

К 150-летию Д. И. Менделеева

РЕВОЛЮЦИИ В УЧЕНИИ О ПЕРИОДИЧНОСТИ

Д. Н. ТРИФОНОВ

С марта 1869 г. по декабрь 1871 г. Д. И. Менделеев разработал целостную совокупность взглядов о закономерностях периодического изменения свойств химических элементов по мере увеличения их атомных весов. Эти представления составили суть менделеевского учения о периодичности. Оно включает два основных понятия: 1) о периодическом законе и 2) о периодической системе элементов. При этом закон имеет конкретизированное отражение в системе, для которой известны различные формы графического изображения, главным образом в виде таблиц. Анализируя историю учения о периодичности, необходимо оценивать, во-первых, как менялись представления о сущности закона и о структуре системы и, во-вторых, как отображались в ней особенности и закономерности изменения свойств вновь открываемых химических элементов.

К настоящему времени учение о периодичности оформилось в самостоятельное направление исследования. Оно впитало многие достижения химии и физики и потому может рассматриваться как своеобразная пограничная научная дисциплина, органически вплетающаяся в более общие разделы знания,— прежде всего в учение о химических элементах и в учение о строении вещества, составляя их непреходящую теоретическую основу. В ходе становления и развития учение о периодичности постоянно совершенствовалось и углублялось, неоднократно претерпевая изменения, которые нельзя расценивать иначе, как революционные.

Мы не будем здесь специально обсуждать вопрос о типологии научных революций — он с достаточной полнотой разработан в науковедении. Очевидно, в зависимости от степени общности, широты и глубины рассматриваемой области знания целесообразен селективный подход к отбору типов научных революций со свойственными им дефинициями. Применительно к оценке развития учения о периодичности представляется удобным использовать понятия «макрореволюция» и «микрореволюция». Под «микрореволюцией» следует подразумевать изменения представлений данной научной дисциплины, оказавшиеся последствиями открытий в рамках ее исследовательских задач и понятийного аппарата. Наступление «макрореволюции» стимулируется научными достижениями фундаментальной значимости, а их последствия приводят к революционной перестройке взглядов в обширных разделах знания. Но именно «макрореволюции» обуславливают кардинальный пересмотр сложившегося комплекса представлений и в частных научных дисциплинах.

Исторически правомерно рассматривать три уровня понимания феномена периодичности: 1) элементный (химический), 2) атомный (электронный) и 3) ядерный (нуклонный). Первый из них отвечал возникновению и формированию основных представлений об этом феномене, что нашло свое выражение в менделеевской формулировке периодиче-

ского закона и разработке периодической системы химических элементов. Второй и третий уровни обусловлены появлением физической ядерной модели атома. Однако на первом уровне была принципиально невозможна физическая интерпретация явления периодичности, т. е. теоретическое обоснование периодического закона и структуры системы элементов. Все революции, имевшие место на первом уровне, носили «микро»-характер. Переход ко второму уровню стал неизбежным в результате кардинальных изменений в представлениях о строении и свойствах материи, — изменений, явившихся следствием великих физических открытий конца XIX — начала XX в., и это же способствовало выявлению третьего уровня. Несколько забегаая вперед, мы хотим сразу же подчеркнуть, что учению о периодичности пока суждено было пережить лишь одну «макрореволюцию», многочисленные последствия которой на продолжительное время определили специфику развития этого учения.

Развитие учения о периодичности на элементарном (химическом) уровне

Великое менделеевское открытие само по себе оказалось революционным событием в развитии естествознания и в первую очередь химии. Хаотическое множество известных химических элементов было упорядочено Менделеевым до такой степени, что эта упорядоченность, воплощенная в структуре периодической системы, в целом сохранила свои основные черты вплоть до настоящего времени. Между тем менделеевское учение о периодичности на протяжении более 40 лет начального развития не опиралось на какие-либо представления о строении атомов, а было лишь эмпирическим обобщением фактов. Феномен периодичности был связан, так сказать, лишь с чисто химической стороной дела и не имел физической интерпретации. Но и при таком положении вещей периодическая система не являлась статической систематикой элементов: ее «динамизм» сразу проявился в прогностических возможностях — в предсказаниях Менделеевым существования и свойств нескольких неизвестных еще элементов, в первую очередь экаалюминия (галлия), экабора (скандия) и экасилиция (германия). Хотя их действительное открытие и свершилось независимо от менделеевских прогнозов, оно стало революционным событием в развитии учения о периодичности. По своему характеру это была типичная «микрореволюция». Но она в существенной мере способствовала всеобщему признанию периодического закона и периодической системы: они стали действенным научным инструментом в химических исследованиях.

