
ТАБЛИЦА МЕНДЕЛЕЕВА

DOI: 10.22363/2224-7580-2020-3-111-130

ТАБЛИЦА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ

А.Ю. Грязнов

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы*

Аннотация. Рассматриваются три подхода к проблеме систематизации химических элементов: по атомному весу (Менделеев), структуре электронной оболочки (Томсон, Бор) и структуре ядра (Буртаев). Обсуждаются трудности первых двух подходов и указываются пути их разрешения на основе представлений о структуре атомных ядер, развиваемых Ю.В. Буртаевым.

Ключевые слова: таблица Менделеева, периодический закон, система элементов, структура атомных ядер, ядерная физика, кластеры, модель атома.

Другого ничего на свете нет...
Ни здесь, ни там – в космических глубинах.
Всё: от песчинок малых до планет
Из элементов состоит единых.
Степан Щипачёв

Систематизация химических элементов по атомному весу

В 2019 году исполнилось 150 лет первому варианту таблицы Менделеева. В дальнейшем таблица дополнялась и видоизменялась, приобретая окончательный авторский вид в начале XX века. Однако до сих пор не утихают споры о том, какой должна быть идеальная периодическая таблица элементов. В учебной литературе встречается разнобой. Например, в таблице, напечатанной в учебнике Д.В. Сивухина, инертные газы помещены в восьмую группу, а в учебном пособии «1001 задача по физике» – в нулевую, водород же в первой таблице помещен как в группу IA, так и в группу VIIA, а во второй – только в группу IA, как у Д.И. Менделеева.

Все варианты своей таблицы Дмитрий Иванович называл периодическим законом. Так, уже в 1869 году Менделеев провозгласил: «Элементы, расположенные по величине их атомного веса, представляют явственную *периодичность* свойств» [1. С. 52]. Однако строго закона не выходило. Например, 8 элементов в таблице 1871 года (Os, Ir, Pt, Au, Te, I, Ni, Co) были расположены вопреки известным в то время их атомным весам. Это противоречит распространенному мнению, будто бы Менделеев открыл периодический закон, просто расположив элементы в порядке возрастания их атомного веса. Кроме того, русский ученый изменил атомные веса 7 элементов (In, La, Y, Er, Ce, Th, U) и допустил необходимость существования целого ряда еще не открытых элементов, чего никто и никогда до него не делал. Выходит, Менделеев, продираясь через бурелом противоречивых данных, прописал для природы свой закон и на его основе начал оценивать и исправлять эмпирический материал¹. Что же это за закон? Об этом – ниже.

Характерны заголовки разделов в статье 1871 года «Периодическая законность химических элементов»: Применение закона периодичности к определению атомных весов мало исследованных элементов; Применение закона периодичности к определению свойств не открытых еще элементов; Применение закона периодичности к исправлению величины атомных весов; Применение закона периодичности к дополнению сведений о формах химических соединений. В этой статье Менделеев детально предсказал свойства новых элементов с вероятными атомными весами 44, 68 и 72. Это похоже на прозрение: ум теоретика видит то, чего еще нет в опыте. Неудивительно, что многим такой подход казался слишком рискованным, и предсказания Менделеева воспринимались как грезы. «Да оставьте Вы меня в покое с этими догадками! – писал Менделееву его учитель – соавтор открытия спектрального анализа Роберт Бунзен. – Такие правильности Вы найдете между числами биржевого листка!»

Поэтому Дмитрий Иванович, в соответствии с научной методологией познания, полагал, что «было бы немаловажным приобретением для теоретической стороны предмета, если бы хотя один из ожидаемых элементов был с положительностью открыт, и свойства его оказались такими, какими можно представлять их себе при сравнениях, основанных на естественной системе».

И вот в 1875 году француз Лекок де Буабодран открывает галлий, предсказанный Менделеевым под названием экаалюминий. Примечательно, что Буабодран, по мнению русского химика, неверно определил атомный вес открытого им элемента. Каково же было удивление французского ученого, когда проверка показала, что прав Менделеев, у которого в руках не было ни одного атома нового элемента!

Через четыре года швед Ларс Нильсон объявляет об открытии скандия, оказавшегося тождественным менделеевскому экабору. Но настоящий

¹ В связи с этим приходит на ум высказывание А. Эйнштейна о том, что только теория говорит, что на самом деле наблюдается. Теория становится нитью Ариадны в лабиринте экспериментальных данных.

триумф наступил, когда немец Клеменс Винклер открыл германий. «Нет никакого сомнения, что вновь найденный элемент есть не что иное, как предсказанный 15 лет тому назад Менделеевым экасилиций. Едва ли можно найти иное, более поразительное доказательство справедливости учения о периодичности как осуществление гипотетического экасилиция во вновь открытом элементе. Это не просто подтверждение смелой теории: здесь мы видим очевидное расширение химического кругозора, мощный шаг в область познания», – писал Винклер в своей статье 1886 года.

К 1890 году было получено подтверждение ряда измененных Менделеевым атомных весов. После этого Фридрих Энгельс имел полное основание утверждать, что «Менделеев совершил научный подвиг, который смело можно поставить рядом с открытием Леверье, вычислившего орбиту еще неизвестной планеты – Нептуна».

Однако реальная история науки гораздо запутаннее любых ретроспективных ее изложений. На самом деле ученые почти всегда имеют дело с так называемым «хаосом ощущений», то есть огромным массивом противоречивых экспериментальных данных. И отделить зерна от плевел по силам только выдающимся умам, способным выделить существенное и отбросить всевозможные «помехи». Так было и с периодическим законом Менделеева. Ведь что-то творилось, к примеру, с редкими землями? Только в период с 1878 по 1910 год было зафиксировано не менее 90 ложных открытий редкоземельных элементов! «Это было море ошибок, и истина в нем утонула!» – писал открыватель лютеция французский химик Ж. Урбэн.

А история с инертными газами чего стоит! В первых вариантах таблицы нет гелия. «В то время (1869–1971 гг.), когда устанавливался периодический закон, совершенно были неизвестны и вовсе непредвидимы такие недействующие в химическом смысле элементы, как аналоги аргона (He, Ne, Kr и Xe)...» – писал Менделеев в 8-м издании (1906 г.) «Основ химии» [2. С. 259]. А ведь гелий был открыт в 1868 году в солнечной короне с помощью спектрального анализа. Но то на Солнце! И Менделеев полагал, что неизвестная ранее спектральная линия (линия D₃) может принадлежать водороду, находящемуся в столь экстремальных условиях. Сомнения отпали лишь тогда, когда в 1895 году Вильям Рамзай и Вильям Крукс открыли земной гелий. А за год до этого Рамзай и Рэлей обнаружили в атмосфере Земли аргон (в смеси с другими благородными газами, о чем первоначально не догадывались). И это было настоящим испытанием для периодического закона Менделеева, ведь аргон не вписывался в таблицу элементов естественным образом. Положение могло бы спасти обнаружение других инертных газов, которые составили бы свою особую группу элементов. Открытие земного гелия подошло как раз кстати. Но этого было мало. И вот Рамзай, веря в периодический закон, в 1897 году произносит речь под названием «Неоткрытый газ» (тяжелее гелия и легче аргона). Так был предсказан неон. Но по воле случая (в мае 1898 года) сначала был открыт более тяжелый аналог аргона – криптон. Это несколько не смутило Рамзая, и в сообщении об открытии криптона он

уверенно заявил, что «неоткрытый газ» будет открыт в ближайшее время, что и произошло. И практически сразу был обнаружен еще один представитель благородного семейства – ксенон. Таким образом, менее чем за два месяца было открыто три новых химических элемента. Такого история химии еще не знала. И таблица Менделеева, выражающая его периодический закон, была спасена [5].

