

И. В. Петрянов
Д. Н. Трифонов



Великий закон





ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ ТРИФОНОВ — советский химик, занимается историей этой науки, доктор химических наук.

Д. Н. Трифонов родился в 1932 г. Закончил химический факультет Московского университета. В настоящее время работает в Институте истории естествознания и техники Академии наук СССР.

Основные научные труды Д. Н. Трифопова посвящены теории и истории периодической системы элементов. Им написано несколько книг. Некоторые из них изданы за рубежом.

В течение многих лет Д. Н. Трифонов занимается популяризацией науки. Он автор 10 научно-популярных книг и нескольких десятков статей.

ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ ПЕТРЯНОВ — видный советский ученый, физикохимик, академик АН СССР. И. В. Петрянов родился в 1907 г., окончил Московский университет в 1931 г. Более 50 лет работает в Физико-химическом институте им. Л. Я. Карпова, профессор Московского химико-технологического института им. Д. И. Менделеева. Один из немногих исследователей, развивающих новую, очень важную область науки — учение об аэрозолях. И. В. Петрянов — Герой Социалистического Труда, награжден тремя орденами Ленина, лауреат Ленинской и Государственной премий СССР.

И. В. Петрянов — активный общественный деятель, борец за охрану природной среды, за чистоту атмосферы нашей планеты.

**И. В. Петрянов,
Д. Н. Трифонов**

Библиотечка
Детской энциклопедии



Великий закон

Редакционная
коллегия:
И. В. Петрянов
(главный редактор),
И. Л. Кнунянц,
А. Л. Нарочницкий



Москва
«Педагогика», 1984

ББК 24г
ПЗ0

Рецензент
академик АН СССР Б. М. Кедров

Петрянов И. В., Трифонов Д. Н.

ПЗ0 Великий закон. — 2-изд. — М.: Педагогика, 1984. — 128 с., ил. — (Б-чка Детской энциклопедии «Ученые — школьнику»)

35 коп.

Периодический закон, открытый Д. И. Менделеевым, отмечен в истории науки как начало новой эры в развитии одной из ведущих современных наук — химии.

В книге рассказывается: как был открыт периодический закон, как была найдена разгадка периодичности, излагается суть периодического закона на современном уровне знаний.

1-е издание вышло в 1976 г. Настоящее издание посвящено 150-летию со дня рождения Д. И. Менделеева.

Для старшекласников.

П 4306000000-030 55-84
005(01)-84

ББК 24г
54(09)

© Издательство «Педагогика», 1984 г.

...Изложенное содержит далеко не все то, что увидели до сих пор через телескоп периодического закона в безграничной области химических эволюций, и тем паче не все то, что можно еще увидеть...

Д. И. Менделеев

Как был открыт Великий закон

В истории человеческих знаний немало подвигов. Но очень немногие из них можно сопоставить с тем, что было сделано Дмитрием Ивановичем Менделеевым. Величие научного подвига Менделеева не только не стирается временем, но продолжает расти. И никто не может сказать, будет ли когда-нибудь исчерпано до конца все содержание одного из величайших в науке обобщений — периодического закона Менделеева.

История строго и придирчиво отбирает и сортирует все, что найдено и создано человеком. Поражительная, ставшая привычной четкость таблицы Менделеева наших дней скрывает от нас гигантскую работу ученого по осознанию всего, что было известно до него о превращениях вещества, работу, благодаря которой стала осуществимой великая интуитивная догадка о существовании нового закона — закона периодичности свойств химических элементов.

Законы природы, открытые человеком, различны по объему познанного и по тому, в каких областях познания мира они действенны. Их трудно сравнивать между собой. Но законы сравнимы по самому главному — по возможности предсказания нового, предвидения неизвестного. Периодический закон в

этом отношении не имеет равных в истории науки. Менделеев указал путь направленного поиска в химии будущего. Многие ученые, основываясь на периодическом законе, предсказывали и описывали неизвестные химические элементы и их свойства.

История химии не знает подобного триумфа. Открыт новый закон природы. Вместо разрозненных, не связанных между собой веществ перед наукой встала единая стройная система, объединившая в одно целое все химические элементы. Но Менделеев поставил перед наукой еще более грандиозную задачу: объяснить взаимную связь между всеми элементами, между их физическими и химическими свойствами.

Закон Менделеева оказал огромное влияние на развитие знаний о строении атома, о природе вещества. В свою очередь, успехи атомной физики, появление новых методов исследования, развитие квантовой механики расширили и углубили сущность периодического закона и периодической системы элементов.

Открытие закона периодичности — величайшая веха в развитии химии. Историки науки часто выделяют два периода в этом развитии: до закона и после закона.

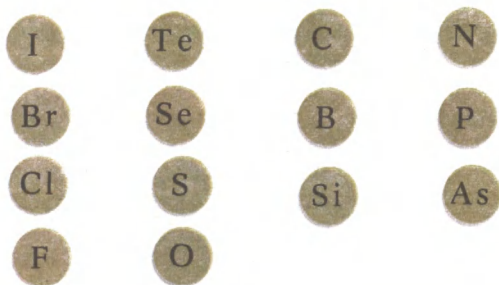
Что было накануне открытия? Было известно 63 химических элемента. Далеко не все свойства этих элементов были достаточно изучены, даже атомные веса некоторых были определены неправильно или неточно. Много это или мало — 63 элемента? Если вспомнить, что сейчас мы знаем 107 элементов, то, конечно, маловато. Но вполне достаточно, чтобы можно было подметить закономерность изменения их свойств. При 30 или 40 известных химических элементах едва ли бы удалось что-либо открыть. Нужен был определенный минимум открытых элемен-

тов. Вот почему мы вправе охарактеризовать менделеевское открытие как своевременное.

Но разве до Менделеева не пытались ученые подчинить все известные элементы определенному порядку, классифицировать их, свести в систему?

Многие пытались. Сказать, что их попытки были бесполезными, нельзя: какие-то крупницы истины они содержали. Например, в 1829 г. немецкий химик И. Дёберейнер сгруппировал элементы со сходными химическими свойствами по тройкам: литий, натрий, калий; хлор, бром, йод и т. д. Он назвал эти группы триадами. Позже совокупности таких элементов стали именовать естественными группами.

В 1849 г. классификацией элементов заинтересовался видный русский химик Г. И. Гесс. В учебнике «Основания чистой химии» он описывал четыре группы элементов-неметаллов с похожими химическими свойствами:



Гесс писал: «Эта классификация еще очень далека от того, чтобы быть естественной, но она все-таки соединяет элементы и группы весьма сходные, и с расширением наших сведений она может усовершенствоваться».

Одну из попыток классификации сделал в 1862 г. француз А. Бегье де Шанкуртуа. Систему элементов

он представлял в виде спиральной линии на поверхности цилиндра. На каждой витке по 16 элементов. Сходные элементы располагались друг под другом на образующей цилиндра. Но никто из ученых не обратил внимания на работу де Шанкуртуа.

Английский химик А. Ньюлендс в 1866 г. предложил так называемый закон октав. Он считал, что все в мире подчиняется общей гармонии. И в химии и в музыке она должна быть единой. Поэтому свойства химических элементов, расположенных по возрастанию атомного веса, должны повторяться через каждые семь элементов, так же как и в музыкальной гамме сходные ноты чередуются в октаве через каждые семь нот. По закону октав, однако, оказывались сходными такие совершенно различные элементы, как углерод и ртуть.

Когда Ньюлендс доложил о своей работе на заседании Лондонского химического общества, один из присутствующих не без сарказма спросил: не пробовал ли уважаемый докладчик расположить элементы в алфавитном порядке и не обнаружил ли он при этом какую-нибудь закономерность?

Ближе других к истине оказались, пожалуй, английский ученый В. Одлинг и немецкий — Л. Мейер. Так, в 1864 г. Мейер предложил таблицу, в которой все известные химические элементы были разбиты на шесть групп, согласно их валентности. По внешнему виду таблица Мейера была немного похожа на будущую менделеевскую. Но ни она, ни все другие предшествующие классификации не содержали главного: они не отражали общей, фундаментальной закономерности изменения свойств элементов. Они создавали лишь видимость порядка в их мире. Тот же недостаток был присущ и таблицам Одлинга.