На химическом уровне фактически имело место лишь развитие представлений о структуре периодической системы, ибо формулировка закона, данная Менделеевым и констатировавшая периодическое изменение свойств элементов по мере увеличения атомных весов, не претерпевала да и не могла претерпеть изменений. Система — это определенным образом упорядоченное множество химических элементов, причем степень упорядоченности с течением времени возрастала, что в небольшой степени было связано с оправданием менделеевских прогнозов. Между тем предсказательные возможности системы были ограниченными, и в ней достаточно четко вырисовывались три области прогнозирования: 1) область достоверного прогнозирования, 2) область приблизительного прогнозирования и 3) область непредсказуемости [1, с. 21]. Первая из них относилась к тем регионам системы, где отсутствие элементов бросалось в глаза, поскольку «пробелы» находились в окружении давно известных и хорошо изученных элементов. Для описания свойств не открытых еще элементов эффективным оказывался метод интерполяции. Эта область охватывала группы и периоды элементов,

занимающих срединное положение в таблице Менделеева. Вторая область распространялась на крайние, граничные периоды и группы. Определенность здесь отсутствовала: неизвестно было точное число элементов в первом периоде, в промежутке между барием и танталом (редкоземельные элементы), в седьмом периоде. Метод интерполяции был фактически неприменим, а экстраполяция выглядела ненадежной, тем более что в данной области содержалось еще слишком мало открытых (или достоверно открытых) элементов. Наконец, слева от нижней и справа от верхней границ системы простирались области непредсказуемости, так как отсутствовали основания утверждать или отрицать существование элементов легче водорода и тяжелее урана.

Таким образом, общее число элементов, охватываемых периодической системой, оставалось неясным. Подобная неопределенность объяснялась тем, что не были вскрыты физические причины явления периодичности, а потому закон и система представляли собой лишь обобщения эмпирических фактов. Эти причины и не могли быть найдены, ибо оставалось загадкой строение атома. В рамках классической атомистики атом рассматривался как бесструктурная неделимая частица материи, и данное обстоятельство становилось тормозом на пути развития естествознания.

Но как раз в конце XIX в. осуществились — притом за весьма исторически короткий срок — блестящие открытия в физике, последствия которых произвели одну из величайших революций в истории естествознания и привели к кардинальному изменению представлений о строении и свойствах вещества, к созданию новой физической картины мира. Это — открытие рентгеновых лучей (1895 г.), явления радиоактивности (1896 г.), электрона (1897 г.) и благородных газов (1894—1898 гг.).

Обнаружение последних сразу оказало влияние на развитие учения о периодичности. Вследствие непонятной химической инертности благородных газов их размещение в периодической системе вызвало серьезные трудности. Подобное противоречие нельзя было разрешить каким-либо внешним образом; выход предстояло искать в рамках самого учения о периодичности. Он был найден в 1900 г. и заключался в выделении самостоятельной нулевой группы в периодической системе. В этом состояла еще одна «микрореволюция» в учении о периодичности. Во вторых, было устранено важное препятствие на пути его развития; во вторых, четко определились верхние границы периодов системы и стала возможной окончательная «химическая» формулировка понятия «период»; в-третьих, представление о химической бездеятельности элементов нулевой группы спустя некоторое время потребовало объяснений в рамках специфики строения их атомов, и это обстоятельство сыграло важную роль в разработке формальной теории периодической системы и электронных теорий химической связи.

Напротив, открытие большого числа так называемых радиоэлементов, что явилось результатом изучения явления радиоактивности, оказалось поначалу настолько серьезной трудностью в развитии учения о периодичности, что ее преодоление в рамках последнего не имело места. Точно так же оказалась преждевременной попытка Дж. Томсона объяснить причины периодичности на основе предложенной им электронной модели строения атома, хотя эта попытка содержала определенные рациональные зерна (см. [2, с. 24—27]).

«Макрореволюция» в учении о периодичности. Электронный и ядерный уровни

Эта революция многопланова по своему содержанию, и именно ей мы в существенной степени обязаны современному пониманию феномена периодичности. Ее начало правомерно датировать временем разра-

ботки Э. Резерфордом планетарной (ядерной) модели атома (1911 г.). Атому была приписана вполне определенная структура, и это давало основания связать свойства химических элементов со строением их атомов. Но потребовалось примерно полтора десятилетия, чтобы подобная связь была установлена с достаточной определенностью.