Была, правда, одна неприятность (а может, и не одна). Значение атомного веса аргона как будто бы было больше, чем у калия (40 и 39 соответственно), что не позволяло поместить аргон в естественный (по возрастанию атомного веса) ряд химических элементов после хлора и перед калием. Но другого места для аргона в таблице не было. Значит, приходилось нарушать «естественную» последовательность элементов? С этим Менделееву трудно было смириться, и он до последнего сомневался в правильности измерений атомного веса аргона, приписывая ему (правда, под вопросом) значение 38 (меньше, чем у калия). Такая же история выходила и с двумя другими парами соседних элементов: кобальт – никель и теллур – йод. Дмитрий Иванович не мог приписать кобальту и теллуру больший атомный вес, чем никелю и йоду соответственно (ведь про изотопы тогда ничего не было известно!). В его таблице (опять же под вопросом) кобальту и никелю приписывается одинаковый атомный вес – 59, теллуру и йоду также одинаковый – 127². Поменять местами теллур и йод не позволяет периодический закон: теллур должен быть в одном столбце со своими гомологами (серой и селеном), а йод – со своими (другими галогенами).

Вообще говоря, вопрос о сходных элементах нетривиален. «Понятия о степени сходства нередко будут относительны и резкости или точности не представляют. Так, литий сходен в одном отношении с калием, в других с магнием, бериллий сходствует с алюминием и с магнием. В таллии... есть много сходства со свинцом и ртутью, но есть часть свойств, принадлежащих литию и калию» [2. С. 253]. Что же взять за основу? Русский химик предлагает исходить из точно измеряемой величины. «Но у элементов есть точно измеряемое и никакому сомнению не подлежащее то свойство, которое выражено в их **атомном весе**» [Там же]. Однако мало расположить элементы по возрастанию атомного веса, надо еще из всего разнообразия их свойств выделить те, которые позволяют определить, какие элементы являются гомологами.

По Менделееву, элементы-гомологи дают похожие формы как высших, так и низших соединений. «Если CO₂ и SO₂ суть два газа, очень сходные как по физическим, так и по химическим свойствам, то причину этого не следует еще искать в сходстве серы с углеродом. ...Действительно между серой и углеродом сходства мало, как видно не только из того, что CO₂ есть *высшая форма* окисления, а SO₂ имеет способность окисляться в высший свой окисел SO₃, но также из всех других соединений... Наиболее между собой химически-сходственные элементы характеризуются тем, что дают предельные

² Современные значения: 58.93 (кобальт), 58.71 (никель) и 127.60 (теллур), 126.90 (йод).

соединения одинаковых форм... Сходные между собой галоиды дают и низшие, и высшие формы соединений одни и те же. Таковы же и щелочные металлы, также щелочно-земельные. ...Это сходство простирается на состав и свойства углеродистых, азотистых и водородистых соединений, более же всего оно видно в солях» [2. С. 253]. Вот в этом и заключается открытие Менделеева. Он понял, что существуют две реперные группы элементов – щелочные металлы и галогены, между которыми и нужно располагать все остальные (кроме инертных газов) в порядке возрастания атомного веса. Таким образом, если йод – галоген (галоид), то он должен стоять в таблице под другими галогенами (бромом, хлором и фтором).

Посмотрим, как Менделеев строит последний вариант своей таблицы (который заметно отличается от привычного для нас вида).

Периодическая система элементов по группам и рядам.

ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ	Группы элементов	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1	Водород H 1,008								
2	Гелий He 4,0	Литий Li 7,00	Бериллий Be 9,1	Бор B 11,0	Углерод C 12,0	Азот N 14,01	Кислород O 16,00	Фтор F 19,0	
3	Неон Ne 19,9	Натрий Na 23,00	Магний Mg 24,30	Алюминий Al 27,1	Кремний Si 28,2	Фосфор P 31,0	Сера S 32,06	Хлор Cl 35,45	
4	Аргон Ar 38	Калий K 39,10	Кальций Ca 40,1	Скандий Sc 44,1	Титан Ti 48,1	Ванадий V 51,0	Хром Cr 52,0	Марганец Mn 55,0	Железо Fe 55,9
5		Рубидий Rb 85,5	Стронций Sr 87,6	Иттрий Y 89,0	Цирконий Zr 90,6	Ниобий Nb 94,0	Молибден Mo 96,0	Родий Rh 101,7	Палладий Pd 106,5
6	Криптон Kr 81,8	Серебро Ag 107,90	Кадмий Cd 112,4	Индий In 115,0	Олово Sn 119,0	Свинец Pb 208,5	Висмут Bi 209,0	Полоний Po 210	Аурум Au 197,0
7	Бром Br 79,9	Цезий Cs 132,9	Барий Ba 137,4	Лантан La 138,9	Церий Ce 140,2				
8	Хлор Cl 35,5								
9									
10				Иттербий Yb 173	Тантал Ta 183	Вольфрам W 186			
11	Золото Au 197,2	Ртуть Hg 200,6	Таллий Tl 204,4	Свинец Pb 208,5	Висмут Bi 209,0				
12		Радий Ra 226	Торий Th 232,0	Уран U 238,5					

Менделѣевъ

D. Mendeleev

Д. Менделѣевъ.
1869—1900.

Рис. 1

Берем инертные газы и располагаем их вертикально в порядке возрастания атомного веса. Называем это нулевой группой, так как эти благородные газы химически неактивны (и, в частности, не образуют оксидов, что для Менделеева принципиально). Затем от гелия вправо располагаем по возрастанию атомного веса ближайшие элементы до фтора (это второй период³). Далее от неона вправо проделываем то же самое до хлора (получаем третий период). Это два *малых* периода. В каждом из них имеем по 8 элементов, расположенных в группах от нулевой до VII (всего пока 8 групп).

³ В первом расположен один водород.

Вместе с Менделеевым замечаем: «Элементы, обладающие наименьшими атомными весами, хотя имеют общие свойства групп, но при этом и много особых самостоятельных свойств». Гомологам «всегда свойственны и некоторые более резкие особенности, как это ясно видно при ближайшем знакомстве с органическими соединениями. Так, фтор отличается многим от других галоидов, литий – от других щелочных металлов и т.д.» [2. С. 255].

