при его облучении светом или нагреве) именно атомы вещества теряют свое отрицательное электричество. Поэтому эти опытные физические данные приводили ученых к заключению, что атомы представляют собой сложные микрочастицы (корпускулы) вещества, состоящие, по крайней мере, из двух микрочастей, несущих отдельно отрицательное и положительное электричество. Причем, микроносители **отрицательного электричества** должны находиться в наружных частях атомов, а микроносители **поло-**

**жительного электричества** – в их внутренних центральных частях [1, 3]. Экспериментальные результаты русского ученого-физика А.Г. Столетова подтверждали теоретические выводы другого русского ученого-химика Д.И. Менделеева о сложности строения и делимости атомов химических элементов. Установление учеными-физиками электрических свойств атомов вещества существенно облегчило дальнейшую разработку моделей их строения. Эти научные данные способствовали углублению наших знаний о строении атомов вещества и возникновению в научном мире новых воззрений на природу материи.

## 2. ВКЛАД АЗИАТСКИХ И ЕВРОПЕЙСКИХ УЧЕНЫХ В ТЕОРИЮ СТРОЕНИЯ АТОМОВ

**Первые математические модели атомов.** Большинство первых расчетных моделей атомов вещества базировались на представлениях классической электродинамики и механики. Открытие Д. Томсоном электронов (за их открытие ему была присуждена Нобелевская премия по физике за 1906 год) указывало на то, что электроны являются составными частями атомов всех веществ. Из опытов Д. Томсона следовало, что постоянный электрический ток в электрогазоразрядной трубке у ее анода представлял собой поток электронов, образовавшихся в результате ионизации атомов присутствующего в трубке газа. Экспериментальные данные Д. Томсона свидетельствовали о том, что при отрицательном электрическом заряде  $e_0$  электрона, равном по модулю положительному заряду ядра атома водорода  $H$ , масса электрона  $m_e$  оказывается примерно в тысячу раз меньше массы атома водорода  $H$  (согласно современным данным в 1836 раз [4, 5]). Данный результат был ошеломляющим. Из-за такой новизны его первое научное сообщение по исследованию прохождения катодных лучей через газы и открытию мельчайших частиц вещества – электронов в Лондонском Королевском обществе (Английской Академии наук) было встречено с определенной долей недоверия [2]. Тем не менее, в 1904 году японским физиком Хантаро Нагаока (1865-1950 гг.) была предложена **планетарная модель** строения атома, которая была по существу аналогична указанным выше моделям русских ученых: в центре атома находится положительно заряженное ядро, а вокруг него по установленным кольцевым орбитам движутся отрицательно заряженные микроскопические "планеты" – электроны (сам Д. Томсон первоначально называл их просто корпускулами) [2]. При радиальных смещениях этих электронов атомов возбуждаются электромагнитные волны, частотный спектр которых, по расчетным оценкам Х. Нагаока, имел тот же порядок, что и частоты спектральных линий некоторых химических элементов. В сферической **электромагнитной модели** строения атома, предложенной упомянутым выше английским физиком Д. Томсоном, его положительное и отрицательное электричество было распределено по атомной сфере [2]. Так, согласно этой модели в простейшем атоме вещества – атоме водорода  $H$  его единственный электрон должен был находиться в центре положительно заряженной сферы. Действующая на этот внутренний электрон квазиупругая сила электростатического притяжения к внешней по-

ложительно заряженной сфере атома вызывает колебания электрона. Частота этих колебаний электрона, определяемая радиусом сферы атома, электрическим зарядом и массой электрона, по расчетным оценкам Д. Томсона совпадала с частотой колебаний света в спектральных линиях атома водорода *H*. Для многоэлектронных атомов их электроны разбивались на группы, располагавшиеся по устойчивым конфигурациям, рассчитанным Д. Томсоном. Отметим, что предложенная Д. Томсоном модель строения атома оказалась несовместимой с данными экспериментальных наблюдений в атомной и ядерной физике [2, 5].

**Планетарно-ядерная модель атома Резерфорда.** Предтечей создания данной модели атома явился ряд исследований выдающегося английского физика Эрнеста Резерфорда (1871-1937 гг.) и его учеников в области радиоактивных превращений и внутриатомных процессов. Э. Резерфорд (рис. 1) в 1903 году с молодым английским ученым Фредериком Содди (1877-1956 гг.), ставшим лауреатом Нобелевской премии по химии за 1921 год, пришли к выводу о том, что из "эманации" радия *Ra* (продукта его радиоактивного распада [6]) получается инертный газ гелий *He* [2]. Кроме того, они сформулировали закон радиоактивного распада элементов и показали, что радиоактивность известных элементов уменьшается во времени по закону убывающей экспоненты [2, 5].