Предшественники Менделеева, подметившие част-

ные проявления великой закономерности в мире химических элементов, по разным причинам не смогли подняться до великого обобщения и осознать существование в мире фундаментального закона.

Почему же именно Дмитрию Ивановичу Менделееву удалось открыть периодический закон? И как было сделано это открытие?

«Опыт системы элементов...». 17 февраля (ст. ст.) 1869 г., собираясь в дорогу, профессор Петербургского университета Дмитрий Иванович Менделеев на обороте письма, в котором его просили приехать и помочь производству, сделал первый набросок таблицы химических элементов. В этой таблице он расположил элементы в порядке возрастания их атомных весов и проследил периодическую повторяемость их свойств.

В тот день Менделеев отложил свою поездку. Он написал на отдельных карточках все известные тогда элементы с их важнейшими химическими и физическими свойствами. Располагая эти карточки в различном порядке, сообразуясь с атомными весами элементов, с их свойствами и со свойствами их соединений, Менделеев составил первый вариант системы химических элементов. Он назвал его «Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве». 1 марта 1869 г. Менделеев разослал многим русским и иностранным ученым отпечатанный в виде таблички «Опыт системы...»

Первая таблица еще очень несовершенна, она далека от современного вида периодической системы. Но эта таблица оказалась первой графической иллюстрацией открытой Менделеевым закономерности: «Элементы, расположенные по величинам их атомного веса, представляют явственную периодичность свойств». Эти слова взяты из статьи Менделеева «Соотношение свойств с атомным весом элементов».

Она явилась итогом размышлений Менделеева в ходе работы над «Опытом системы...».

Менделеев в этой статье ни разу прямо не употребляет термин «периодический закон». Как всякий великий ученый, он был скромен и осторожен в конечных выводах. То, что он действительно открыл фундаментальный закон природы, ему было ясно с самого начала. Но чтобы обнаруженная закономерность могла называться законом и была признана другими учеными как закон, для этого, чувствовал Менделеев, надо было еще много работать. И два с половиной года — вплоть до декабря 1871 г. — он занимался разработкой своего открытия.

Первое сообщение об открытии было сделано 6 марта 1869 г. на заседании Русского химического общества. Менделеева на этом заседании не было. Вместо отсутствовавшего автора его доклад прочитал химик Н. А. Меншуткин. В протоколах Русского химического общества появилась сухая запись о собрании 6 марта 1869 г.: «Н. Меншуткин сообщает от имени Д. Менделеева «Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве». За отсутствием Д. Менделеева обсуждение этого вопроса отложено до следующего заседания».

Этот сухой канцелярский протокол стал историческим документом огромной важности, свидетельством о первом знакомстве человечества с новым законом природы. Но многие ученые, современники Менделеева, впервые услышавшие и узнавшие об этой системе элементов, не смогли ее сразу понять.

В чем заключался решающий шаг? Менделеев видел три обстоятельства, которые, по его мнению, способствовали открытию периодического закона: во-первых, были более или менее точно определены величины атомных весов большинства известных химических элементов;

во-вторых, появилось четкое понятие о группах сходных по химическим свойствам элементов (естественных группах);

в-третьих, к 1869 г. была изучена химия многих редких элементов, без знания которой трудно было бы прийти к какому-либо обобщению.

Наконец, решающий шаг к открытию закона заключался в том, что Менделеев сопоставил между собой все элементы по величине атомных весов. Предшественники же Менделеева сравнивали элементы, сходные между собой, т. е. элементы естественных групп. Эти группы оказывались не связанными. Менделеев логично объединил их в структуре своей таблицы.

Как же был открыт периодический закон? Иногда среди историков науки вспыхивает спор: что раньше родилось в сознании Менделеева — периодический закон или периодическая система элементов?

По нашему мнению, этот спор беспредметен. Система элементов — это закономерность, выраженная в виде таблицы. Но чтобы уловить смысл закона, нужно было прежде всего свести все известные химические элементы в определенную систему, т. е. в таблицу. Поэтому никак нельзя разрывать систему и закон.

Вот как сам Менделеев охарактеризовал течение творческого процесса, который представляет собой открытие периодического закона: «...неволью зародилась мысль о том, что между массой и химическими свойствами необходимо должна быть связь. А так как масса вещества, хотя и не абсолютная, а лишь относительная, выражается окончательно в виде весов атомов, то надо искать функциональное соответствие между индивидуальными свойствами элементов и их атомными весами. Искать же что-либо, хотя бы грибы или какую-нибудь зави-

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

		Ti=50	Zr= 90	?=180.
		V=51	Nb= 94	Ta=182.
		Cr=52	Mo= 96	W=186.
		Mn=55	Rh=104.	Pt=197,4.
		Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.
	Ni=Co=59	Pt=106,4	Os=199.	
	Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.	
H=1	Be= 9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112
	B=11	Al=27,4	?=68	U=116
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118
	N=14	P=31	As=75	Sb=122
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?
	F=19	Cl=35,4	Br=80	I=127
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133
		Ca=40	Sr=87,4	Ba=137
		?=45	Ce=92	Pb=207.
		?Er=56	La=94	
		?Yt=60	Di=95	
		?In=75,4	Th=118?	

Д. Менделѣевъ.

«Первые мысли о периодичности,— писал Д. И. Менделеев,— вложены мною в листок, который 1 марта 1869 г. был послан мною многим ученым». Это самая первая таблица периодической системы элементов. Замечательно то, что в ней уже были оставлены и отмечены знаком вопроса пустые места.

написав на карточках символы элементов, их атомные веса и важнейшие (коренные) свойства, расположить их по порядку. Как именно? Самый очевидный способ — расположить все элементы в ряд по возрастанию атомных весов, начиная с самого легкого — водорода. Подметить же закономерность в изменении свойств правильно расположенных элементов, должно быть, не так уж трудно. Ведь эти свойства во времена Менделеева были более или менее хорошо известны.

В чем же заслуга Менделеева? Давайте условимся на некоторое время забыть все, что вам уже известно

о химии, все, что вы успели узнать в школе о периодической системе, вообразим, что вы перенеслись в середину XIX в. и можете знать только то, что знали современники Менделеева. Попробуем проникнуть в творческую лабораторию ученого, разобраться в том, как его мысль постепенно подходила к открытию,— дело чрезвычайно трудное, а иногда и вовсе не возможное. Нам, однако, повезло: на помощь пришел сам Менделеев, рассказавший, что он начал с комбинирования карточек. Вот мы и попробуем шаг за шагом пройти по пути, которым шел великий ученый. Не ручаемся за точность картины, но дело обстояло примерно так...

Посмотрим, в какой последовательности располагались элементы по величине их атомных весов.

Наименьший атомный вес у водорода (H), он равен 1. Следующий по порядку был в то время литий (Li). Его атомный вес около 7. А вот какой элемент должен быть следующим — на сей счет единого мнения не существовало. Дело в том, что точно не была известна формула окиси бериллия. Одни ученые считали, что она записывается как BeO , другие — как Be_2O_3 . Но в первом случае атомный вес бериллия должен был равняться (округленно) 9, а во втором — 14. Поэтому место элемента в ряду оказывалось неопределенным. Если оставить пока Be в покое, то дальнейшее расположение элементов должно быть таким:

B(11) C(12) N(14) O(16) F(19) Na(23) Mg(24) Al(27)
Si(28) P(31) S(32) Cl(35)

Атомные веса здесь округлены до целых чисел.

А как расположил Менделеев свои карточки с элементами? Конечно, на первой карточке у Менделеева также было написано название, атомный вес и свойства водорода.

Вторую карточку с атомным весом и свойствами металла лития он поместил под карточкой водорода. На третье место рядом с литием Менделеев положил карточку, на которой было написано: Be(9), а не Be(14).

И это был смелый шаг, потому что из нескольких значений атомных весов бериллия Менделеев выбрал одно, вполне определенное. Почему он сделал именно так? Да потому, что он принял во внимание особенности химических свойств бериллия: они представляли плавный переход от свойств лития к свойствам бора.

Карточку бора Менделеев поместил на четвертое место. Пятое место занял углерод. На шестом месте — азот, далее следовали кислород и фтор. Девятая карточка, принадлежащая металлу натрию, была помещена под второй, на которой были написаны химические характеристики металла лития.