Остальные элементы расположим по *большим* периодам. Идея та же: надо двигаться по возрастанию атомных весов, начиная с инертного газа и заканчивая галогеном, так чтобы все галогены оказались в седьмой группе (все инертные газы уже находятся в нулевой). Правда, теперь в периоде от аргона (Ar) до брома (Br) имеем 18 элементов, в периоде от криптона (Kr) до йода (J) – 17 (один элемент, видимо, пока не открыт⁴), а в следующем периоде – от ксенона (Xe) и далее – вообще непонятно, сколько элементов⁵. Д.И. Менделеев отмечает: «От церия (Ce = 140) до тантала (Ta = 183) неизвестен целый большой период. Считая окислы за R₂O₃, сюда входят редкие металлы: Pr = 140, Nd = 144, Sm = 150?, Gd = 156, Tb = 160, Er = 166, Tu = 171⁶ и Yb = 173»⁷ [2. С. 264].

Как все эти элементы расположить относительно элементов малых периодов?

Принцип следующий. Разбиваем большие периоды на *четные* и *нечетные* ряды, между которыми помещаются три элемента еще одной – девятой – группы под номером VIII, ведь восьми групп уже не хватает. Она, правда, какая-то странная – в ней по горизонтали расположены три элемента.

Стараемся соблюдать следующее правило⁸. «Если в некоторой группе находятся элементы R₁, R₂, R₃ и в том ряду, где содержится один из этих элементов, например R₂, находится перед ним элемент Q, а после него элемент T, то свойства R₂ определяются по свойствам R₁, R₃, Q и T. Так, например, атомный вес R₂ = $\frac{1}{4}(R_1 + R_3 + Q + T)$. Например, селен находится в VI группе между серой (S = 32) и теллуром (Te = 127), а в 5-м ряду перед ним стоит мышьяк (As = 75) и после него бром (Br = 80). Отсюда атомный вес селена = $\frac{1}{4}(32 + 127 + 75 + 80) = 78,5$ – число, близкое к действительности» [2. С. 256]. «Такая же степень сходства, какую уже знаем между K, Rb и Cs, или Cl, Br и J, или Ca, Sr и Ba, существует и между элементами других вертикальных столбцов. Так, например, Zn, Cd и Hg представляют ближайшие аналоги магния» [Там же. С. 255].

⁴ Так оно и есть. Это технеций, открытый в 1937 году.

⁵ Мы сегодня знаем, что от ксенона до радона – 32 элемента.

⁶ Современное обозначение туллия Tm, его относительная атомная масса равна 168.93.

⁷ Дмитрий Иванович, по-видимому, точно не знает, в какие клетки таблицы поместить эти элементы (он определяет место только иттербию).

⁸ Менделеев обобщает правило триад Дёберейнера, который заметил, что если расположить три сходных по химическим свойствам элемента в порядке возрастания их атомных весов, то атомный вес среднего элемента составит среднее арифметическое атомных весов первого и третьего. Дёберейнер предложил три триады: кальций – стронций – барий (1817); литий – натрий – калий и сера – селен – теллур (1829).

Группу вместе с Менделеевым определяем, прежде всего, по «составу высших солеобразных окислов». «Первая группа дает R_2O , вторая R_2O_2 или RO , третья R_2O_3 и т.д. Форм окислов восемь, а потому и групп восемь. Два ряда дают большой период, и, следовательно, те же формы окислов в большом периоде встречаются двукратно. Например, в периоде, начинающемся с K , окислы состава RO образуются Ca и Zn , состава RO_3 – Ce и Se и т.д. Окислы четных рядов, при той же форме, обладают основными свойствами в большей мере, чем окислы нечетных рядов. А этим последним преимущественно свойствен кислотный характер» [2. С. 256].

Всматриваясь в последний вариант авторской таблицы Менделеева, мы замечаем свободные места для 14 в будущем открытых элементов (трансурановые пока не считаем): для технеция, прометия, европия, диспрозия, гольмия, лютеция, гафния, рения, полония, астата, радона, франция, актиния, протактиния. Для десяти из них в таблице имеются вполне определенные места. Для остальных четырех – неопределенные. Правда, имеются и лишние места, но их в нижней части таблицы немного. Вопросы возникают по поводу свободных мест в первом периоде, где находится один водород. Как будто Дмитрий Иванович не уверен в отсутствии в природе элементов, расположенных между водородом и гелием.

Систематизация элементов по структуре электронных оболочек

Менделеев полагал, что причину периодичности изменения физических и химических свойств элементов надо искать во внутреннем строении атомов, которое как-то связано с их массой. «Масса вещества есть именно такое свойство его, от которого должны находиться в зависимости все остальные свойства... Поэтому ближе и естественнее всего искать зависимости между свойствами и сходствами элементов, с одной стороны, и атомными их весами, с другой» [2. С. 254]. Точного закона не получилось: некоторые элементы не находили себе определенного места в таблице, даже если располагать их по возрастанию атомного веса, а сами атомные веса иногда «бунтовали», нарушая строгую периодичность, в которую верил великий русский ученый. Он не дожил до открытия атомного ядра, когда появилась новая идея – искать закон *строгой* периодичности изменения свойств элементов в зависимости от заряда ядра атома. Увы, и эта идея до конца не прошла, но попытки ее осуществления привели к тектоническим сдвигам в физике и химии. Однако обо всем по порядку.

В первой четверти XX века появилась теоретическая схема, которая претендовала на правильное обоснование периодического закона и исправление таблицы, созданной Д.И. Менделеевым. Главную роль в этом сыграл Нильс Бор, вдохновленный пионерскими исследованиями структуры атома, выполненными под руководством Эрнста Резерфорда. Но первая попытка обосновать периодический закон на основе теории атома была предпринята Джоном

Джозефом Томсоном. Его модель атома⁹ (1904), хотя и оказалась в целом неверной, позволила сформулировать представления, которые были использованы в дальнейшем разработчиками планетарной модели.

Томсон принимал подход лорда Кельвина, согласно которому устойчивость атома, состоящего из отдельных одноименно заряженных частиц, может быть обеспечена, если частицы, отталкиваясь друг от друга, одновременно притягиваются к некоему центру силой специальной конструкции (чтобы не вступила в свои права теорема Ирншоу). По Томсону, такой силой может быть сила притяжения к центру равномерно заряженного (положительно) шара, действующая на отрицательно заряженные электроны, находящиеся внутри него. Она пропорциональна расстоянию от электрона до центра. Томсон как открыватель электронов знал, что эти частицы есть в каждом атоме. Нейтральность атома означает, что положительный заряд шара по величине равен суммарному заряду электронов. Электроны могут совершать гармонические колебания около положений равновесия, излучая при этом электромагнитные волны. Какова природа положительного заряда, неизвестно, хотя, вероятнее всего, с ним связана почти вся масса атома. Но модель готова, и она оказалась вполне рабочей.