Рис. 1. Эрнест Резерфорд (1871-1937 гг.)

За эти научные достижения Э. Резерфорду была присуждена Нобелевская премия по химии за 1908 год. В 1909 году Э. Резерфорд и его помощник в радиоактивных исследованиях Ройдс, работая в Манчестерском университете, неопровержимо доказали то, что  $\alpha$ -частица, испускаемая радием *Ra*, является дважды ионизированным атомом гелия *He* (с современных научных позиций она представляет собой его ядро и имеет в ядерной физике обозначение  ${}^2_4\text{He}$ ) [2]. Изучая в Манчестерской физической лаборатории совместно с известным немецким физиком Хансом Гейгером (1882-1945 гг.), ставшим создателем первого счетчика элементарных частиц – счетчика Гейгера, прохождение  $\alpha$ -частиц через тонкие металлические пластинки (фольги), они установили поразительный факт – существование их больших углов рассеяния при взаимодействии с этими пластинками [2]. Э. Резерфорд, используя электромагнитную модель атома Томсона, подсчитал, что она не может давать больших углов рассеяния  $\alpha$ -частиц, бомбардирующих исследуемые пластинки. На основании этого и получен-

ных им результатов он для истолкования внутриатомных процессов обращается к **планетарной модели атома** вещества. В марте 1911 года в своем докладе в Манчестерском философском обществе он говорил следующее [2]: "*Рассеяние заряженных частиц может быть объяснено, если предложить такой атом, который состоит из центрального электрического заряда, сосредоточенного в точке и окруженного однородным сферическим распределением противоположного электричества равной величины. При таком устройстве атома  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы, когда они проходят на близком расстоянии от центра атома, испытывают большие отклонения, хотя вероятность такого отклонения мала*". В 1913 году ученики Э. Резерфорда – Г. Гейгер и Марсден совместно со своим учителем экспериментальным путем пришли к важному заключению о том, что ядро атома обладает положительным электрическим зарядом и несет в себе почти всю массу атома [2]. На долю периферийных связанных электронов атома, окружающих ядро атома, приходится крайне незначительная доля массы атома. Например, согласно современным данным на долю 82 связанных электронов атома свинца *Pb* с атомным весом (атомной массой) 207,21 [2,5] приходится лишь вес 0,045 (около 0,02 % от общего веса атома). При этом число элементарных зарядов ядра атома оказалось прямо пропорциональным атомному весу химического элемента. Следует подчеркнуть то, что до этих работ в 1913 году Э. Резерфорд знак (полярность) электрического заряда ядра атома вещества для себя считал неопределенным [2, 4]. Оказалось, что диаметр ядра атома вещества составляет порядка  $10^{-15}$  м, а диаметр самого атома примерно в  $10^5$  раз больше диаметра его ядра и составляет порядка  $10^{-10}$  м [3, 5]. Все остальное пространство в атоме вещества занимает вакуум (этот термин происходит от латинского слова "*vacuum*" – "*пустота*" [7]). Доля пустоты (вакуума) в атомах всех химических элементов оказалась настолько большой, что эта тайна природы вызвала у ученых-физиков неимоверное удивление. В результате открытия ядра атома вещества в ходе указанных выше исследований Э. Резерфордом в 1913 году была предложена **планетарно-ядерная модель атома**.

Важным этапом в изучении строения атомов материи стало использование в экспериментальных исследованиях их свойств открытого в 1895 году известным немецким физиком Вильгельмом Рентгеном (1845-1923 гг.) X-лучей или "рентгеновского излучения". За его открытие В. Рентген в 1901 году стал первым лауреатом Нобелевской премии по физике [2]. Следует напомнить читателю, что существует два вида рентгеновского излучения (суперкоротких электромагнитных волн с длиной волны от  $10^{-7}$  до  $10^{-14}$  м) [5, 8]: *первый вид* – тормозное (непрерывное) рентгеновское излучение, вызванное процессом взаимодействия ускоренных в вакуумной электроразрядной трубке свободных электронов с поверхностью ее металлического электрода-анода; *второй вид* – характеристическое (линейчатое) рентгеновское излучение, определяемое процессом возбуждения ускоренными в вакуумной электроразрядной трубке свободными электронами связанных электронов на внутренних