По порядку следующее место занял магний, за ним — алюминий. Под углеродом оказался кремний, под кислородом — сера, под фтором — хлор.

Вот так Менделеев расположил свои карточки с названиями и свойствами элементов в начале своей таблицы:

<div>Н 1</div>						
<div>Li 7</div>	<div>Be 9</div>	<div>B 11</div>	<div>C 12</div>	<div>N 14</div>	<div>O 16</div>	<div>F 19</div>
<div>Na 23</div>	<div>Mg 24</div>	<div>Al 27</div>	<div>Si 28</div>	<div>P 31</div>	<div>S 32</div>	<div>Cl 35</div>

Итак, в вертикальных рядах оказались химически сходные элементы. Металл литий похож на металл натрий: оба мягкие, легкие, режутся ножом, бурно реагируют с водой, образуя щелочи. Берил-

лий и магний схожи друг с другом. У фтора много общего с хлором — они образуют с металлами очень похожие соединения. И каждый химик знает, что свойства кислорода и серы сходны между собой.

При таком расположении совершенно четко проявилась периодичность свойств у элементов. В двух первых коротких периодах менделеевской таблицы правильно чередуются элементы с аналогичными свойствами.

Как же все-таки эти периоды были построены Менделеевым?

Пожалуй, он был не совсем прав, когда утверждал, что расположил элементы по их атомному весу.

Если бы ученый действительно расположил их по возрастанию тех атомных весов, которые были известны науке в то время, то никакого периодического закона обнаружить было бы невозможно даже в первых рядах таблицы. Скорее наоборот, Менделеев установил на основании периодического закона правильный атомный вес бериллия.

Позднейшие исследования подтвердили это предсказание.

Если исходить из атомных весов, известных в середине XIX в., то продолжение ряда элементов, идущих за хлором, надо было бы построить так:

K 39	Ca 40	V 51	Cr 52	Ti 52	Mn 55	Fe 56	Co 59
Ni 59	Cu 63	Zn 65	As 75	Se 78	Br 80		

Тайна пустого места. Но, продолжая построение своей таблицы, Менделеев разместил карточки совсем не так. Под карточкой натрия была помещена карточка с очень похожим на натрий калием, и калий

стал началом нового ряда. Под магнием оказался сходный с ним кальций.

Следующим в порядке возрастания атомного веса должен был бы идти ванадий, но его карточка пока отложена в сторону, а вместо нее рядом с кальцием Менделеев кладет пустую (!) карточку. С точки зрения химика того времени это непонятный и ничем не оправданный поступок.

Можно было ждать, что вслед за пустой карточкой будет положена карточка ванадия. Но вместо ванадия на следующем месте оказывается титан, у которого Менделеев осмеливается, не проводя сам никаких исследований, вопреки всему, что известно о титане всем химикам во всем мире, изменить его атомный вес с 52 на 48 (!). После чего, наконец, за титаном следует карточка ванадия, и только за ней идут карточки хрома и марганца.

Как же все-таки располагал свои карточки Менделеев? Ведь и в этом ряду таблицы он разместил элементы вопреки возрастанию известных в то время атомных весов.

Прежде чем поместить карточку титана в таблицу, Менделеев, по существу, предсказал истинное значение его атомного веса, так же как это он сделал для бериллия.

Этот период в таблице Менделеева длинный. За марганцем идут железо (Fe)—56, кобальт (Co)—59, никель (Ni)—59, далее медь (Cu)—63, цинк (Zn)—65. Но вслед за цинком ученый снова оставил в своей таблице подряд два пустых места.

Далее следовали карточки с хорошо известными элементами — мышьяком, селеном и бромом, завершающим длинный период. При этом карточки мышьяка, селена и брома оказались лежащими под карточками сходных с ними элементов конца предыдущего короткого периода, т. е. элементов фосфора, серы и хлора.

H 1									
Li 7	Be 9	B 11	C 12	N 14	O 16	F 19			
Na 23	Mg 24	Al 27	Si 28	P 31	S 32	Cl 35			
K 39	Ca 40	?	Ti 48	V 51	Cr 52	Mn 55	Fe 56	Co 59	Ni 59
Cu 63	Zn 65	?	?	As 75	Se 78	Br 80			

Из того, что мы разобрали, совершенно очевидно, что все обстояло далеко не так просто, как рассказывал об этом сам Менделеев. Одних только фактов, которые были известны химикам до Менделеева, как бы их ни комбинировать, было недостаточно, чтобы открыть один из величайших законов природы — периодический закон.

Если расположить элементы, известные к 1869 г., по возрастанию значений их атомных весов, не исправляя, казалось бы произвольно, атомных весов у отдельных элементов и не оставляя пустых мест, то обнаружить существование периодической закономерности было бы очень трудно.

Нужно было не только знать накопленный в течение многих веков химический опыт. Нужно было обладать тонкой интуицией, а также научной смелостью, чтобы, осознав периодическую закономерность, исправлять старое и предсказывать новое.

Великое предсказание. Что же означают пустые места в таблице Менделеева?

Может быть, это пробелы в природе, и потому химики не нашли элементы для пустых клеток таб-

лицы? Или это пробелы в человеческом знании о природе? Существует ли, например, в природе элемент, атомный вес которого больше, чем у кальция, и меньше, чем у титана, и в то же время похожий химическими свойствами на бор и алюминий?

У Менделеева сомнений не было. Каждое место в таблице соответствует определенному химическому элементу, который должен обязательно существовать.

Места, на которых были расположены карточки с названиями элементов, клетки в периодической таблице, где вписаны символы элементов и их атомные веса, для ученого были полны глубочайшего содержания: они определяли природу каждого элемента, его физические и химические свойства и свойства его соединений.

В 1871 г. в журнале Русского химического общества появилась большая статья Менделеева. Она называлась «Естественная система элементов и применение ее к указанию свойств неоткрытых элементов». Вряд ли в мировой научной литературе когда-либо была опубликована статья, похожая на эту! В ней Менделеев описал три никем и никогда в мире не виданных химических элемента, причем описал так обстоятельно, как не смог бы это сделать иной исследователь, державший в руках их соединения и посвятивший долгие годы изучению их в лаборатории.

«Решаюсь сделать это ради того, чтобы хотя со временем, когда будет открыто одно из этих предсказываемых мною тел, иметь возможность окончательно увериться самому и уверить других химиков в справедливости тех предложений, которые лежат в основании предполагаемой мною системы», — писал в этой статье Менделеев.

Каким же путем периодический закон дает возможность описывать неведомое? Каким образом

	II	III	IV	V
2	Be 9	B 11	C 12	N 14
3	Mg 24	Al 27	Si 28	P 31
4	Ca 40	?	Ti 48	V 51
	Zn 65	?	?	As 75
	Sr 88	Y 89	Zr 91	Nb 94
5	Cd 112	In 114	Sn 119	Sb 120

место в таблице определяет свойства элемента? Лучше всего это можно понять, если попытаться, по примеру Менделеева, сравнить свойства элемента пустой клетки со свойствами его соседей. Выделим из таблицы ту часть, которая включает пустые места и окружающие их элементы.

Пустая клетка между кальцием и титаном находится в начале четвертого периода.

А две пустые клетки, расположенные рядом между цинком (Zn) и мышьяком (As), находятся в конце этого периода.

Гипотетический (предполагаемый) элемент, который должен был занимать первое пустое место, Менделеев назвал **экабором**. В таблице он следует за кальцием. Тот элемент, который должен занять пустое место около цинка, Менделеев назвал **экаалюминием**, а соседний с ним — **экасилицием**.

Пустое место экабора находится между кальцием (атомный вес 40) и титаном (атомный вес 48). Следовательно, атомный вес экабора должен быть близким к среднему значению:

$$\frac{40 + 48}{2} = 44.$$

С кислородом он должен давать окись, аналогичную по формуле окисям бора и алюминия: X_2O_3 . Экабор должен быть легким металлом: ведь он стоит между двумя легкими металлами — кальцием и титаном. Относительная плотность соседей экабора по ряду позволяет определить и его относительную плотность. Для кальция она равна 1,5, для титана — 4,5. Поэтому относительная плотность экабора должна быть приблизительно равна:

$$\frac{1,5 + 4,5}{2} = 3,0.$$

У экабора должны быть бесцветные соли, потому что соседи образуют бесцветные соединения. Металл не летуч, так как не летучи его соседи. Основные свойства его будут слабыми, поскольку основные свойства окиси титана слабы. Вот таким путем и можно предсказать химические свойства нового, никому не известного и никем не виданного элемента.