Во-первых, атом получился устойчивым. «Положительное электричество притягивает корpusкулы к центру сферы, между тем как взаимное отталкивание стремится удалить их от этого центра; в случае равновесия корpusкулы расположатся таким образом, что притяжение, обусловленное положительным зарядом, уравнивается отталкиванием прочих корpusкул» [3. С. 98]. Если в атоме один электрон, он расположится в центре шара, если два, то они улягутся на прямую, проходящую через его центр, на расстоянии друг от друга, равном его радиусу. Три электрона разместятся в вершинах равностороннего треугольника со стороной, равной радиусу, причем центр треугольника совпадает с центром шара. Четыре электрона устойчиво расположатся в вершинах тетраэдра, имеющего общий центр с шаром. И т.д.

Во-вторых, модель атома позволила Томсону объяснить соединение атомов в молекулу. Он вычислил энергии взаимодействия устойчивых конфигураций зарядов в атомах с различным количеством электронов (от одного до шести, далее оказалось слишком сложно) и показал, что двум атомам энергетически выгодно объединиться в одну молекулу.

В-третьих, модель Томсона позволила нащупать качественное объяснение линейчатым спектрам атомов и, в-четвертых, привела к первому теоретическому истолкованию периодического закона Менделеева. И то и другое возникло из разделения электронов атома по кольцам.

Будучи не в силах решить математическую задачу нахождения устойчивого равновесия в атоме большого количества электронов, Томсон упрощает модель – заставляет все электроны расположиться в одной плоскости. После этого выяснилось, что начиная с шести устойчивость достигается только в

⁹ Её часто для популярности называют моделью кекса или пудинга.

том случае, если электроны распределяются по отдельным группировкам. «Кольцо из шести корпускул в вершинах правильного шестиугольника само по себе неустойчиво, но оно становится устойчивым, если в центре шестиугольника поместить еще одну корпускулу... Чтобы сделать устойчивым кольцо из девяти корпускул, внутри него придется поместить две корпускулы; вообще, число корпускул, которые нужно поместить внутри кольца для сохранения его устойчивости, растет весьма быстро с увеличением числа корпускул в кольце» [3. С. 102]. С увеличением числа электронов растет количество колец, причем следующая конфигурация колец формируется тогда, когда предыдущая уже реализовалась. Томсон, найдя способ расчета числа электронов в кольцах и расположив атомы в определенной последовательности, обнаружил периодическую закономерность. «Если мы рассмотрим... числа корпускул в различных группировках, то заметим, что числа, которые помещены в одном и том же вертикальном столбце, образуют последовательно группы, имеющие много общего одна с другой; именно, каждая такая группа получается из ближайшей верхней путем присоединения к ней сверху одного нового числа. ...Естественно предположить, что свойства атомов, составленных из таких корпускулярных групп, имеют много... общих свойств как химических, так и физических» [3. С. 107].

Строя свою теорию атома, Томсон ни на секунду не сомневается в основах классической физики. Он даже ссылается на эксперименты с макротелами с целью проиллюстрировать процессы, происходящие в атоме.

Нильс Бор подчеркивал, что идеи Томсона даже после отказа от его модели атома продолжали играть важную роль в теоретическом осмыслении периодического закона, но уже на базе планетарной модели. И у Томсона, и у Бора периодичность изменения свойств химических элементов с ростом числа электронов в атоме обусловлена периодическим повторением определенных электронных конфигураций.

Однако сама планетарная модель родилась в муках. Важнейший экспериментальный материал для нее был собран уже в 1908 году. Гейгер и Марсден сосчитали по указанию Резерфорд сотни тысяч сцинтилляций и самые «удачливые» альфа-частицы уже отскочили назад от металлической фольги, но Резерфорд пребывал в глубоком раздумье: концы с концами не сходились. Он уже понимал, что «отражение» одной из восьми тысяч альфа-частиц – это результат единичного столкновения, а не многократных небольших отклонений от прямолинейной траектории¹⁰. Ему уже было ясно, что в центре атома находится массивное положительно заряженное ядро. Но заставить электроны двигаться вокруг ядра Резерфорд никак не соглашался. Ведь это означало войти в противоречие с электродинамикой Максвелла: излучая электромагнитные волны, электроны должны упасть на ядро. Выходит, планетарный атом не может существовать!

¹⁰ Позднее (в 1914 году) это было напрямую подтверждено в камере Вильсона.

В 1911 году в Брюсселе состоялся первый Сольвеевский конгресс, на котором Резерфорд просто молчал, понимая, насколько нелепой должна казаться сама идея планетарного атома. Председательствующий на конгрессе Лоренц говорил, что «модель атома, предложенная сэром Дж.Дж. Томсоном, ...имеет преимущества, которых нельзя не признать». Но он даже не упомянул резерфордовскую идею об атомном ядре, словно бы и не было в «Philosophical magazine» за полгода до конгресса никакой статьи о принципиально новой модели атома. И никто не упомянул: ни Мария Кюри, ни Эйнштейн, ни Планк, ни Пуанкаре... А Зоммерфельд вообще не желал иметь дело ни с какими «частными моделями атомов». В то время, пожалуй, только в Москве в «подвале Лебедева» всерьез шел разговор о результатах, полученных Резерфордом.

Перелом наступил в 1913 году. Сначала Бор склонил Резерфорда к признанию, что в атоме не работает в полной мере классическая физика, а затем сам мэтр начал поддерживать молодого физика в его «разрушении основ». И здесь не обошлось без метафизики. По сути, главным аргументом Бора был философский. В самом деле, почему при движении электрона вокруг ядра по «стационарным» орбитам нарушаются законы классической электродинамики? Потому что, отвечает Бор, у всякого физического закона имеются границы применимости. В дальнейшем Бор будет сомневаться во всеобщей значимости даже закона сохранения энергии. Но откуда датский физик взял этот принцип? Из представления о том, что всякое знание о мире рождается только в опыте, иными словами, что не существует априорного знания. Однако суждение об источниках познания является философским. Таким образом, Бор выступает часто не столько как физик, сколько как философ позитивистского толка.