орбитах атомов металла ее электрода-анода и их переизлучением из-за переходов этих возбужденных связанных электронов на внешние и далее опять на внутренние орбиты данных атомов. Характеристическое рентгеновское излучение по сравнению с торчозным рентгеновским излучением является более коротковолновым (более высокочастотным) и поэтому более жестким (соответственно и энергетически более сильным) излучением. С учетом этого в 1913 году Э. Резерфорд поручил своему молодому талантливому ученику Генри Мозли (1887-1915 гг.), погибшему на европейском поле сражений Первой мировой войны, исследовать характеристическое рентгеновское излучение, получаемое при бомбардировке быстрыми свободными электронами электродов-анодов, выполненных из различных химических элементов. Г. Мозли в ходе этих экспериментальных исследований установил, что длина волны  $\lambda_r$  этого излучения зависит от величины заряда ядра атома того элемента, который подвергался воздействию быстрых свободных электронов, ускоренных в вакуумной электроразрядной (рентгеновской) трубке [2, 5]. Поэтому, зная длину  $\lambda_r$  соответствующей волны характеристического рентгеновского излучения, можно было с учетом полученной им эмпирической зависимости вычислить величину электрического заряда ядра атома исследуемого в рентгеновской трубке химического элемента (металла ее электрода-анода). На основании этой опытной зависимости Г. Мозли определил величину зарядов ядер атомов первоначально для цинка  $Zn$  (была равна 30), железа  $Fe$  (была равна 26) и свинца  $Pb$  (была равна 82) [2, 3]. Найденные величины электрических зарядов ядер указанных атомов в точности совпадали с номерами клеток, в которых размещались эти химические элементы в периодической системе элементов Д.И. Менделеева [1, 5]. Обсудив эти результаты с Э. Резерфордом, Г. Мозли решил исследовать опытные зависимости между рентгеновскими спектрами и электрическими зарядами ядер атомов для более широкого круга химических элементов. Его тщательные рентгеновские исследования иных элементов (металлов) также подтвердили их предварительный вывод: найденные опытным путем величины зарядов их атомных ядер численно совпадали с номерами соответствующих химических элементов в периодической таблице элементов Д.И. Менделеева [2, 5]. Так исторически была установлена в 1913 году главная характеристика атомов вещества – величина **положительного электрического заряда** атомного ядра, определяющая их место в периодической системе химических элементов. По предложению ученых бывшего СССР число, выражающее величину положительного электрического заряда ядра атома и соответственно порядковый номер химического элемента в указанной системе элементов в знак научной заслуги автора периодического закона, во всем мире стали называть числом Менделеева [2, 3]. Определение числа Менделеева для всех известных землянам химических элементов позволило решить сразу две научные задачи: во-первых, определить их окончательное место в периодической системе элементов Д.И. Менделеева и, во-вторых, определить количество связанных электронов, вра-

щающихся вокруг положительно заряженного ядра в атоме каждого элемента. Данное количество отрицательно заряженных связанных электронов для любого сорта атома (элемента) было равно величине положительного электрического заряда его ядра (числу Менделеева). Далее исторически перед физической и химической наукой встал трудный вопрос о расположении связанных электронов вокруг ядра атома (об электронной оболочке атомов), форме и размерах их орбит и порядке их застройки электронами. В конце концов и этот вопрос учеными в рамках планетарно-ядерной модели атома был разрешен (эти особенности построения электронной оболочки атомов с учетом известных данных из атомной физики автором были изложены в научно-популярной форме в [4, 9] и вкратце будут представлены ниже).