Важнейшим являлся вопрос о численных величинах положительных зарядов ядер. Первоначальные исследования приводили к выводу, что заряд равен примерно половине атомного веса элемента; оказалось, однако, что это верно лишь для легких элементов периодической системы. На данном направлении революционной оказалась идея А. Ван ден Брука: заряды ядер атомов численно равны порядковым номерам соответствующих элементов в таблице Менделеева (1913 г.). В том же году Г. Мозли, изучая характеристические рентгеновские спектры элементов, подтвердил эту идею экспериментально. Открытие Ван ден Брука — Мозли стало кардинально важным событием в развитии учения о периодичности. Во-первых, оно означало физическую интерпретацию закона периодичности, появление его современной формулировки, констатирующей периодическое изменение свойств элементов по мере роста Z . Во-вторых, однозначно определилась нижняя граница системы (водород — элемент, атом которого имеет $Z=1$), и выяснилось точное количество элементов между водородом и ураном; при этом в системе четко определились пробелы, отвечавшие не открытым еще элементам. Тем самым степень упорядоченности множества элементов существенно возросла. Однако все это еще не означало физической интерпретации причин периодичности.

Подобная интерпретация связана, главным образом, с работами Н. Бора, который применил в 1913 г. к модели Резерфорда квантовые представления, чем устранил ее внутреннюю противоречивость, и далее, в течение нескольких лет выявил основные закономерности связи свойств элементов со строением их атомов. Бор пришел к важнейшему выводу о существовании так называемой электронной периодичности, т. е. о периодическом повторении сходных типов внешних электронных оболочек атомов. В основе электронной периодичности лежит реальная схема формирования электронных конфигураций атомов по мере увеличения зарядов их ядер. Нужно отметить, что своеобразной «матрицей», способствовавшей разработке Бором моделей строения атомов, послужила структура периодической системы, сформировавшаяся на элементном уровне развития учения о периодичности.

Так возник новый уровень в эволюции этого учения — электронный. Его важнейшей чертой стала разработка формальной теории периодической системы, которая дала достаточно четкое и наглядное объяснение феномена периодичности. Определенным образом уточнилась и сама формулировка периодического закона: периодическое изменение свойств элементов в конечном счете оказывалось результатом периодически повторяющегося по мере роста Z строения внешних электронных оболочек атомов. Это было весьма существенное уточнение, ибо заряд ядра сам по себе однозначно не определяет электронную структуру соответствующего атома. Если принять во внимание не реальную, а так называемую идеальную схему формирования электронных конфигураций атомов (последовательное, без перерывов, заполнение каждой электронной оболочки до полной емкости) [2, с. 95—97; 3, с. 96—103], то, исключая интервалы $Z=1-18$ и $31-36$, в структуре «реальных» и «идеальных» атомов наблюдаются существенные расхождения при одном и том же заряде ядра, углубляющиеся по мере роста Z .

Возникновение электронного уровня представлений о периодичности, с одной стороны, не означало отрицания представлений элементного уровня. Периодическая система атомов отнюдь не адекватна периодической системе элементов: последняя по своему содержанию го-

раздо глубже, чем, собственно, и объясняется, что она не может в своей структуре непротиворечиво отразить все многообразие свойств элементов. С этим обстоятельством связано появление весьма большого (более 500) числа вариантов графического изображения системы элементов [4].

Но, с другой стороны, электронный уровень понимания феномена периодичности принципиально отличался от элементного. Д. И. Менделеев связывал периодическое изменение свойств элементов с их массами, тогда как теперь периодичность оказывалась зависимой от электронного «окружения» ядер. Между тем фактически вся масса атома сосредоточена в его ядре. В этом заключался своеобразный парадокс, ставший одним из следствий «макрореволюции». Однако обнаружилась четкая симбатность в последовательностях изменения величин атомных весов элементов и зарядов ядер атомов (исключение составляли лишь известные «аномалии»: Ag—K, Co—Ni и Te—I. В этой симбатности в конечном счете и заключается глубинная «ядерная» подоплека периодического закона. Если бы количества стабильных изотопов у существующих в природе элементов и их содержание в плеядах изначально были бы иными, а число «аномалий» — значительно большим, то иной оказалась бы последовательность элементов в их естественном ряду в соответствии с возрастающими значениями атомных весов. Такого рода ситуация вообще могла бы сделать проблематичным само обнаружение явления периодичности на элементном уровне. Но закономерности нуклеосинтеза в звездах в свое время «сработали» так, что нуклидный состав материи, из которой сформировалась Солнечная система, оказался именно таким, как есть, а не другим. Симбатность изменения величин атомных весов и зарядов ядер атомов закономерна, а потому фактор массы при глубокой интерпретации феномена периодичности ни в коем случае нельзя игнорировать.