Главная «разлагающая» идея, которую проповедует Бор, касается вопроса о существовании прерывности в самих законах природы. Проблемы теоретического осмысления ядерной модели атома Бор связывает с кризисом парадигмы классической физики, законы которой сформулированы на языке непрерывности. «Выход из этих затруднений найден в представлениях, заимствованных из так называемой *теории квантов*. Основы этой теории заложены *Планком* в его знаменитых работах о законе теплового излучения. Эта теория решительно разрывает с прежними воззрениями: в ней впервые при формулировке законов природы вводится предположение о наличии прерывностей» [4. С. 77]. Однако одно дело прерывность в *законах* природы и совсем другое в характеристиках природных *объектов*. Да, фундаментальные законы классической физики формулируются на языке непрерывности. Но из этого не следует, что классическая физика отрицает физические объекты, состояние которых характеризуется прерывными величинами. Простой пример дает гитарная струна. Это, разумеется, совершенно классический объект. Но ее резонансные частоты дискретны. Струна поглощает и излучает звуковую энергию избирательно по частотам. Более впечатляющий пример – фигуры Хладни:

двумерные упругие пластины реагируют на внешнее периодическое воздействие прерывным образом. По мере увеличения частоты возбуждающей силы фигуры меняются скачком, визуализируя различные режимы колебаний с разными энергиями. Возможны и трехмерные объекты со своими собственными частотами колебаний. Почему бы и атому не быть такой системой, что естественно привело бы к линейчатым спектрам излучения и поглощения? Но Бор направил физику по другому пути (приведшему к принципу Паули, уравнению Шредингера и к вероятностной интерпретации волновой функции), став одним из «отцов» квантовой механики, которая совместила противоположности волны и частицы ценой отказа от классических принципов наглядности, причинности и локальности. В итоге Ричард Фейнман заявил, что «квантовую механику никто не понимает».

Теория периодической системы элементов, построенная Бором, не могла бы появиться, если бы в конце 1913 года не состоялось открытие, позволившее снять многие вопросы, на которые у Менделеева не было ответов. Ученик Резерфорда Генри Мозли (1887–1915), изучая характеристическое рентгеновское излучение различных элементов, сумел внести ясность в запутанную проблему их размещения в периодической таблице. Мозли опытным путем установил линейную зависимость между корнем из частоты определенной линии рентгеновского спектра и последовательностью элементов в таблице Менделеева от кальция до цинка. Он показал, что в этом ряду элементов наблюдается последовательное изменение на единицу заряда ядра атома, а значит, химические и физические свойства атомов находятся в периодической зависимости от заряда атомного ядра.

Исследование Мозли показали правильность размещения в периодической системе тех элементов, которые по их атомным весам стояли не на своих местах¹¹. Так, кобальт (59,9) был поставлен Менделеевым перед никелем (58,7), а теллур (127,6) – перед йодом (126,9). Данные по атомным весам Os, Ir, Pt и Au были исправлены.

Работы Мозли со всей определенностью установили, что между водородом и гелием новых элементов быть не может и что общее их число между Ва и Та равно 16, но неясным было их расположение в системе.

Вот тут Бор и сказал свое веское слово. Согласно его теории, в периоде (на рисунке это вертикальные столбцы [4. С. 132]) содержится 2, 8, 18 или 32 элемента, что соответствует формуле $2n^2$, где n – так называемое главное квантовое число. А далее всё по Менделееву, только период начинается не с инертного газа (им он заканчивается), а с щелочного металла (или с водорода в первом периоде). Свободы маневра нет: вся таблица сразу выстраивается аж до 118-го элемента, который в 1921 году еще не был открыт, но про него уже «точно» было известно, что он должен быть инертным газом. Красиво, ничего

¹¹ В дальнейшем, когда были открыты изотопы, проблема несовпадения расположения элементов по атомным весам и по заряду ядра была снята.

не скажешь! Но вспомним завет Больцмана: «Оставим изящество портным и сапожникам!»¹²

1 H	3 Li	11 Na	19 K	37 Rb	55 Cs	87 —
2 He	4 Be	12 Mg	20 Ca	38 Sr	56 Ba	88 Ra
	5 B	13 Al	21 Sc	39 Y	57 La	89 Ac
	6 C	14 Si	22 Ti	40 Zr	58 Ce	90 Th
	7 N	15 P	23 V	41 Nb	59 Pr	91 Pd
	8 O	16 S	24 Cr	42 Mo	60 Nd	92 U
	9 F	17 Cl	25 Mn	43 —	61 —	
	10 Ne	18 Ar	26 Fe	44 Ru	62 Sm	
			27 Co	45 Rh	63 Eu	
			28 Ni	46 Pd	64 Gd	
			29 Cu	47 Ag	65 Tb	
			30 Zn	48 Cd	66 Dy	
			31 Ga	49 In	67 Ho	
			32 Ge	50 Sn	68 Er	
			33 As	51 Sb	69 Tm	
			34 Se	52 Te	70 Yb	
			35 Br	53 I	71 Lu	
			36 Kr	54 Xe	72 —	
					73 Ta	
					74 W	
					75 —	
					76 Os	
					77 Ir	
					78 Pt	
					79 Au	
					80 Hg	
					81 Tl	
					82 Pb	
					83 Bi	
					84 Po	
					85 —	
					86 Rn	118 —

Рис. 2

Пытаясь подвести теоретический фундамент под таблицу Менделеева, физики ввели еще три квантовых числа, а также новые «правила игры» (принцип Паули, правило Хунда, правило Маделунга–Клечковского).

Нас арифметикой банальной не мучай.
Над нами лишь Клечковский господин.
А он сказал, что $3 + 2$ получше,
Чем, например, $4 + 1$.

В.М. Клечковский вывел правило Маделунга, у которого оно носило характер *ad hoc*, из статистической модели атома Томаса–Ферми. Однако оно давало сбой для лантана, актиния и тория. Д. Хартри указывал, что сама «модель Томаса–Ферми является приближением и для внешних оболочек атомов даже с большим числом электронов это приближение, по-видимому, не будет давать хороших результатов» [6. С. 200]. Таким образом, строгой теории периодического закона не получилось, так как для этого требовалось бы решить квантово-механическую задачу многих тел, что практически невыполнимо.

¹² Заметим по ходу дела, что сам завет Больцмана очень изящен.

«Поэтому приходится пользоваться эмпирическими данными, в частности химическими и в особенности данными спектроскопии об ионизационных потенциалах атомов. Это придает теории периодической системы полуэмпирический, описательный характер. Лучше было бы говорить не о теории, а об объяснении периодической системы» [7. С. 291].

Систематизация химических элементов по структуре ядра

Если химические и некоторые физические свойства элемента детерминируются его электронной оболочкой, структура которой зависит только от заряда атомного ядра, то, казалось бы, между свойствами элемента и структурой самого ядра нет никакой связи, так как ядро во много раз меньше атома. В самом деле, структура электронной оболочки атома зависит от количества электронов в ней, которое, в свою очередь, равно заряду ядра, выраженному в единицах элементарного заряда. В популярном примере, дающем наглядное представление о соотношении размеров ядра и атома, ядро сопоставляется с яблоком, а атом – со стадионом. Вот и спрашивается, могут ли свойства стадиона зависеть от сорта яблока, лежащего в его центральном круге? Однако вполне естественно предположить, что заряд ядра и его структура как-то связаны между собой. А значит, если заряд ядра определяет структуру электронной оболочки (как это принято в современных учебниках), то между структурой ядра и свойствами элемента существует связь. Но, возможно, дело обстоит обратным образом: заряд ядра (а точнее – количество протонов) определяет его структуру, а структура, в свою очередь, формирует электронную конфигурацию. Именно так считает автор фундаментального научного труда «Нуклиды. набросок феноменологического описания» Ю.В. Буртаев. Правда, каким образом структура маленького ядра влияет на огромную электронную периферию атома, пока не совсем ясно.