**Квантово-ядерная модель атома Бора.** Планетарной модели атома Резерфорда был присущ один серьезный и непреодолимый в рамках классической электродинамики недостаток: атом вещества, построенный на основе этой модели, был неустойчивой электродинамической системой. Согласно законам электродинамики связанные электроны атома, совершающие вокруг атомного ядра на своих орбитах круговые периодические движения, должны были непрерывно излучать электромагнитную энергию. Теряя со временем эту излучаемую из электронной оболочки атома энергию, связанные электроны атома были вынуждены "падать" на его ядро. В действительности же такие явления в атомах вещества не наблюдались. Кроме того, такие движения связанных электронов атома не могли приводить к уже известным и наблюдаемым на то время линейчатым спектрам атомов, характерным для каждого вида (сорта) атома вещества. Выдающемуся датскому физико-теоретику Нильсу Бору (1885-1962 гг.) эти недостатки планетарной модели атома Резерфорда были хорошо известны. Известно ему было и то, что величина электрического заряда ядра атома соответствовала числу связанных электронов в нем и определялась местом химического элемента (сорта атома) в периодической системе элементов Д.И. Менделеева [2, 5]. Исходя из такого понимания физико-химических свойств элементов, Н. Бор (рис. 2) в 1913 году в своей знаменитой серии статей на общую тему "*О строении атомов и молекул*" предложил на основе положений тогда только зарождающейся квантовой механики более совершенную, чем планетарная модель атома Резерфорда, квантовую модель строения атома вещества [2, 4]. Революционной и отличительной особенностью новой модели атома было квантование энергии его связанных электронов. Эта модель базировалась на теории дискретных квантов действия (этот термин происходит от латинского слова "*quantum*" – "*порция*" [7]) выдающегося немецкого физико-теоретика Макса Планка (1858-1947 гг.), удостоенного за их открытие Нобелевской премии по физике за 1918 год [2]. Н. Бор в своей новой модели атома вещества гипотетически предложил чуждые классической физике новые представления, согласно которым любой атом может находиться в дискретном ряде стационарных энергетических состояний, не сопровождающихся излучением энергии. Переход любого атома из нормального в

возбужденное энергетическое состояние может происходить только путем поглощения его связанными электронами кванта света лишь соответствующей величины. В квантовой модели атома Бора связанные электроны атома могли поглощать (излучать) только строго определенные порции (кванты) энергии [5].



Рис. 2. Нильс Бор (1885-1962 гг.)

В данной модели атома квантование энергии связанных электронов атома вещества вызывало и квантование их круговых орбит (энергетических уровней) вокруг центрального положительно заряженного атомного ядра. Связанный электрон атома, получив извне определенную порцию энергии, переходил (перескакивал) на более удаленную от ядра атома орбиту. Потеряв (излучив) сразу всю дополнительно полученную порцию энергии, этот связанный электрон совершал скачок (переход) с удаленной от ядра атома орбиты на свою первоначальную и более близко расположенную к атомному ядру орбиту [2, 5]. Причем, этот скачок он (электрон) совершал, минуя все промежуточные и дискретно заданные этой моделью электронные орбиты. На основе модели атома Бора можно было определить его ряд квантованных параметров: орбитальную скорость  $v_{en}$  связанных электронов, радиус  $r_{en}$  их круговой орбиты, энергию  $\Delta E_n$  и частоту  $\nu_n = \Delta E_n / h$  квантов его излучения, где  $n=1,2,3,\dots$  – целое число, равное порядковому номеру электронной орбиты в атоме по мере ее удаления от его ядра (главное квантовое число, соответствующее номеру периода в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева [4, 5]),  $h=6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка, а  $\Delta E_n$  – разность энергий электрона между соответствующими энергетическими уровнями (орбитами) электронной оболочки атома [2, 5]. Квантовая теория атома Бора позволила объяснить основной закон спектроскопии и вычислить постоянную Ридберга из фундаментальных величин заряда электрона  $e_0=1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл, его массы  $m_e=9,108 \cdot 10^{-31}$  кг и постоянной Планка  $h$  [2, 5]. Данная квантовая теория строения атома позволила правильно физически представить и описать экспериментально наблюдаемые частоты (длины волн) для известных линейчатых спектров атома водорода  $H$  (для серии Лаймана, Бальмера, Пашена, Брекета и Пфунда [5]). Следует отметить и то, что эта атомная теория Н. Бора в своем первоначальном виде не смогла объяснить такие экспериментальные данные атомной физики как расщепление спектральных линий атомов в сильном электрическом поле (эффект Штарка) или в сильном маг-