Отсюда видно, сколь важным явилось открытие изотопии сначала у радиоактивных, затем у стабильных элементов, — существования разновидностей атомов с одинаковым значением Z , но различными атомными весами. Это привело к новому пониманию природы химических элементов и их атомных весов. Здесь заключается еще одно проявление «макрореволюции».

В 1924 г. С. А. Шукарев высказал мысль, что «периодичность есть свойство, заложенное в самом ядре атома» [5]. По тем временам это было достаточно смелое предположение. Но открытие большого числа стабильных изотопов и начавшиеся попытки разработать их рациональную систематику сделали вполне реалистичной постановку вопроса: не приложим ли принцип периодичности к множеству изотопов? Поскольку изотопия есть ядерное свойство, то решение этого вопроса в существенной степени зависело от представлений о ядерной модели. Поначалу была общепринятой протон-электронная модель ядра, предложенная в 1913 г. А. Ван ден Бруком [6]. В 1928 г. Г. Бек предположил, что «можно представить ядро, по аналогии с электронным строением атома, построенным из оболочек...» [7]. По существу, Бек впервые выдвинул принцип оболочечного строения ядра, и здесь мы видим зародыш идеи ядерной периодичности.

Однако достаточно определенное представление о ядерном уровне феномена периодичности складывалось постепенно, на протяжении 30-х—40-х годов. Существенную роль сыграло открытие нейтрона и разработка протоно-нейтронной схемы строения ядра и его оболочечной модели. Важное значение имело применение квантово-механических методов к описанию поведения нуклонов в ядрах, что позволило в общих чертах представить последовательность заполнения протонных и нейтронных оболочек и подоболочек, а также возникновение понятия о так называемых магических числах нуклонов (см. [2, с. 108—114]). До-

статочное строгое теоретическое обоснование оболочечная модель ядра получила в работах М. Гёпперт-Майер и И. Йенсена [8]. Магические значения Z и N (2; 8; 20; 50; 82 и 126) были интерпретированы как границы последовательно заполняющихся нуклонных оболочек. Ключом к решению этих проблем явилось введенное упомянутыми авторами представление о спин-орбитальном взаимодействии, приводящем к расщеплению отдельных ядерных оболочек, что отражается на общей последовательности их заполнения.

Оболочечная модель ядра кладется ныне в основу вариантов периодических систем изотопов, среди которых должен быть упомянут вариант, предложенный И. П. Селиновым [9, с. 43—73]. Но нет оснований утверждать, что уже разработана такая систематика изотопов, которая по своему значению может быть сравнимой с периодической системой элементов. Во-первых, явно недостаточен «фактический материал»: из ~ 6000 нуклидов, принципиально способных к существованию, известно менее 2000 (~ 320 природных стабильных и радиоактивных нуклидов и ~ 1500 искусственно радиоактивных); во-вторых, природа ядерных сил, объясняющих ядерные свойства и их закономерности, изучена гораздо меньше, чем сущность электромагнитных взаимодействий, «регулирующих» распределение электронов вокруг ядер.

Тем не менее ядерный уровень феномена периодичности имеет ныне самостоятельный статус научного факта. Правомерно даже говорить о специфической «ядерной» формулировке закона периодичности: свойства атомных ядер находятся в периодической зависимости от чисел и распределения составляющих их нуклонов (т. е. в известной степени от массовых чисел ядер, определяемых суммами протонов и нейтронов). Добавим, что сравнительное сопоставление масс ядер позволило обнаружить много важных теоретических закономерностей в ядерной физике. По сравнению с элементным и электронным уровнями ядерный оказывается весьма специфичным; вопрос о влиянии ядерной периодичности на проявление элементами химических свойств остается открытым. Следует заметить, что ядерная периодичность носит, так сказать, двойственный характер. Если электронная периодичность есть функция числа протонов, то ядерная связана с последовательным увеличением числа как протонов, так и нейтронов.

Вторая «макрореволюция» в учении о периодичности!

К концу 30-х годов «макрореволюция» в учении о периодичности свои возможности в значительной степени исчерпала. Становление электронного уровня привело к разработке теории периодической системы, которая получила определенную квантово-механическую интерпретацию (следует, однако, заметить, что существующие оценки роли квантовой механики в количественной интерпретации периодичности неоднозначны; подробнее см. в работах [2, с. 32—39; 10, с. 222—231]). Понимание феномена периодичности на протяжении ее периодов с первого по шестой включительно выглядело достаточно определенным и непротиворечивым (в седьмом периоде содержалось слишком мало известных элементов). Что касается структуры периодической системы, то в ней существовали спорные моменты (место водорода, проблема размещения редкоземельных элементов, элементов триад и благородных газов), но они имели все же второстепенное значение. Загадочным оставался вопрос о верхней границе периодической системы, так как теория не могла дать сколь-либо серьезных объяснений причин обрыва периодической системы на уране. Возможность существования в природе трансурановых элементов казалась маловероятной.