Юрий Васильевич, занимаясь исследованиями в области физики частиц и ядра, изначально не ставил перед собой задачи построить таблицу химических элементов. Его интересовали фундаментальные частицы и нуклиды. Выяснив, как устроены протон и нейтрон, он перешел к построению моделей составленных из них нуклидов, начав с простейшего составного ядра – дейтрона. И вот построенные таким образом нуклиды стали последовательно укладываться друг за другом в клетки таблицы Менделеева! Правда, были и существенные отклонения от известного ее варианта. Собственно, в них-то всё дело, ведь автору «Нуклидов» удалось по-новому ответить на вопрос о природе периодичности свойств элементов.

Согласно Буртаеву, *свойства элементов периодически повторяются с увеличением заряда ядра, потому что повторяются особенности структуры самих ядер*. Однако строгой повторяемости структуры нуклидов нет, а поэтому не существует и однозначной повторяемости свойств. Вот почему Менделееву для ряда элементов трудно было найти определенное место в таблице, а его гомологи не во всем были похожи.

Автору «Нуклидов» удалось преодолеть «магию» строгого закона, которая преследовала Менделеева, Бора, Клеchkовского и др. Строгого закона периодического изменения свойств элементов нет, есть *тенденция*. Однако для большинства элементов можно указать совершенно определенное место в таблице или, по крайней мере, те места, где их точно не должно быть. Так, 118-й элемент (оганесон), по Буртаеву, не является инертным газом, как считал Бор, потому что структура его ядра совершенно не похожа на структуру ядер благородных газов. А вот элемент под номером 112 (коперниций) им является. И это ломает нынешнюю структуру периодической таблицы.

«Нуклиды» Буртаева дают ответ на многие вопросы. Вот несколько примеров.

- Почему в природе нет устойчивых ядер с массовыми числами 5 и 8?
- Почему у олова ($Z = 50$) максимальное количество устойчивых изотопов, а именно 10? Причем для всех этих изотопов $12 < D < 24$, где $D = N - Z$. Почему?
- Почему только у олова три устойчивых изотопа с нечетным числом нуклонов? Это число является максимальным. Почему?
- Почему у ксенона ($Z = 54$) имеется 9 устойчивых изотопов? Причем для них $16 < D < 28$. Почему?
- Почему теллур ($Z = 52$) и кадмий ($Z = 48$) имеют по 8 устойчивых изотопов?
- Почему у технеция ($Z = 43$) и прометия ($Z = 61$) вообще нет устойчивых изотопов? (Они у Буртаева оказались гомологами!).
- Почему существует лишь четыре нечетно-нечетных устойчивых нуклида (дейтрон, литий-6, бор-10, азот-14)?
- Почему между висмутом ($Z = 83$) и торием ($Z = 90$) нет не только устойчивых, но и долгоживущих радиоактивных нуклидов?
- Почему деление ядер урана, плутония, калифорния медленными нейтронами асимметрично, а быстрыми симметрично?

«Асимметрия продуктов деления наблюдается независимо от того, происходит ли это деление под действием поглощенного нейтрона, протона, гамма-фотона или деление является спонтанным. Асимметрия деления связывается с оболочечной структурой ядра, хотя *последовательная теория этого явления отсутствует*» [8. С. 306].

Можно задать аналогичные вопросы Птолемею.

- Почему Меркурий не отходит от Солнца больше чем на 28 градусов?
- Почему Венера не отходит от Солнца больше чем на 48 градусов?
- Почему остальные планеты могут находиться на любом угловом расстоянии от Солнца?
- Почему, когда наблюдается попятное движение Марса, Юпитера и Сатурна, планета и Солнце находятся на противоположных сторонах от Земли?
- Почему эпициклы планет сначала увеличиваются (Меркурий, Венера, Марс), а затем уменьшаются (Юпитер, Сатурн)?

Ответ Коперника. Теория Птолемея в принципе не может ответить на подобные вопросы, потому что она не имеет правильного представления о структуре системы «Солнце–Луна–планеты».

Ответ Буртаева. Современная ядерная физика в принципе не может ответить на подобные вопросы, потому что она не имеет правильного представления о структуре атомных ядер.

С развитием ядерной физики было предложено несколько моделей строения нуклидов, но ни одна из них не могла претендовать на описание всех ядерных явлений. Например, капельная модель не может объяснить асимметрию массового распределения осколков деления ядер, ядерные магнитные моменты, существование «магических» ядер (с числами протонов и нейтронов 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126). А оболочечная модель не справляется с объяснением энергии связи ядер, квадрупольных электрических моментов тяжелых ядер, реакций деления урана и трансурановых ядер.

Как изображают ядро атома в современных учебниках? Это какой-то шар из «каши» протонов и нейтронов, причем принцип неопределенности требует, чтобы нуклоны двигались в ядре с большими скоростями. Согласно теории Буртаева, нуклоны располагаются в ядре в соответствии с законами их взаимодействия, но протон с протоном, равно как и нейтрон с нейтроном, не могут притягиваться друг к другу. Это обусловлено тем, что нуклоны, по Буртаеву, обладают киральностью: протон – правой, а нейтрон – левой. Два протона (и два нейтрона) просто не могут соединиться, потому что они обладают одинаковой киральностью. По Буртаеву, протоны удерживаются в ядре благодаря нейтронам, и ядер, состоящих из одних протонов или из одних нейтронов, существовать не может. И в энергию связи ядра вклад вносят в основном нейтроны, а не протоны.

Согласно модели Буртаева (она же FGH-модель), любой нуклид, кроме самых легких, строится из трех составных частей по определённым закономерностям. Первая часть – *остов* (обозначается F от *англ.* Frame) состоит из альфа-частичных образований (кластеров), которых существует всего 5 видов. Простейший из них – *гел* – это ядро атома гелия (α -частица). Следующий – *тригел* состоит из α -частицы, к которой с четырех сторон «прикручено» по дейтрону (ядру дейтерия). Таким образом, тригел состоит из 6 протонов и 6 нейтронов, то есть как бы из трех α -частиц. Затем следует *пентагел*, состоящий из α -частицы, к которой с четырех сторон «прикручено» по α -частице. Пентагел состоит из пяти α -частиц. Далее идет *нонагел* – кластер, состоящий из пентагела, к которому с четырех сторон «прикручено» по α -частице. Нонагел состоит из девяти α -частиц. И последний – *чедегел*, состоящий из наонагела, к которому с четырех сторон «прикручено» по α -частице. Чедегел состоит из 13 (чертовой дюжины – отсюда и название) α -частиц. Более тяжелые кластеры природа не создает: если к чедегелу присоединить еще четыре α -частицы, то получившийся кластер просто развалится. Ниже представлены условные изображения всех пяти

кластеров¹³, которые Буртаев обозначает также как α , κ , χ , ξ и ζ соответственно ($\alpha = 1\alpha$, $\kappa = 3\alpha$, $\chi = 5\alpha$, $\xi = 9\alpha$, $\zeta = 13\alpha$).