Попробуем описать и еще один элемент, пустое место которого находится рядом с цинком, — экаалюминий.

Между цинком и мышьяком Менделеев оставил два пустых места. Атомный вес мышьяка — 75, цинка — 65. Нетрудно сообразить, что экаалюминий должен обладать атомным весом около 70. Он помещается в третьем столбце рядом с металлом цинком; в этом столбце находится алюминий — тоже металл; и экаалюминий должен быть на него похожим. Значит, экаалюминий будет тоже металлом.

Плотность его мы определили бы по известной плотности ближайших соседей, учитывая лишь, что рядом с экаалюминием есть еще одно пустое место — экасилиций. Относительная плотность экаалюминия должна быть близка к 6,0.

Соединения алюминия с хлором обладают при высокой температуре летучестью, и хлористое сое-

динение экаалюминия должно быть также летучим.

Вот какими словами Менделеев заканчивает описание свойств экаалюминия: «Можно надеяться, что он будет открыт спектральным исследованием, подобно тому как открыты следующие за ним индий и таллий...»

Таким образом, Д. И. Менделеев не только описал неведомое, но и предсказал, как оно будет познано.

Краткая хроника важнейших событий после открытия Великого закона. Вот как развивались события в течение двух с половиной лет после открытия закона.

В сентябре 1869 г. Д. И. Менделеев показал, что атомные объемы простых веществ находятся в периодической зависимости от атомных весов, а в октябре обнаружил такую же зависимость для высшей валентности элементов в солеобразующих окислах.

Летом 1870 г. Менделеев счел необходимым изменить неправильно определенные атомные веса индия, церия, иттрия, тория и урана и в связи с этим изменил размещение этих элементов в системе. Так, уран оказался самым последним элементом в естественном ряду, самым тяжелым по величине атомного веса.

11 декабря Менделеев закончил статью «Естественная система элементов и применение ее к указанию свойств неоткрытых элементов». Он впервые назвал свою систему естественной и впервые же употребил понятие «закон периодичности». В апреле 1871 г. Менделеев впервые назвал систему периодической: «...было бы правильнее назвать мою систему периодической, потому что она вытекает из периодического закона...». В июле 1871 г. Менделеев завершил работу над своей главной статьей, посвященной Великому закону. Она называлась

Эта таблица была помещена Менделеевым в одном из первых изданий его учебника «Основы химии» (1871). В ней еще очень много пустых мест. Еще не открыты галлий, скандий и германий; отсутствует нулевая группа.

[illegible]

«Периодическая законность химических элементов». Спустя много лет Менделеев так охарактеризовал ее: «Это лучший свод моих взглядов и соображений о периодичности элементов...».

Здесь Менделеев впервые привел каноническую формулировку периодического закона, просуществовавшую до его физического обоснования: «Свойства элементов, а потому и свойства образуемых ими простых и сложных тел, стоят в периодической зависимости от их атомного веса».

Как оправдались предсказания Менделеева. Не прошло и шести лет, как весь мир облетело известие: в 1875 г. молодой французский ученый-спектроскопист П. Лекок де Буабодран выделил из минерала, добытого в Пиренейских горах, новый элемент. Буабодрана навела на след слабая фиолетовая линия в спектре минерала, которую нельзя было приписать ни одному из известных химических элементов. В честь своей родины, которая в древности называлась Галлией, Буабодран назвал новый элемент галлием. Галлий — очень редкий металл, и Буабодрану стоило большого труда добыть его в количестве немногим больше булавочной головки. Но Буабодран оказался большим искусником. Он ухитрился с этой крупинкой проделать много интересных опытов и подробно описал плотность галлия, температуру плавления, соединение с кислородом, и даже соли.

Каково же было удивление Буабодрана, когда через Парижскую академию наук он получил письмо с русской маркой, в котором сообщалось: в описании свойств галлия все верно, за исключением плотности: галлий тяжелее воды не в 4,7 раза, как утверждал Буабодран, а в 5,9 раза.

Неужели кто-то другой открыл галлий раньше? Буабодран заново определил плотность галлия, под-

вергнув металл более тщательной очистке. И оказалось, что он ошибся, а автор письма — это был, конечно, Менделеев, который и не видел галлия,— прав: относительная плотность галлия не 4,7 а 5,9.

Еще через четыре года, в 1879 г. шведский химик Л. Нильсон нашел новый элемент в редком минерале гадолините. Его называли скандием. Когда же были изучены его свойства, стало совершенно очевидно, что это не что иное, как давно известный, по предсказаниям Менделеева, экабор.

А через 16 лет после предсказания Менделеева немецкий химик К. Винклер открыл новый элемент (1886) и назвал его германием.

На этот раз Менделееву не пришлось самому указывать, что и этот вновь открытый элемент был им предсказан ранее. Винклер отметил, что германий полностью соответствует экасилицию Менделеева. Винклер писал в своей работе: «Едва ли можно найти иное более поразительное доказательство справедливости учения о периодичности, как во вновь открытом элементе. Это не просто подтверждение смелой теории, здесь мы видим очевидное расширение химического кругозора, мощный шаг в области познания».

Винклер не искал германия по приметам, опубликованным Менделеевым. Он наткнулся на него случайно. Получалось так, что еще не открытые химические элементы как бы взяты на учет: их столько, сколько пустующих клеток в периодической таблице Менделеева. Приметы каждого из них более или менее известны, и даже можно предсказать заранее, в каких минералах нужно их искать, какими химическими способами следует извлекать эти элементы из минералов, в которых они скрываются.

Существование в природе более десяти новых, не известных никому элементов предсказал сам Менделеев. Для десятка элементов он предсказал правиль-

ные атомные веса. Все последующие поиски новых элементов в природе велись исследователями при помощи периодического закона и периодической системы. Они не только помогали ученым в поисках истины, но и способствовали исправлению ошибок и заблуждений в науке.

Трудный путь периодического закона

Блестяще оправдались предсказания Менделеева — открыты три новых элемента: галлий, скандий, германий. Разрешилась долго мучившая ученых загадка бериллия. Атомный вес его был наконец точно определен, и место элемента рядом с литием подтвердилось раз и навсегда. К 90-м годам XIX в., по словам Менделеева, «периодическая законность упрочилась». В учебники по химии в разных странах уже без сомнений стали включать менделеевскую периодическую систему.

Великое открытие получило всеобщее признание.

Но слишком много загадок, слишком много непонятого и неясного хранила в себе система элементов. словно химический сфинкс, задавала она ученым вопрос за вопросом, ответов на которые не было.

Сколько всего элементов должна содержать периодическая система? Существуют ли элементы легче водорода и тяжелее урана, элементы между водородом и литием? Почему все еще зияют пробелы, соответствующие некоторым предсказанным Менделеевым элементам? Или взять таинственную область редких земель, расположившуюся в середине таблицы: сколько их? Каждый год провозглашались открытия нескольких новых редкоземельных элементов, а спустя короткое время выяснялось, что исследователи попросту ошибались.

Видите, сколько вопросительных знаков ставила перед учеными периодическая система!

А ответов не было.

Не было потому, что оставалось неясным главное: в чем состоит глубокая физическая причина периодического изменения свойств элементов? Этого не знал никто. Существовали лишь смутные догадки, что свойства элементов могут быть связаны с устройством их атомов. Но как устроены атомы — этого также никто не знал.

Да и атомный вес — эта, казалось бы, незыблемая опора периодического закона — иногда давал осечку. Скажем, атомный вес теллура был больше атомного веса иода. Но по своей химической природе теллур должен был стоять перед иодом, иначе грубо нарушалась гармония системы. Такая же аномалия наблюдалась и в паре кобальт — никель. А почему это так — опять же объяснения отсутствовали.

Судьбы великих открытий порой бывают очень трудными. На их пути встречаются испытания, которые иногда даже ставят под сомнение истинность открытия.