Для дальнейшей эволюции учения о периодичности революционное значение имело осуществление искусственного синтеза элементов с

$Z > 92$. Однако эта революция носила весьма своеобразный характер. Ее нельзя отнести к «макрореволюции», ибо ее последствия не привели (во всяком случае, пока) к какому-либо кардинальному пересмотру понимания сущности феномена периодичности. Она, пожалуй, может рассматриваться как составная часть «макрореволюции», происшедшей в другой области знания и связанной с реализацией возможности искусственного превращения элементов и получения искусственным путем новых атомных структур материи. Но характеризовать ее только как «микрореволюцию» значило бы недооценить ее, поскольку она позволила под новым углом зрения взглянуть на феномен периодичности в области больших значений порядковых номеров элементов.

Начнем с того, что верхняя граница периодической системы отодвинулась на 15 порядковых номеров (здесь следует говорить об искусственной верхней границе). Чем больше элементов охватывает периодическая система, тем полнее становятся наши представления о периодичности. В результате синтеза трансурановых элементов и более или менее детального изучения их свойств в эти представления вошло немало нового и неожиданного.

В соответствии с теорией периодической системы в седьмом периоде должно существовать семейство $5f$ -элементов, подобно тому как в шестом располагается семейство $4f$ -элементов (лантаноиды). По аналогии оно должно было начинаться после актиния. Однако Н. Бор еще в 1921 г. склонялся к выводу, что первый $5f$ -электрон скорее всего появится в атоме урана или даже более тяжелого элемента. Дело в том, что свойства тория, протактиния и урана похожи на свойства соответствующих d -элементов из предыдущих периодов и почти не имеют общего со свойствами церия, празеодима и неодима. Попытки теоретически установить начало заполнения $5f$ -подоболочки были нестрогими и приводили к разноречивым результатам.

Изучение химических свойств первых синтезированных трансурановых элементов (нептуния, плутония, америция и кюрия) показало, что эти элементы обладают гораздо большим диапазоном степеней окисления, чем их соответствующие аналоги из семейства лантаноидов. Предполагаемое сходство $4f$ - и $5f$ -элементов в действительности оказывалось довольно-таки относительным. «Равновесие» формальным образом установил Г. Сиборг, выдвинувший в 1944—1945 гг. так называемую актиноидную концепцию, согласно которой семейство элементов от тория до элемента с $Z=103$ (актиноиды) рассматривалось подобным ряду лантаноидов. Эта концепция сыграла определенную роль в деле химической идентификации ряда тяжелых трансурановых элементов, но по мере дальнейших исследований ее формализм становился все более отчетливым. Химики (главным образом в СССР и в США) были обнаружены неожиданные особенности химического поведения актиноидов: например, степени окисления VII у нептуния, плутония и америция, VI — у кюрия, установлена аномально высокая стабильность степени окисления II у эйнштейния и фермия, I — у менделеевия. Изучение свойств актиноидов позволило, таким образом, проникнуть в новый химический мир, существование которого нельзя было предвидеть на основании лишь простой экстраполяции закономерностей периодической системы в ее гипотетические области. Принятое ныне размещение элементов с $Z=90—103$ в таблице Менделеева, подчеркивающее их аналогию с лантаноидами, при реалистической оценке выглядит анахронизмом. В этом свете феномен периодичности в целом оказывается более причудливым и сложным, чем представлялось в конце 30-х годов. У элементов седьмого периода наблюдается отчетливое явление размывания периодичности [11; 12, с. 217] — результат нарушения четких границ между последовательно заполняющимися электронными подоболочками вследствие близких значений энергий электронов, принадлежащих

этим подоболочкам. Исследования самого последнего времени позволили открыть новые черты химического своеобразия трансурановых элементов [13, с. 172—199, 14].

Таким образом, исследования химии трансуранов показали истинную значимость их синтеза для расширения представлений о периодичности.