нитном поле (эффект Зеемана) [2, 5]. Квантовые построения Н. Бора применительно к атому вещества получили в 1914 году опытные подтверждения в известных физических опытах Джеймса Франка и Густава Герца, удостоенных за результаты этих исследований Нобелевской премии по физике за 1925 год [2, 5]. Результаты данных многолетних классических экспериментов авторитетных немецких физиков Д. Франка и Г. Герца однозначно показали, что энергия атомов изменяется дискретным (квантованным) образом со строго характерными для каждого вида (сорта) атомов количественными показателями. Ими было установлено, что, например, для атомов ртути  $Hg$  энергия поглощаемого кванта при их возбуждении и соответственно испускаемая потом энергия кванта при переходе возбужденных атомов ртути  $Hg$  в их основное нормальное состояние составляет около 4,9 эВ ( $7,85 \cdot 10^{-19}$  Дж [10]). Данная энергия соответствовала энергии кванта ультрафиолетового света (излучения) с длиной волны, примерно равной 253,6 нм [4, 5]. Н. Бор за разработку своей квантово-ядерной модели атома, имеющей фундаментальное научное значение и явившейся значительным шагом вперед в описании внутриатомных процессов, был удостоен Нобелевской премии по физике за 1922 год [2, 4]. В 1915 году известным немецким физиком-теоретиком Арнольдом Зоммерфельдом (1868-1951 гг.) квантовая модель атома Бора была определенным образом усовершенствована за счет введения в нее идеи пространственного квантования. Им было предложено то, что вращение связанных электронов в атоме (химическом элементе) происходит не только по круговым, но и по эллиптическим орбитам [2, 5]. Для описания подобного движения электронов в атоме А. Зоммерфельдом дополнительно к главному квантовому числу  $n=1,2,3,\dots$ , соответствующему порядковому номеру круговой орбиты связанного электрона и полностью определяющему его энергию в атоме, было введено орбитальное квантовое число  $l=n-1$ , характеризующее форму орбиты связанного электрона в атомной (электронной) оболочке.

В 1917 году квантовая теория строения атома Бора была уточнена выдающимся немецким физиком-теоретиком Альбертом Эйнштейном (1879-1955 гг.), удостоенного за квантовую теорию фотоэффекта Нобелевской премии по физике за 1922 год, в части введения в нее квантовых представлений о вероятности различных самопроизвольных и вынужденных переходов связанных электронов в атомах вещества [2, 4]. Кроме того, в 1925 году А. Зоммерфельдом для описания электромагнитных свойств связанного электрона в атоме было введено очередное третье квантовое число – магнитное квантовое число  $m_l = \pm l$ , характеризующее ориентацию плоскости электронной орбиты в трехмерном атомном пространстве [2, 4]. Теория атома Бора-Зоммерфельда обеспечивала правильное описание внутриатомных процессов на энергетических уровнях водородоподобных атомов, имеющих один валентный связанный электрон, находящийся на внешнем энергетическом уровне атома. Однако она была не в состоянии правильно объяснить и описать внутриатомные процессы (например, рассеяние ускоренных электронов атомами, интенсивность и поляри-



зацию спектральных линий сложных атомов, аномальный эффект Зеемана [2, 5]) в более сложных, чем атом водорода  $H$ , многоэлектронных атомах. К 30-ым годам 20-го столетия многим физикам мира было видно, что квантовая теория атома, разработанная Н. Бором и усовершенствованная А. Зоммерфельдом, при всех своих научных достоинствах имеет и серьезные недостатки принципиального характера [4, 5].

Рассматривая квантовую модель атома Бора, необходимо отметить то, что для понимания устройства атома вещества много дал спектральный анализ, изучающий характер и происхождение различных видов излучения как от микрообъектов (атомов и молекул), так и от макрообъектов (физических тел). Крупным шагом в деле расширения возможностей спектральных исследований для изучения строения атомов были работы известного русского физика Д.С. Рождественского (1876-1940 гг.), ставшего в 1929 году академиком АН СССР [2, 3, 5]. Научные результаты, изложенные в 1920 году в его статье "Спектральный анализ и строение атома" [2], позволили дальше развить квантовую теорию строения атома Бора. Эти исследования Д.С. Рождественского легли в основу положения о связи между строением электронной оболочки тех или иных сортов атомов (элементов) и их химическими свойствами, вытекающими из размещения этих элементов в периодической системе Д.И. Менделеева.