Так было и с периодической системой элементов.

Серьезное испытание периодической системы. Оно было связано с неожиданным открытием совокупности газообразных химических элементов, получивших название инертных, или благородных газов.

Первым из них является гелий. Почти все справочники и энциклопедии датируют открытие гелия 1868 г. и связывают это событие с именами французского астронома Ж. Жансена и английского астрофизика Н. Локьера. Иногда добавляют, что в честь открытия гелия была отчеканена специальная медаль. Но, как показали исследования историков, все это не совсем соответствует действительности.

Жансен присутствовал при полном солнечном затмении в Индии в августе 1868 г. И его главная заслуга состоит в том, что ему удалось наблюдать

солнечные протуберанцы после того, как затмение кончилось. Раньше их наблюдали только во время затмения. Локьер также наблюдал протуберанцы, не выезжая с Британских островов, в середине октября того же года. Оба ученых послали описания своих наблюдений в Парижскую академию наук. Но так как Лондон гораздо ближе от Парижа, чем Калькутта, то письма почти одновременно пришли к адресату 26 октября. Ни о каком новом элементе, якобы присутствовавшем на Солнце, в этих письмах не было ни слова. Пресловутая же медаль была выбита в честь изобретения нового метода наблюдения протуберанцев — этих гигантских выбросов солнечной материи.

Ученые стали детально изучать спектры протуберанцев. И скоро появились сообщения, что в них содержится линия, которая не может относиться к спектру какого-либо из существующих на Земле элементов. В январе 1869 г. итальянский астроном А. Секки обозначил ее как D_3 . В такой записи она и вошла в историю науки как спектральная «метрика» об открытии гелия. Название «гелий» (от греческого слова «гелиос» — «солнечный») предложил английский химик Э. Франкланд. Публично о новом солнечном элементе 3 августа 1871 г. рассказал на годичном собрании британских ученых физик В. Томсон (лорд Кельвин).

Такова действительная история обнаружения гелия на Солнце. Долгое время он оставался гипотетическим элементом. Никто не мог сказать, что представляет из себя этот элемент, какие у него свойства. Некоторые ученые вообще отвергали существование гелия, считая, что линия D_3 принадлежит обычному элементу, но находящемуся в условиях высоких температур.

На Земле гелий был найден лишь в 1895 г. В начале 90-х гг. видный английский физик Дж. Рэлей

H 1	He 4	Li 7
F 19	20 ?	Na 23
Cl 35,5	Ar 38	K 39
Br 80	82 ?	Rb 85
I 127	128 ?	Cs 133

Diagram illustrating the periodic table with noble gases (Ne, Ar, Kr, Xe) shown in circles and other elements in squares. Arrows point from the noble gases to the adjacent elements, indicating the discovery of new elements in those positions.

Так были предсказаны Рамзаем на основании периодической системы благородные газы. По существу, это было сделано совершенно так же, как Менделеев предсказал галлий, германий и скандий. Все пустые места вскоре заняли вновь открытые элементы: неон, криптон и ксенон. Атомные веса на карточках приближенные.

подметил непонятный факт: плотность чистого азота, добытого из воздуха, больше плотности азота, полученного химическим путем из любого азотсодержащего соединения. Разница была невелика — тысячные доли грамма, но она не зависела от изменения условий эксперимента. Рэлей обратился к своему другу — химику В. Рамзаю: быть может, совместными усилиями удастся разгадать загадку? Ученые пользовались разными методами исследования, но пришли к одному выводу: в каждом литре воздуха содержится примерно 10 см^3 примеси. 29 апреля 1894 г. Рамзай писал: «Вполне вероятно, что в азоте содержится какой-либо инертный газ, который ускользнул от нашего внимания... Мы можем открыть новый элемент». Уже прозвучало слово «инертный», ибо примесь не вступала в химические реакции ни с одним из известных реактивов. Этому газу Рэлей и Рамзай дали название «аргон», происходящее от греческого слова «аргос» — «недеятельный». Его химические свойства были необычны прежде всего потому, что просто-напросто отсутствовали.

И многие ученые отказывались считать аргон новым элементом. Даже Менделеев полагал, что аргон имеет формулу N_3 , т. е. это аллотропическое видоизменение азота — N_2 (подобно тому как есть кислород — O_2 и озон — O_3). Кроме того, атомный вес аргона оказывался больше, чем у калия, и для «недейтельного» не находилось места в периодической системе.

Американский геолог и химик В. Гильдебранд сообщил В. Рамзаю 1 февраля 1895 г., что урановый минерал клевеит при нагревании выделяет химически неактивный газ. Его спектр похож на спектр азота, но содержит новые линии. Рамзай повторил опыты американского коллеги. Он собрал достаточное количество газа и 14 марта провел его спектральный анализ. В спектре светилась яркая линия, которая не содержалась в спектрах азота и аргона. У Рамзая мелькнуло подозрение, что он наткнулся на еще один неизвестный газ, которому поторопился дать название «криптон». Проверить свои выводы он попросил В. Крукса. 24 марта Рамзай получил от того телеграмму: «Криптон есть гелий. Приходите и посмотрите».

Так был открыт земной гелий. Вскоре его удалось обнаружить в составе атмосферного воздуха. Он также оказался инертным газом. Более легким, чем аргон. После проблемы размещения аргона в периодической системе появилась проблема размещения гелия. Еще острее стали споры. Зазвучали пессимистические выводы о несовершенстве периодической системы.

Открыватель инертных газов В. Рамзай (его поддерживали и другие ученые) считал реальным отыскать для инертных газов место в таблице, например выделить их в самостоятельную группу. Тем временем была усовершенствована машина для сжижения воздуха, и В. Рамзай со своим по-

мощником М. Траверсом занялся разделением атмосферного воздуха на фракции, надеясь обнаружить новые инертные газы. В 1897 г. Рамзай прочел доклад под названием «Неоткрытый газ». Позже он говорил: «По образцу нашего учителя Менделеева я описал, поскольку возможно было, ожидаемые и предполагаемые соотношения газообразного элемента, который должен был бы заполнить пробел между гелием и аргоном».

Этот пробел суждено было заполнить открытому в мае 1898 г. неону («новый»). Затем в короткий срок Рамзай и Траверс обнаружили в земной атмосфере еще два инертных газа: криптон («скрытый») и ксенон («чуждый»).

В марте 1900 г., при личной встрече, Д. И. Менделеев и В. Рамзай — люди, более других заинтересованные в решении вопроса, — согласились, что все инертные газы надо поместить в системе между галогенами и щелочными металлами, так, чтобы они образовали самостоятельную нулевую группу. А впервые вариант таблицы Менделеева с нулевой группой независимо опубликовал 5 марта 1900 г. бельгийский ученый Л. Эррера.

Открытие инертных газов — подлинный научный подвиг. Ведь они относятся к числу наиболее редких стабильных элементов, существующих на Земле. В. Рамзай в свое время отметил, что ксенона в воздухе меньше, чем золота в морской воде. В самом деле, один объем гелия приходится на 245 000 объемов атмосферного воздуха, неона — на 81 000 000, аргона — на 106, криптона — на 20 000 000 и ксенона — на 170 000 000. Больше всего аргона, и не мудрено, что он был открыт первым. А фактически первоначально открытый аргон представлял собой смесь всех инертных газов. (Добавим, что открытие инертных газов называют среди четырех великих открытий конца XIX в., при-

ведших к революции в естествознании, наряду с открытием электрона, рентгеновских лучей и радиоактивности.)

Маленькая, но важная интермедия. История науки знает немало курьезных и удивительных совпадений. Но это особенно любопытно: ровно через 27 лет после того, как Менделеев набросал «Опыт системы элементов...», день в день, 1 марта 1896 г. французский физик А. Беккерель открыл явление радиоактивности. Оно заключалось в испускании минералами урана невидимых лучей, способных проникать через непрозрачные тела и действовать на фотографические пластинки.

Вскоре оказалось, что свойством излучать обладает именно уран; затем такое же качество обнаружилось у тория. В изучение нового явления включилась большая группа исследователей. Среди них были французские ученые Мария и Пьер Кюри, английский ученый Эрнст Резерфорд. Их трудами были заложены основы учения о радиоактивности.