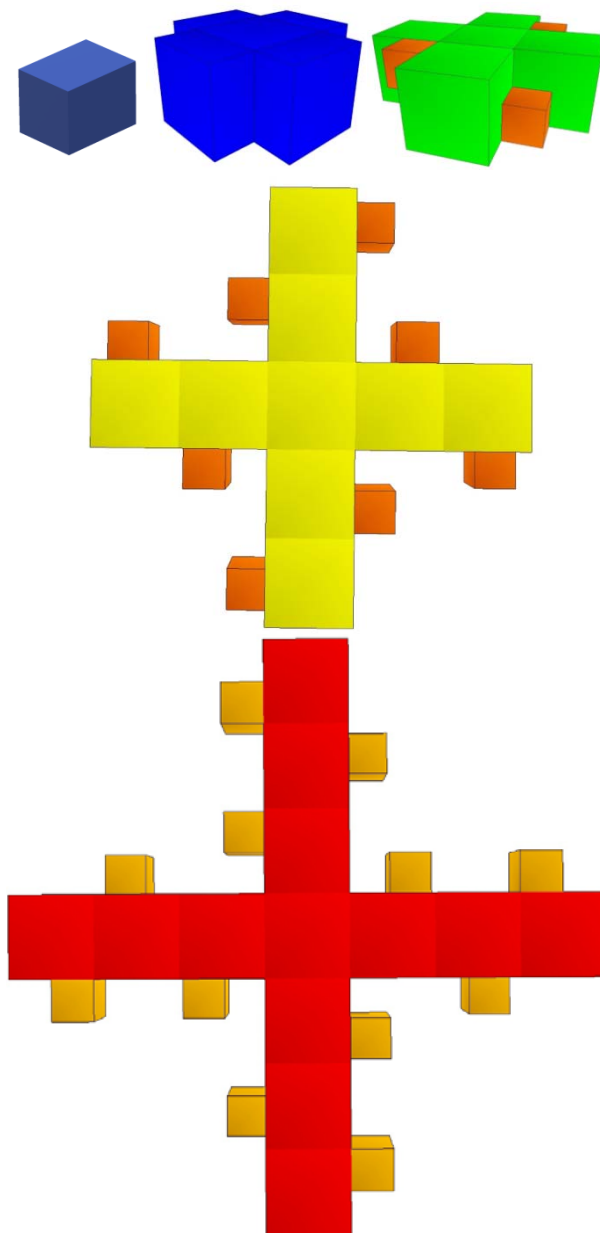


Рис. 3

Очевидно, что кластеры имеют выделенную в пространстве ось симметрии, перпендикулярную плоскости, в которой происходит пристраивание к центральному α -кластеру других α -кластеров или дейтронов (как в случае с тригелом).

¹³ Помимо самих кластеров на рисунке видна и нейтронная упаковка (оранжевые кубики – это нейтроны).

Вторая составная часть не очень легких нуклидов – *нейтронный пояс* (обозначается *Got* *англ.* Girdle) или *нейтронная упаковка*. Поясом могут обладать χ -, ξ - и ζ -кластеры, количество нейтронов в которых для наиболее устойчивых нуклидов составляет 4, 8 и 12 соответственно.

Третьей составной частью нуклида может быть *шапка* (обозначается *Nat* *англ.* Nat). Имеется пять видов шапок: *n*, *p*, *np*, *pnp* и *prp*, где *n* и *p* – обозначения нейтрона и протона.

Таким образом, любой нуклид с определенным количеством нуклонов раскладывается по составным частям FGH-модели. При этом соблюдаются простые правила, настолько простые, что даже школьники могут это делать¹⁴.

Автор четырехтомных «Нуклидов» представил структуру ядер всех элементов таблицы Менделеева, известных на конец 1990-х годов. Кроме того, он предсказал, какими свойствами должны обладать еще не открытые элементы. В частности, 118-й элемент никак не мог быть инертным газом. По Буртаеву, в столбце благородных газов под радоном должен стоять 112-й элемент.

И вот в 2006 году российским физиком Ю.Ц. Оганесяном были проведены опыты над 112-м элементом (коперницием), который, согласно современной концепции таблицы Менделеева, расположен в одной группе с ртутью. Однако опыты Оганесяна выявили несоответствие химических свойств коперниция с химическими свойствами ртути, выявив схожесть свойств коперниция со свойствами элементов группы инертных газов.

В своем эксперименте Оганесян пропускал через криогенную камеру с золотыми детекторами, которая была предварительно поделена на зоны с разными температурами, атомы радона, ртути и коперниция в потоке гелия. Ожидалось, что коперниций, как и ртуть, прореагирует с золотом при достаточно высоких температурах (ртуть образует амальгаму при 160 °C). Это было бы доказательством его гомологии с ртутью. Однако коперниций не только не прореагировал с детекторами, но и «дошел» практически до конца камеры, аналогично радону. Также Оганесян заметил, что температуры сублимации ртути и коперниция сильно разнятся (у ртути 386 °C, у коперниция 84±110 °C). Дальше – больше. Следующая пара «гомологов» – флеровий и свинец – имеют разницу в температурах сублимации более чем 3000 °C.

На основе своих экспериментов Оганесян задается поистине волнующим вопросом: «*Будет ли 118-й элемент инертным газом? Потому что если нет, то это означает конец периодичности таблицы Менделеева*».

Посмотрим теперь на структуру ядер интересующих нас элементов по Буртаеву.

¹⁴ См. журнал «Классическая физика и теория познания» № 1 и № 5 (статьи А. Пешковой и А. Раровского, Ф. Сабурова).