Здесь следует отметить и то, что большую роль в изучении закономерностей, которым подчиняется устройство электронных оболочек атомов, сыграл сформулированный в 1925 году выдающимся австрийским физиком-теоретиком Вольфгангом Паули (1900-1958 гг.) принцип запрета (в современной теоретической физике он именуется "запретом Паули") [2, 5]. За открытие принципа "запрета Паули" его автор был удостоен Нобелевской премии по физике за 1945 год [2, 4]. Согласно этому принципу в одном атоме вещества не может быть двух совершенно одинаковых связанных электронов, которые не отличались бы друг от друга либо своей энергией (главным квантовым числом  $n$ ), либо формой электронной орбиты вокруг атомного ядра (орбитальным квантовым числом  $l$ ), либо положением электронной орбиты в атомном пространстве (магнитным квантовым числом  $m_l$ ), либо направлением кругового вращения вокруг собственной оси (спиновым квантовым числом или спином  $m_s = \pm 1/2$ ) [2, 4]. Кстати, положительное значение четвертого квантового числа – спина  $m_s$  соответствует одинаковому направлению собственного и орбитального вращения связанного электрона в атоме, а отрицательное значение спина  $m_s$  – их противоположному направлению вращения [4, 5]. В этой связи согласно фундаментальному принципу запрета Паули в атоме любого вещества в его электронной оболочке может находиться лишь один связанный электрон в энергетическом состоянии, характеризуемом только ему соответствующими значениями всех четырех квантовых чисел  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  и  $m_s$ . Так, шаг за шагом, учеными-физиками раскрывалось строение атомов вещества – этих сверхмалых "кирпичиков" мироздания.

Важно подчеркнуть здесь то, что именно особенности строения электронных оболочек атомов и объяснили, в конце концов, причины периодического изме-

нения свойств химических элементов (этих разных сортов атомов) в их естественной последовательности по атомным весам или числам Менделеева. Учеными-химиками было установлено, что химические свойства элементов обуславливаются, главным образом, строением наружных слоев электронных оболочек атомов вещества [2, 5, 10]. Эти слои атомной оболочки заполняются, как правило, по одному и тому же закону [5, 9, 10]: сначала в наружном слое одного элемента появляется один связанный электрон, у следующего за ним элемента по периодической системе (таблице) элементов Д.И. Менделеева – два электрона, затем – три электрона и так далее (например, для второго периода ( $n=2$ ) в пределе до восьми электронов). Максимальное число электронов в слое с одинаковым главным квантовым числом  $n$  составляет величину  $2n^2$  [5, 9]. Причем, в пределах каждого электронного слоя атома его электроны из-за разных значений их орбитального квантового числа  $l$  могут заселяться по разным подоболочкам ( $s$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $f$ ,  $g$ ) с числом электронов на них, равным  $2(2l+1)$  [5, 9]. Необходимо помнить, что в атоме его  $s$ -подоболочке соответствует орбитальное квантовое число  $l=0$ ,  $p$ -подоболочке –  $l=1$ ,  $d$ -подоболочке –  $l=2$ ,  $f$ -подоболочке –  $l=3$ , а  $g$ -подоболочке –  $l=4$ . Когда предыдущий электронный слой атома (слой с меньшим значением главного квантового числа  $n$ ) со всеми своими подоболочками заполняется доотказа (полностью), начинается формирование нового последующего электронного слоя (слоя с большим на единицу значением главного квантового числа  $n$ ). В периодическом повторении по мере возрастания атомного веса (числа Менделеева) элементов устройства наружных слоев электронных оболочек различных видов (сортов) атомов и заключается электрофизическая причина периодической повторяемости свойств химических элементов в периодической системе элементов Д.И. Менделеева [5].

**Квантовомеханическая модель атома Шредингера.** Создание в конце 20-х годов 20-го столетия выдающимся австрийским физиком-теоретиком Эрвином Шредингером (1887-1961 гг.) новой науки – волновой механики [2, 4, 5] позволило по-новому взглянуть на атомную теорию и внутриатомные процессы. Применение волнового уравнения, открытого Э. Шредингером (рис. 3) и являющегося дифференциальным уравнением 2-го порядка в частных производных, к описанию квантовомеханических процессов в водородоподобном атоме вещества показало, что распределение электронов в его атомной оболочке описывается пространственными стоячими волнами – волновыми  $\psi$ -функциями [4, 5]. Каждой стоячей электронной волне (волне Луи де Бройля, названной в честь одноименного французского автора ее открытия и лауреата Нобелевской премии по физике за 1929 год [2, 5]) соответствует строго определенная (квантованная) энергия связанного электрона (его энергетический уровень), определяемая значением найденной из решения уравнения Шредингера собственной волновой  $\psi$ -функции. Электроны атомной оболочки при данном квантовофизическом волновом подходе для анализа внутриатомных процессов могут переходить из одного энергетического состояния, описываемого одной волновой  $\psi$ -функцией, в их другое состояние, которому соответствует другая волновая  $\psi$ -функция [4, 5].