С тех пор два великих открытия XIX в. — периодический закон и радиоактивность — стали развиваться параллельно, часто соприкасаясь. И в местах их соприкосновения рождались удивительные гипотезы и открытия, которые оказали огромное влияние на познание человеком структуры и свойств вещества.

Еще одно испытание периодической системы. Все началось с того, что Мария Кюри обнаружила: некоторые урановые минералы обладают гораздо более сильной радиоактивностью, чем сам уран. Возникло подозрение, что эта активность принадлежит новым, неизвестным пока радиоактивным элементам. Супруги Кюри взялись за их поиски. Им удалось раздобыть несколько тонн отходов от переработки

урановой руды. Эту гору материала они перерабатывали несколько месяцев. Беспримерный, поистине героический труд принес блестящие плоды. В июле 1898 г. ученые объявили об открытии полония (названного так в честь родины Марии Кюри — Польши), а в декабре — радия (от латинского «радиус», т. е. «луч») — двух новых радиоактивных элементов. Годом позже сотрудник Кюри А. Дебьерн открыл актиний — еще одно новое радиоактивное вещество.

Мы не случайно употребили слово «вещество». Перечисленные выше открытия новых элементов были необычными. Когда, например, Лекок де Буабодран открыл галлий, то уже вскоре он располагал такими количествами его соединений, что их можно было взвесить на грубых весах.

Открытия полония, радия, актиния были сделаны косвенным путем. В результате долгих химических операций удавалось сконцентрировать вещество с высокой радиоактивностью. Измерив ее, делали вывод о том, что вроде бы обнаружено новое. Но было ли это вещество соединением одного радиоактивного элемента или нескольких, однозначного ответа дать было нельзя. Притом эти элементы содержались в исчезающе малых количествах.

Чтобы их изучать, химикам пришлось менять привычный образ действий. Научиться работать с такими количествами радиоактивных элементов, которые измерялись ничтожными долями миллиграмма, и судить о ходе химических операций, контролируя его посредством измерения интенсивности радиоактивных излучений. Так родилась новая наука радиохимия.

Лишь гениальная интуиция и исключительные способности экспериментаторов позволили супругам Кюри сделать предположение, что полоний должен быть аналогом теллура, а радий — аналогом

бария. Но чтобы это доказать, потребовалось несколько лет кропотливых и разносторонних исследований. Каких, например, трудов стоило правильно определить атомный вес радия! И для этих двух новых элементов Менделеевым были предусмотрены места в периодической таблице: радий занял место экабария, а полоний был предсказан под названием двителлура.

А вот актиний долгое время не находил себе определенного пристанища в таблице: таким коварным, таким капризным оказался этот элемент.

Но Менделеев, как вы уже знаете, оставил в конце шестого и начале седьмого периода системы элементов несколько пустых клеток: пять между висмутом и торием и одну между торием и ураном. Для трех новых радиоактивных элементов места вполне хватало.

Затем последовал неожиданный сюрприз: три радиоактивных вещества, притом газообразных. Если препараты, содержащие радий, торий или актиний, поместить в замкнутые сосуды, а затем, спустя некоторое время, откачать оттуда воздух, то радиоактивные незнакомцы удаляются вместе с ним. Их называли эманациями (от латинского «эманио» — истекать): эманация радия, эманация тория, эманация актиния. Потом их имена стали короче: радон, торон и актинон.

Что это: три новых самостоятельных радиоактивных элемента, подобно тому как различаются торий и уран, полоний и радий? И, собственно говоря, откуда они появляются, откуда истекают — три загадочные эманации?

Ответы на эти вопросы, которые нашли ученые, имели поистине историческое значение и для дальнейшей судьбы закона периодичности, и для всего последующего развития учения о радиоактивности.

Радон, торон и актинон нельзя было химическим

путем отделить друг от друга, т. е. они словно имели одно и то же лицо. Следовательно, в разные клетки периодической системы их поместить было бы едва ли верно, хотя, как выяснилось позднее, они различались по атомным весам. И доступные оценке и изучению свойства трех эманаций оказывались такими, что их можно было бы рассматривать как тяжелые аналоги инертных газов. Как «экаксеноны».

Итак, если радон, торон и актинон — химические элементы, то, во-первых, они химически инертны, а во-вторых, если попытаться разместить их в таблице Менделеева, то в ней находится только одна незаполненная клетка, предназначенная для самого тяжелого инертного газа.

И вот перед периодической системой появляются два трудных вопроса: 1) как объяснить, что элементы, различающиеся по атомным весам; совершенно неотличимы по свойствам и 2) если важнейший принцип системы — «каждому элементу свое место», то как быть, когда на одно место претендуют сразу три элемента?

И в первое десятилетие нашего века эти вопросы, с каждым годом становясь все острее, словно дамоклов меч висели над периодической системой Менделеева.

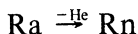
Проблема происхождения эманаций волновала не меньше. Создавалось впечатление, что они словно возникают из ничего.

Английские ученые Э. Резерфорд и Ф. Содди пришли к выводу, что радиоактивный распад сопровождается превращением химических элементов. Из одного элемента возникает другой. Следовательно, понятие об атоме как неделимой, неизменяемой частице материи рухнуло.

Ученые доказали, что радиоактивность — свойство атома. При распаде радиоактивный атом мог испускать два сорта лучей, представляющих поток

материальных частиц, обозначаемых греческими буквами α и β . Так вот, α -частицы — это положительные двухзарядные ионы гелия, а β -частицы — это не что иное, как электроны. Поскольку α -частицы имеют довольно большую массу (атомный вес гелия равен ≈ 4), то, теряя ее, радиоактивный атом уже не может оставаться самим собой. Он должен превратиться в атом более легкого элемента, с атомным весом на 4 единицы меньше.

Именно так возникали и эманации. Вот, например, процесс «рождения» радона:



На этой первой в истории изученной цепочке превращения элементов Резерфорд и Содди построили в 1902 г. теорию радиоактивного распада, основанную на гипотезе о превращении элементов. А спустя год Содди и Рамзай доказали присутствие гелия наряду с радоном над препаратом радия.

Так стало понятно, откуда берутся эманации. Смутно вырисовывалась догадка: все радиоактивные элементы каким-то образом связаны между собой. Были, правда, шаткие основания полагать, что могут существовать три независимых ряда радиоактивных превращений. Они начинаются соответственно ураном, актинием и торием и заканчиваются нерадиоактивным свинцом. Для более строгих выводов не хватало промежуточных веществ. Они, однако, не заставили себя долго ждать.

Десять, двадцать, тридцать новых радиоактивных веществ за считанные годы обнаружили ученые. Это был словно залп картечью по периодической системе, которая перед лицом грозных фактов представлялась не очень-то защищенной мишенью.

Их, этих «радиоэлементов» (мы взяли это слово в кавычки, ибо ученые терялись в догадках: подлинные ли это химические элементы или какая-то промежуточная форма материи), появлялось столь много, что было бессмысленно придумывать им специальные названия. Номенклатура здесь установилась иная. Были X-продукты: уран-X, торий-X; были радий-А, радий-В, радий-С; были радиоактиний и радиоторий. Удобство номенклатуры заключалось в том, что она позволяла сразу оценивать принадлежность того или иного «радиоэлемента» к определенному ряду радиоактивных превращений.

Постепенно все «радиоэлементы» находили место в том или ином радиоактивном семействе — ториевом, урановом или актиниевом. Эти семейства оказывались своеобразными систематиками «радиоэлементов».

Но как совместить эти семейства со структурой менделеевской периодической системы?

Уже несколько примеров полнейшей химической неразличимости «радиоэлементов» имели химики. Несколько совокупностей «радиоэлементов», заметно различавшихся по атомным весам, ничем не отличались по свойствам, кроме радиоактивных. Это была одна крайность. Другая состояла в том, что было немало случаев, когда «радиоэлементы» имели одинаковые атомные веса, но ничего общего в своих свойствах.

Эти две крайности нужно было либо как-то увязать с периодическим законом и периодической системой, либо... Либо признать, что «все эти факты пробили широкую брешь в принципе, который был положен Менделеевым в основание его системы», как сказал известный французский химик Ж. Урбэн. Либо принять, что «периодическая система, строго говоря, не вмещает всех известных элементов», как заметил другой, не менее известный немецкий химик В. Тильден.