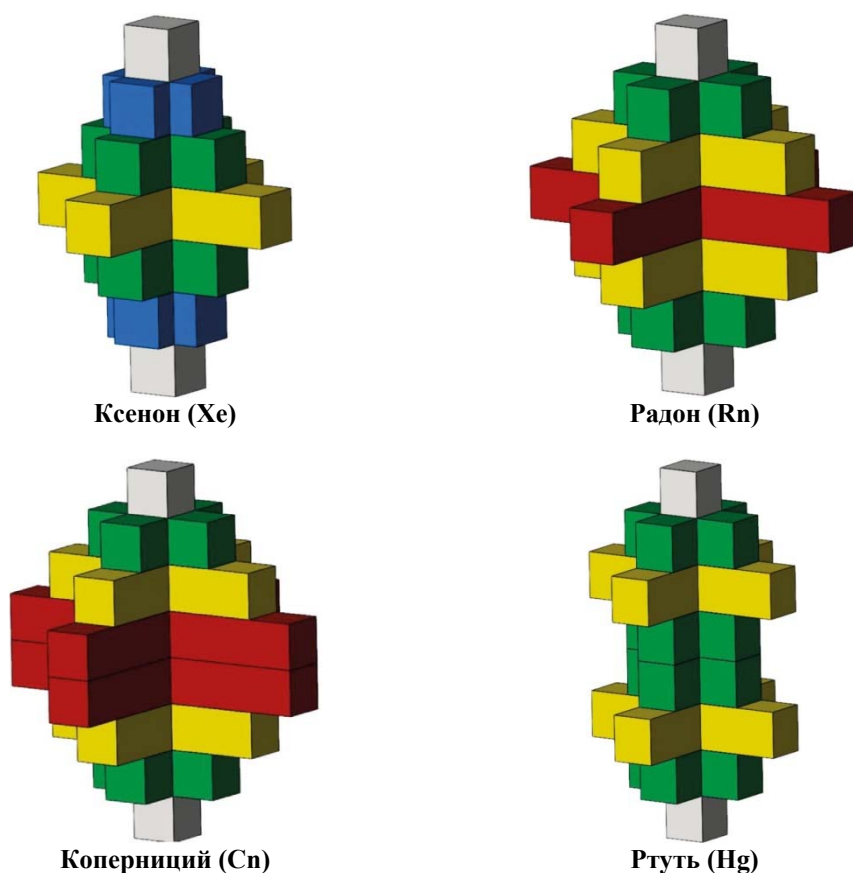


Рис. 4

Мы видим, что нуклид коперниция имеет структуру, характерную для инертных газов. Сравнив ее со структурой нуклида ртути, можно усомниться, что ртуть и коперниций – гомологи, как это утверждает современная таблица элементов. Хотелось бы отдать должное научной честности Ю.Ц. Оганесяна, который не поддался «магии» Бора и не «заставил» коперниций все-таки, не смотря ни на что, провзаимодействовать с золотом.

Если коперниций – гомолог инертных газов, то хассий (108-й элемент) должен быть гомологом свинца и олова. В этом можно убедиться, сравнив структуры их остовов.

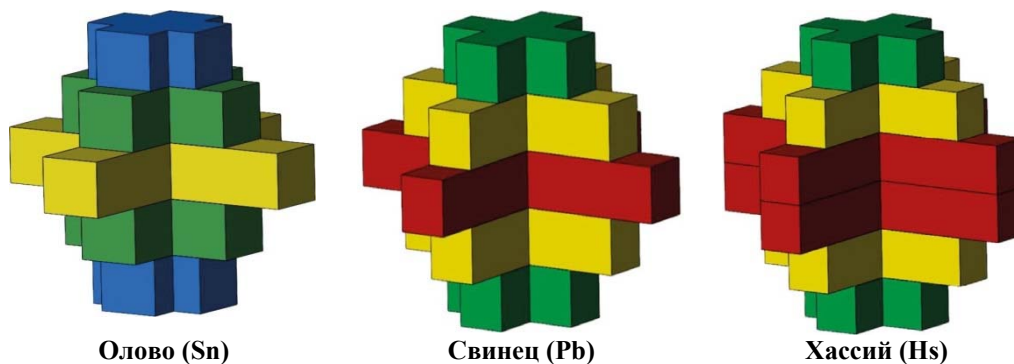


Рис. 5

В заключение посмотрим на таблицу Менделеева–Буртаева.

Элементы, расположенные по вертикали в цветных клетках, имеют сходные черты структуры остова. Каждая ассоциация (Θ , Ξ и Δ) имеет свой вид остова. В столбцах Σ , Υ и Ψ расположены переходные элементы (переход происходит от одного вида остова к другому). Нет никаких помещенных в одну клетку лантаноидов и актиноидов, у которых не такие уж и одинаковые свойства. А элементы, расположенные в белых клетках, вообще трудно причислить к какой-либо ассоциации. Нет строгого повторения свойств по мере возрастания порядкового номера элемента. Есть тенденция!

Θ -ассоциация					Σ	Ξ -ассоциация					Υ	Δ	Δ -ассоциация					Ψ
Θ	I	II	III	IV		Ξ	I	II	III	IV								
Mg 12									Be 4		B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10	Li 3	Na 11
Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18	K 19	Rb 37
Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54	Cs 55	
Ba 56	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63					Δ -ассоциация						
Gd 64	Tb 65					Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Eb 70	Lu 71							
Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75			Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86	Fr 87	
Ra 88	Ac 89	Th 90	Pa 91			U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97							
Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101			No 102	Lr 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	
Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117			Og 118												

Рис. 6

Литература

1. Менделеев Д.И. Периодический закон. М.: АСТ, 2018.
2. Менделеев Д. Основы химии. 8-е издание. С.-Пб., 1906.
3. Томсон Дж.Дж. Корпускулярная теория вещества. MATHESIS, 1910.
4. Бор Нильс. Три статьи о спектрах и строении атомов / пер. с нем. С.И. Вавилова. Москва-Петроград: Госиздат, 1923.
5. Альтишулер С.В., Кривомазов А.Н., Мельников В.П. и др. Открытие химических элементов: Специфика и методы открытия. М.: Просвещение, 1980.
6. Хартри Д. Расчет атомных структур. М.: Изд. иностр. лит-ры, 1960.
7. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика: в 2 ч. Ч. 1: Атомная физика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1986.
8. Колтаков П.Е. Основы ядерной физики. М.: Просвещение, 1969.
9. Буртаев Ю.В. Нуклиды. набросок феноменологического описания: в 4 ч. Ч. 1: Легкие нуклиды с $Z \leq 21$. М., 1997.
10. Буртаев Ю.В. Нуклиды. набросок феноменологического описания: в 4 ч. Ч. 2: Систематика структур и параметров нуклидов с $Z \leq 21$. М., 1999.

11. Буртаев Ю.В. Нуклиды. набросок феноменологического описания: в 4 ч. Ч. 3: Средние нуклиды с $21 \leq Z \leq 56$. М., 1997.
12. Буртаев Ю.В. Нуклиды. набросок феноменологического описания: в 4 ч. Ч. 4: Тяжелые нуклиды с $Z \geq 56$. М., 1998.

THE PERIODIC SYSTEM OF CHEMICAL ELEMENTS: HISTORY AND MODERNITY

A.Yu. Gryaznov

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation*

Abstract. Three approaches to the problem of systematization of chemical elements are considered: by atomic weight (Mendeleev), by the structure of the electron shell (Thomson, Bohr) and by the structure of the nucleus (Burtayev). The difficulties of the first two approaches are discussed, and ways of their solution are indicated on the basis of the concepts of the structure of atomic nuclei developed by Yu.V. Burtayev.

Keywords: periodic table, periodic law, system of elements, structure of atomic nuclei, nuclear physics, clusters, atomic model.