Рис. 3. Эрвин Шредингер (1887-1961 гг.)

Квадрат модуля волновой  $\psi$ -функции в заданной точке атомной оболочки определяет вероятность нахождения электрона в той или иной точке оболочки. Полученные на основе решения волнового уравнения Шредингера для атома водорода  $H$  собственные значения энергии и наиболее вероятного радиуса его  $s$ -электрона полностью совпадали с расчетными данными по планетарно-квантовой теории строения атома Бора [4, 5]. В 1927 году английский физик Джордж Томсон при исследовании дифракции электронов впервые экспериментально подтвердил существование электронных волн материи [4, 5]. В 1933 году Э. Шредингер за разработку волновой атомной теории стал лауреатом Нобелевской премии по физике [2, 4].

**Протонно-нейтронная модель ядра атома.** В 1932 году молодой советский физик Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904-1994 гг.) предложил новую модель строения ядра атома [2, 5]. Согласно этой теории Д.Д. Иваненко (рис. 4) ядра атомов всех химических элементов состоят из определенного набора всего двух микрочастиц – **положительно заряженных протонов** (открыты в 1886 году немецким физиком Е. Гольдштейном с массой  $1836 \cdot m_e$  [2, 4]) и **электро-нейтральных нейтронов** (открыты в 1932 году английским физиком Д. Чэдвиком с массой  $1839 \cdot m_e$  [2, 4]). Необходимо заметить, что чуть позже в том же 1932 году независимо от Д.Д. Иваненко подобную протонно-нейтронную модель ядра атома вещества разработал и выдающийся немецкий физик-теоретик Вольфганг Гейзенберг [2, 4]. Сейчас данная протонно-нейтронная модель ядра атома, подтвержденная экспериментально, является общепризнанной в мире.



Рис. 4. Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904-1994 гг.)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 1: Открытие периодического закона химических элементов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2011. – № 2. – С. 3-9.
2. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
3. Степанов Б. История великого закона. – М.: Молодая гвардия, 1952. – 327 с.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
5. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
6. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 2: Открытие и изучение радиоактивности химических элементов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2011. – № 3. – С. 3-9.
7. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
8. Баранов М.И. Слабое и сильное рассеяние дрейфующих свободных электронов в металлическом проводнике с электрическим током проводимости // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – № 3. – С. 3-8.
9. Баранов М.И. Электроны и земная цивилизация // *Электротехника і електромеханіка*. – 2009. – № 5. – С. 3-12.
10. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 1: Otkrytie periodicheskogo zakona himicheskikh `elementov // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2011. – № 2. – S. 3-9. 2. Kudryavcev P.S. Kurs istorii fiziki. – M.: Prosveschenie, 1974. – 312 s. 3. Stepanov B. Istoriya velikogo zakona. – M.: Molodaya gvardiya, 1952. – 327 s. 4. Baranov M.I. Izbrannye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 1: `Elektrofizika i vydayuschiesya fiziki mira. – Har'kov: Izd-vo NTU "HPI", 2008. – 252 s. 5. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 6. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 2: Otkrytie i izuchenie radioaktivnosti himicheskikh `elementov // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2011. – № 3. – S. 3-9. 7. Bol'shoj illyustrirovannyj slovar' inostrannyh slov. – M.: Russkie slovari, 2004. – 957 s. 8. Baranov M.I. Slaboe i sil'noe rasseyanie drejfu-yuschih svobodnyh `elektronov v metallicheskom provodnike s `elektricheskim tokom provodimosti // *Tehnichna elektrodinamika*. – 2010. – № 3. – S. 3-8. 9. Baranov M.I. `Elektrony i zemnaya civilizaciya // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2009. – № 5. – S. 3-12. 10. Yavorskij B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike. – M.: Nauka, 1990. – 624 s.

Поступила 05.01.2011

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.  
НИПКИ "Молния"  
Национального технического университета  
"Харьковский политехнический институт"  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47  
тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I.

### An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 3: Discovery and study of atomic structure of matter

A brief outline from the global history of study and discovery of atomic structure of matter, which is of fundamental significance for mankind in cognition of Nature, development of science and technology.

Key words – history, atom, structure of matter.