Вот перед каким грозным испытанием оказалась периодическая система.

Посмотрим теперь, как она его выдержала.

Как же устроен атом? Когда в 1897 г. англичанин Дж. Томсон и немец Э. Вихерт независимо друг от друга открыли электрон, то ученые разных стран тут же поспешили использовать его для объяснения строения атома. Но вот какая вышла неувязка: ведь электроны несут отрицательный заряд, а атом в целом — незаряженная частица материи. В чем же состоит секрет, как устроен положительный «противовес» электронам?

Этот носитель положительного заряда оказывался слабым местом моделей атома, появившихся в первое десятилетие нашего века.

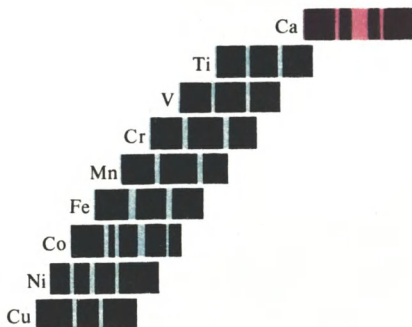
Тем временем Э. Резерфорд в своей лаборатории настойчиво изучал природу и поведение α -частиц. Он был первым, кто доказал: α -частица — это двухзарядный ион гелия.

Резерфорда чрезвычайно интересовало, как ведут себя α -частицы при столкновении с различными материалами, например с тонкими металлическими пластинками.

В феврале 1909 г. его ученики Г. Гейгер и Е. Марсден наблюдали удивительный факт. Они обстреливали α -частицами пластинки из золота. Большинство частиц вели себя так, как можно было предположить согласно теории: они рассеивались под определенными углами. Но некоторые отскакивали назад, словно ударяясь о массивное препятствие.

Гейгер и Марсден сочли это обстоятельство ошибкой наблюдения. Но чем больше они пытались ее устранить, тем увереннее приходили к выводу, что об ошибке здесь не может быть речи.

Резерфорд был удивлен не меньше своих учеников. Много лет спустя он вспоминал: «Это было,



Этот документ имеет для истории учения о периодичности тоже очень важное значение. На фотографии ясно видно, как закономерно смещаются линии рентгеновских спектров при переходе от одного элемента к следующему.

пожалуй, самым невероятным событием... в моей жизни. Это было почти столь же неправдоподобно, как если бы вы произвели выстрел по обрывку папиросной бумаги 15-дюймовым снарядом, а он вернулся бы назад и угодил в вас»

Если положительно заряженная α -частица, столкнувшись с «чем-то», отбрасывалась назад, как теннисный мячик, ударившийся о стенку, то это «что-то» должно было, во-первых, нести большой положительный заряд, а во-вторых, обладать большой массой, т. е. быть (и в этом состояла смелая догадка Резерфорда) не чем иным, как ядром атома.

Так родилась ядерная, или планетарная, модель атома: в центре его массивное, положительно заряженное ядро, а вокруг, как планеты вокруг Солнца, по орбитам движутся электроны. В мае 1911 г. Резерфорд опубликовал статью, в которой четко и аргументированно изложил свою идею.

Но чему численно равны заряды ядер атомов различных элементов? Эксперименты и расчеты показывали, что для легких элементов — примерно половине атомного веса. Для элементов же середины и конца периодической системы это соотношение не оправдывалось.

В 1913 г. мало кому известный голландский ученый А. ван ден Брук предположил: заряд ядра атома любого элемента численно равен порядковому номеру элемента в периодической системе.

Во всей истории периодического закона эта интуитивная догадка была одной из самых гениальных и одной из самых важных для последующего его развития. Она почти сразу же получила опытное доказательство. Это доказательство нашел молодой английский физик Г. Мозли, который в расцвете сил и таланта погиб во время первой мировой войны. В том же, 1913 г., изучая рентгеновские спектры элементов, Мозли показал, что длина волны характеристического рентгеновского излучения закономерно изменяется при переходе от одного элемента к последующему, т. е. зависит от порядкового номера элемента.

Измерив длину волны, можно было вычислить порядковый номер. И этот номер действительно оказался равным величине положительного заряда в ядре атома элемента.

А все эти открытия означали, что периодический закон уже на новом, более высоком уровне знаний получил физическое обоснование. По-иному зазвучала его формулировка: свойства элементов и их соединений находятся в периодической зависимости от величины зарядов ядер их атомов.

Не величины атомных весов, которые хотя и возрастали в целом при переходе от элемента к элементу, но возрастали, не повинаясь какой-либо четкой закономерности, а целочисленные значения зарядов ядер легли в фундамент закона периодичности. Целочисленные значения, изменяющиеся от элемента к элементу точно на единицу.

Следовательно, теперь можно было совершенно определенно сказать, что периодическая система, начиная от водорода (порядковый номер $Z=1$) и кон-

чая ураном ($Z=92$), должна была содержать 92 элемента. Не меньше и не больше. Следовательно, далее, ученые могли теперь с полной ясностью утверждать, какие же именно элементы еще не открыты.

Это элементы, порядковые номера которых равны 43 и 75 (аналоги марганца, которые предсказывал Менделеев), 61 (таинственный редкоземельный элемент, чье место между неодимом и самарием) и 72 (аналог циркония, существование которого также предвидел Менделеев).

Мы не сказали еще о трех элементах с порядковыми номерами 85, 87 и 91. Все они относятся к «радиоактивной области» периодической системы. А обсуждая эту область, мы остановились на том, что в ней накопились такие загадки, объяснить которые периодическая система оказывалась бессильной.

В самом деле, как примирить с ее структурой неожиданное изобилие «радиоэлементов»? Как разместить их в ограниченном количестве ее клеток? И наконец, что же такое сами «радиоэлементы»?

Закон радиоактивных смещений и изотопы. Вот что твердо знали ученые к 1913 г.

Все «радиоэлементы» группируются в три семейства: ториевое (родоначальник торий, атомные веса всех входящих в него радиоэлементов подчинены формуле $4n$), урановое (родоначальник — уран, формула атомных весов $4n+2$) и актиниевое (актиний, $4n+3$) — в этих формулах n — целое число. Конечно, были неувязки и сомнения в частностях, но в целом ученые твердо знали, что постепенное превращение радиоактивных элементов в стабильный свинец происходит в результате последовательных α - и β -превращений.

Знали ученые и другое: как изменяется химическая природа элемента, когда он претерпевает α - или β -распад.

Нужно внимательно проследить за путешествием потомков атома урана по периодической системе.

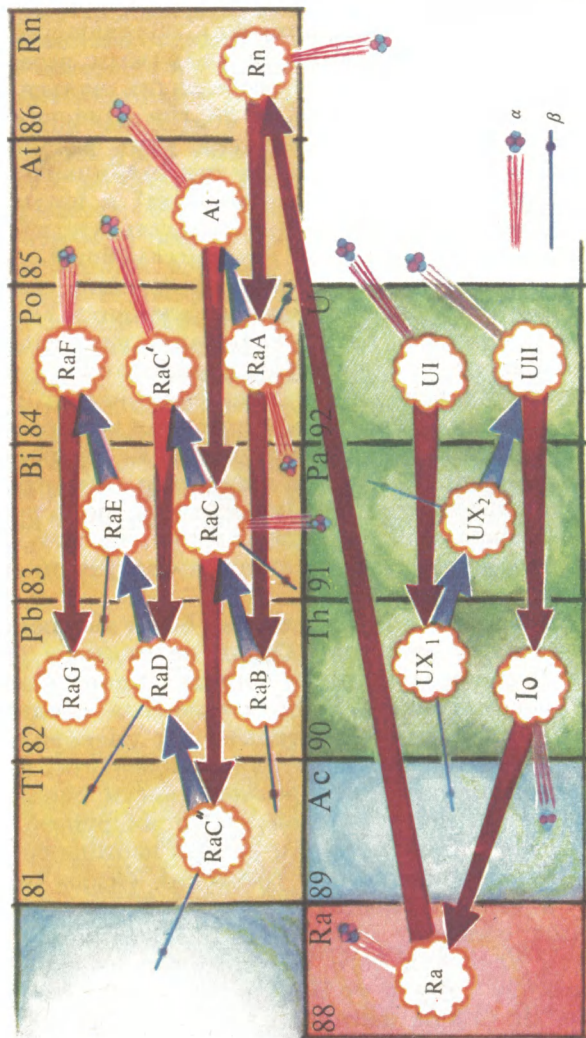
При каждом β -распаде у них меняется заряд, а при α -распаде — и масса. Что же определяет химические свойства получающегося ядра?