По мере того, как этот синтез продвигался в область все больших Z , его темпы заметно замедлялись, поскольку с увеличением Z резко уменьшались значения периодов полураспада даже самых «долгоживущих» изотопов, стремительно нарастала их неустойчивость по отношению к спонтанному делению. Для нуклидов с $Z \geq 103$ периоды полураспадов измеряются уже долями секунд. Поэтому химические свойства соответствующих элементов удалось оценить лишь ориентировочно, путем специальных тонких методов исследования. В середине 60-х годов казалось, что предел синтеза трансурановых элементов будет достигнут в обозримом будущем: критическое значение Z оценивалось равным ~ 108 — 110 . Однако именно в это время в теоретической ядерной физике произошло событие, которое неожиданным образом повлияло на развитие гипотетических представлений о феномене периодичности. Была выдвинута гипотеза об «островках» относительной стабильности ядер (ООС) в области некоторых экстраполированных магических значений Z и N . В соответствии с ней предполагалось, что ядра с $Z=114$, 126 , 164 или $N=184$, 196 могли бы быть достаточно устойчивыми по отношению к спонтанному делению, причем вероятные значения $T_{\text{сп}}$ оценивались в 10^{15} лет и выше (подробнее о гипотезе ООС см. в работах [15—17]).

Гипотеза ООС, таким образом, позволяла надеяться на осуществление синтеза некоторых «сверхэлементов» и даже на их обнаружение в природе. Соответствующие эксперименты предпринимались неоднократно, но оканчивались безрезультатно, ныне они практически прекратились. Окончательную оценку «жизнеспособности» гипотезы вынесет будущее; пока нет оснований отказываться от нее, но также нет оснований и относиться к ней с полным доверием.

Но вот что особенно интересно: гипотеза ООС стимулировала появление большого числа теоретических работ, непосредственно относящихся к оценке феномена периодичности в области больших значений Z . Ведь даже при удачном синтезе тех или иных «сверхэлементов» предстояло иметь дело с единичными их атомами; физическая и химическая идентификации оказались бы здесь чрезвычайно сложными и неоднозначными. Поэтому чрезвычайно важным было прогнозирование электронных конфигураций атомов и важнейших свойств соответствующих элементов. В исследованиях, проведенных в конце 60-х—начале 70-х годов, такое прогнозирование основывалось на использовании квантовомеханических методов, разработке специальных программ и проведении расчетов на быстродействующих ЭВМ. Конечно, можно было бы попытаться предсказывать свойства неизвестных элементов седьмого и восьмого периодов методом экстраполяции, но степень надежности прогнозов не представлялась достаточно убедительной, в особенности после выявления своеобразных свойств актиноидов. Кроме того, в областях с большими значениями Z усиливаются релятивистские эффекты, что не может не оказать влияния на энергетику электронных оболочек и подоболочек атомов и тем самым на характер их электронных конфигураций в основном состоянии.

Расчеты привели к весьма неожиданным выводам. В целом прогнозируемая последовательность построения электронных конфигураций атомов и особенности свойств соответствующих элементов в области $Z=119$ — 172 выглядят настолько необычными, что заставляют думать о гораздо большем усложнении явления периодичности, чем в области

трансурановых элементов. Не останавливаясь на деталях (подробности см. в работах [15—17]), перечислим существенные выводы.

1. Появление первого $8p$ -электрона в атоме с $Z=121$ и второго — в атоме с $Z=126$, причем эта пара $8p$ -электронов сохраняется на протяжении большого интервала Z . Ранее появление p -электронов сразу же после завершения s -подоболочки имело место только во втором и третьем периодах системы элементов.

2. Завершение восьмого периода элементом с $Z=164$, что мотивируется заполнением в его атоме $7d$ -подоболочки и исключительной ее устойчивостью (согласно же экстраполяции, восьмой период должен был бы заканчиваться элементом № 168 и содержать 50 элементов).

3. Совершенно необычная структура девятого периода, состоящего всего из восьми элементов (подобно второму и третьему) с $Z=165—172$, причем входящие в него p -элементы отвечают разным значениям главных квантовых чисел: $9s^2 9p^2 8p^4$.

4. В целом последовательность заполнения электронных подоболочек с орбитальным квантовым числом $l=1, 2, 3$ и 4 такова, что трудно говорить о четких границах между $8p$ -, $7d$ -, $6f$ - и $5g$ -подоболочками, т. е. явление размывания периодичности приобретает глобальный характер.

5. Расщепление орбиталей с $l \geq 1$ на два подуровня: $j=l+1/2$ и $j=l-1/2$ — явление, аналогичное спин-орбитальному расщеплению нуклонных уровней в оболочечной модели ядра (см. выше).

Выше мы подчеркнули революционное значение синтеза трансуранов для эволюции представлений о периодичности. Как же следует оценивать ситуацию, сложившуюся в результате компьютерных прогнозов свойств «сверхэлементов»? В известной степени как своеобразное продолжение «трансурановой» революции, хотя, повторяем, полученные результаты носят сугубо теоретический характер и без экспериментальной проверки их ценность представляется весьма относительной.

Но допустим, что компьютерные расчеты в той или иной мере оказались бы реальными. В этом случае на три момента следует обратить внимание. Во-первых, на резкое нарушение последовательности формирования электронных конфигураций атомов «сверхэлементов», что выразилось бы в широком диапазоне проявляемых ими степеней окисления и, следовательно, в большом разнообразии химических свойств. В какой степени удалось бы «совместить» это разнообразие со структурой периодической системы, — на сей счет вообще лучше воздержаться от предположений. В 1969 г. Г. Сиборг прямо заявил, что «положение таких элементов в периодической системе будет скорее определяться их атомным номером, чем химическими свойствами» [18, с. 154]. Во-вторых, на совершенно необычное построение p -подоболочки в атомах элементов девятого периода ($Z=167—172$): $9p^2 8p^4$, что связано с упомянутым выше «расщеплением» орбиталей с $l \geq 1$. Такое явление, как известно, характерно для нуклонной периодичности. Отсюда не столь уж парадоксальным выглядит вывод, что в области больших значений Z проявилась бы некоторая новая закономерность, коррелирующая построение электронных подоболочек, с одной стороны, и нуклонных — с другой, иначе говоря, определенное «сближение» электронного и ядерного уровней феномена периодичности. В-третьих, на то, что девятый период, подобно второму и третьему, является «малым». Не проявляется ли здесь своеобразная тенденция к структурному «сжатию» периодической системы в области дальних «сверхэлементов»?

Из приведенных рассуждений следует вывод, который на первый взгляд может вызвать удивление. Хотя знания о самых различных свойствах химических элементов возросли в весьма существенной степени и были выявлены многие нюансы этих свойств, до синтеза трансуранов и детального изучения их химического поведения, до «компьютерных» прогнозов в области «сверхэлементов» представления о феномене пе-

риодичности были гораздо более определенными. Ученые 30-х годов знали слишком мало, чтобы отваживаться на прогнозы в гипотетических областях периодической системы. Ученые же 80-х годов, вооруженные современными теоретическими концепциями и экспериментальными методами, преуспели в прогнозах, но эти прогнозы скорее способствовали неопределенности, чем более ясному пониманию существа дела.

Собственно говоря, мы должны иметь в виду две возможности. Первая: гипотеза ООС окажется несостоятельной. Тогда придется признать, что предел искусственного синтеза элементов почти уже достигнут. Тем самым окажется близким к решению вопрос о пределе существования атомных структур материи, верхней границе периодической системы. Мы сможем, таким образом, представить себе всю «сферу простираения» феномена периодичности. Вторая: все-таки удастся осуществить синтез тех или иных «сверхэлементов». В данном случае будет чрезвычайно важным, подтвердятся или не подтвердятся «компьютерные» прогнозы относительно их свойств. Но при этом снова повиснет в воздухе проблема верхней границы. Фактически данная проблема ныне остается столь же неясной, как и 50 лет назад. Мы не знаем, какой «ограничитель» поставила природа на пути искусственного синтеза атомных структур материи: будет ли критическое значение Z зависеть от ядерной неустойчивости или же скажется эффект мгновенного захвата K -электрона ядром. Самый дальний «островок относительной стабильности» прогнозируется для значения $Z=184$; предельная же величина $Z_{\text{крит}}$ для поглощения электрона, согласно некоторым расчетам [19], может достигать ~ 200 . Сугубая ориентировочность этих оценок очевидна. Но незнание конечного числа элементов исключает возможность законченной интерпретации феномена периодичности.

Закономерен вопрос: о какой же второй «макрореволюции» в учении о периодичности может идти речь?

Основной побудительной причиной первой «макрореволюции» стала атомная модель Резерфорда — Бора. Она самым решительным образом повлияла на развитие химии и физики в последние семь десятилетий. Объяснение причин периодичности было найдено в специфике формирования электронных конфигураций атомов по мере возрастания Z . Между тем атом нельзя рассматривать иначе, как целостную систему, как удивительную структуру материи, образованную тремя сортами «элементарных» частиц, которые принадлежат к разным классификационным группам: лептонам (электроны) и барионам (протоны и нейтроны). С другой стороны, атом как сложная материальная структура — это своеобразная «арена» проявления всех известных ныне фундаментальных взаимодействий, принципиально различающихся по своей природе. Характер распределения электронов в атоме и их «притяжение» ядром — сфера действия электромагнитных сил, изученных наиболее полно. Для ядра характерны три типа фундаментальных взаимодействий: сильное, электромагнитное и слабое. В данном случае уровень знаний ниже, поскольку теория ядерных сил еще не разработана с достаточной полнотой и строгостью.

Одной из самых злободневных задач теоретической физики является создание теории, которая описывала бы все четыре фундаментальных взаимодействия, так сказать, некоей единой теории взаимодействий. Определенные успехи на этом пути уже достигнуты. Совершенно очевидно, что подобная теория оказалась бы величайшей революцией в естествознании и привела бы к гораздо более глубокому пониманию физической картины мира.

Всякие конкретные предположения здесь преждевременны. Быть может, лишь одно из них заслуживает того, чтобы отнестись к нему со вниманием. Это — установление действительной связи между электрон-

ной и ядерной периодичностями, тем более что некоторые из результатов, полученных на компьютерах, дают определенные намеки на наличие такой связи в области больших значений Z . Вообще говоря, для известного множества нуклидов построение электронных оболочек и подоболочек, с одной стороны, и нуклонных — с другой, фактически описывается в рамках одного квантово-механического подхода и развивается, так сказать, параллельно, хотя имеет место и определенное различие (иная «комбинаторика» квантовых чисел). Обзор соответствующих работ см. [2, с. 108—126]. Хотя при сопоставлении и были «нащупаны» отдельные «правильности», они могут быть случайными совпадениями. Речь идет о том, как обстоит дело в области тяжелых гипотетических атомов. Не являются ли оба вида периодичности частными случаями какой-то общей закономерности?

В свое время Д. И. Менделеев с глубокой убежденностью утверждал, что будущее должно принести периодическому закону новые «надстройки» и «развитие». Его уверенность многократно находила подтверждения. Несомненно, эти подтверждения последуют и в будущем.

Литература

1. Трифонов Д. Н. Эволюция проблемы прогнозирования новых элементов.— В кн.: Прогнозирование в учении о периодичности. М.: Наука, 1976.
2. Трифонов Д. Н. О количественной интерпретации периодичности. М.: Наука, 1971.
3. Трифонов Д. Н. Структура и границы периодической системы. М.: Атомиздат, 1969.
4. Петрова И. А. Историко-научный анализ форм графического изображения периодической системы: Дис. на соискание уч. ст. канд. хим. наук. М.: ИИЕТ, 1983.
5. Шукарев С. А. Система химических элементов и учение об изотопах.— ЖРФХО, 1924, т. 55, ч. хим., в. 1—9.
6. Van den Brock A. Die Radioelemente, das periodische System und die Konstitution der Atome.— Phys. Z., 1913, В. 14.
7. Beck G. Uber die Systematik der Isotopen.— Z. Phys., 1928, В. 47, В. 50.
8. Гёпперт-Майер М., Йенсен И. Элементарная теория ядерных оболочек. М.: Изд-во иностр. лит., 1958.
9. Селинов И. П. Периодическая система атомных ядер.— В кн.: О систематике частиц. Атомы, ядра, элементарные частицы. М.: Атомиздат, 1969.
10. Трифонов Д. Н., Дмитриев И. С. О количественной интерпретации периодической системы.— В кн.: Учение о периодичности. История и современность. М.: Наука, 1981.
11. Трифонов Д. Н. Периодичность четкая и размытая.— Природа, 1970, № 5.
12. Трифонов Д. Н. Тяжелые элементы и периодическая система.— В кн.: Периодический закон и строение атома. М.: Атомиздат, 1971.
13. Михеев Н. Б. Новые проблемы в химии актиноидов.— В кн.: Учение о периодичности. История и современность. М.: Наука, 1981.
14. Звара И. Химия тяжелых трансурановых элементов.— Ж. Всесоюзн. хим. о-ва, 1983, № 6.
15. Сиборг Г. и др. Современные достижения по трансурановым элементам в США.— В кн.: Учение о радиоактивности. История и современность. М.: Наука, 1973.
16. Флеров Г. Н., Звара И. Элементы второй сотни. Препринт ОИЯИ Д7-6013. Дубна, 1971.
17. Proc. R. A. Welch Foundation Conf. on Chem. Research. XIII. The Transuranium Elements.— The Mendeleev Centennial. Nov. 17—19, 1969, Houston, 1970.
18. Сиборг Г. Эволюция периодической системы элементов со времен Д. И. Менделеева до наших дней.— В кн.: 100 лет периодического закона химических элементов. М.: Наука, 1969.
19. Зельдович Я. Б., Попов В. С. Электронная структура сверхтяжелых атомов.— Успехи физ. наук, 1971, т. 105.

REVOLUTIONS IN THE TEACHING OF PERIODICITY

D. N. TRIFONOV

The question of the revolutions in the development of the Mendeleev's teaching on the periodicity of qualities of the chemical elements is discussed. The meaning and consequences of the main revolution is analysed, which is connected with the working out and substantiation of the atomic model. The modern state of the ideas on the periodicity and possible trends in the development of these ideas in the future are considered.