Теперь не пользуются устаревшими названиями (UI, UX₁ и т. п.). Принято называть изотопы просто по названиям элементов с добавлением массового числа. Вместо UI говорят ²³⁸U, вместо UX₁ — ²³⁴Th. Составьте сами таблицу изотопов, образующихся при распаде урана-238.

При α -распаде атом теряет два положительных заряда и четыре единицы массы. Еще в 1910 г. Содди сумел высказать предположение, что образующийся в результате α -распада элемент перемещается на две группы влево по периодической системе по отношению к исходному. Например, радий (вторая группа) превращается в радон (нулевая группа).

С β -распадом дело обстояло сложнее. Ведь масса атома при этом фактически не изменяется (было известно, что масса электрона составляет примерно 1/1840 часть массы атома водорода). Следовательно, должен увеличиваться на единицу положительный заряд атома, потому что электрон уносит с собой единицу отрицательного заряда. Пока ученые четко не представляли, чему соответствует положительный заряд, они могли лишь косвенно оценивать, куда переходит элемент в результате β -распада. И оказалось, что при этом он сдвигается на одно место вправо по периодической системе.

Все эти наблюдения обобщили в начале 1913 г. Ф. Содди и польский химик К. Фаянс, которые сформулировали закон радиоактивных смещений: при α -распаде радиоактивный элемент превращается в элемент, отстоящий от исходного на два места периодической системы влево, а при β -распаде — на одно место вправо.



Но ученые знали и другие факты. Например, были известны три «радиоэлемента», обладающие свойствами тория и различными атомными весами; и никакими химическими способами их нельзя было отделить друг от друга. Или по три разновидности полония и радона. Или, наконец, семь разновидностей свинца, из которых было три стабильных (они завершали радиоактивные семейства) и четыре радиоактивных (они возникали в результате последовательных α - и β -распадов внутри семейств).

Уже давно мелькала смутная догадка, что атомы одного и того же химического элемента, быть может, неоднородны. Ее высказывали, например, немецкий химик А. Кекуле (предложивший структурную формулу бензола) и наш знаменитый химик А. М. Бутлеров (автор теории строения органических соединений). В наиболее четкой форме ее высказал Крукс, который считал, что у каждого элемента имеются разновидности, различающиеся по атомным весам. Дальше догадок дело, однако, не шло, потому что ни подтвердить их, ни опровергнуть опытным путем не удавалось.

И только в 1913 г. (видите, как богат выдающимися открытиями этот год!) Содди на примере радиоэлементов облек эту догадку в плоть и кровь. Он предложил рассматривать «радиоэлементы» с одинаковыми химическими свойствами как разновидности одного и того же радиоактивного элемента, например три эманации — как разновидности одного химического элемента со свойствами инертного газа.

Эти разновидности Содди назвал изотопами. Слово «изотоп» происходит от греческих «изос» (одинаковый) и «топос» (место).

Таким образом, изотопами оказывались разновидности одного и того же химического элемента, занимающие одну и ту же клетку в периодической системе. По Содди, изотопы имели одинаковые заряды ядер атомов, но разные атомные веса.

Вскоре выяснилось, что явление изотопии присуще не только «радиоактивной области» периодической системы, но и многие стабильные элементы обладают изотопами. Первоначально стабильные изотопы были найдены у неона. Это открытие сделали Дж. Томсон и его ученик Ф. Астон.

Чтобы объяснить истинную причину изотопии, нам придется немного забежать вперед. В 1932 г. была открыта элементарная частица нейтрон, лишенная заряда. Ученые предложили и обосновали протонно-нейтронную модель ядра. Число протонов в ядре атома данного элемента строго постоянно. Оно определяет величину его положительного заряда и равно порядковому номеру элемента. Число же нейтронов может колебаться в довольно широких пределах. Поэтому изотопия связана со строением ядра. У изотопов число нейтронов различно, а число протонов всегда одно и то же. Так периодическая система с честью преодолела и это испытание.

Периодический закон — закон строения атома

В свое время Д. И. Менделеев с огорчением замечал: «...причин периодичности мы не знаем». Ему не удалось дожить до разгадки этой тайны.

Когда было доказано, что порядковый номер элемента в системе численно равен заряду ядра его атома, то стала ясной физическая сущность периодического закона.

Но почему свойства химических элементов изменяются периодически по мере роста заряда ядра? Почему система элементов построена так, а не иначе и ее периоды содержат строго определенное

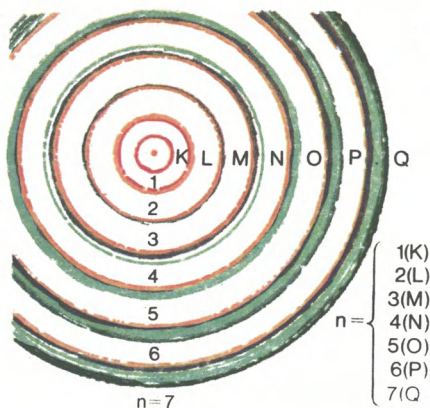


Схема последовательного расположения электронных оболочек в атоме. Номер оболочки равен главному квантовому числу n ; энергии электронов пропорциональны значению n .

число элементов? На эти важнейшие вопросы ответа пока не было.

Тайна периодической системы элементов была разгадана, когда удалось понять сложнейшую структуру атома, строение его внешних электронных оболочек, законы движения электронов вокруг положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома.

Все химические и физические свойства вещества определяются строением атомов. Периодический закон, открытый Менделеевым, есть всеобщий закон природы, потому что он опирается на закон строения атома.

Как ученые познавали строение атома? Планетарная модель атома, предложенная Резерфордом, быстро получила всеобщее признание. Правда, ученые не имели четкого представления, из каких частиц состоит ядро атома и как и в каком количестве располагаются электроны на его орбитах.

Об атомном ядре у нас еще пойдет речь. Электроны... Разве в руках исследователей были какие-

нибудь надежные способы узнать, как ведут себя атомные электроны?

Оказывается, были. Проникнуть в тайну распределения электронов помогло изучение спектров. Атом как бы сам рассказывал о себе на удивительном и красочном языке — на языке спектральных линий испускаемого атомом света. Каждая спектральная линия — это свидетельство того, что электрон изменил свое расположение относительно атомного ядра. Изучая спектры различных элементов, ученые сумели подметить в спектрах важные закономерности, сходства и различия.

Именно благодаря изучению спектров — оптических и рентгеновских — удалось более или менее детально установить, как именно расположены электроны вокруг атомного ядра.

Самый важный вывод состоял в том, что электроны распределяются по определенным оболочкам, причем в каждой из оболочек должно содержаться строго определенное число электронов. Для обозначения таких оболочек, заимствованного, кстати, из спектральной теории, ученые использовали латинские буквы *K*, *L*, *M*, *N*, *O*, *P*, *Q*, и т. д. Так, ближайшая к ядру оболочка обозначалась как *K*-оболочка, следующая — как *L*-оболочка и т. п.

Другой существенный момент заключался в возможности выяснить, какое максимальное число электронов может содержаться на каждой оболочке. Оказалось, что оно определяется по формуле $2n^2$, где n — номер оболочки.

Посмотрите, какими емкостями обладают отдельные электронные оболочки:

	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>
n	1	2	3	4	5	6	7
$2n^2$	2	8	18	32	50	72	98

Наконец, третий замечательный результат приводил к выводу, что внутри каждой оболочки не все электроны одинаковы, а их можно объединить в определенные группы. Располагая такими сведениями об атомах, попытаемся теперь объяснить устройство периодической системы.

Самое главное в построении периодической системы. Казалось бы, самое главное — это то, что периодическая система отражает периодическое изменение свойств химических элементов по мере возрастания зарядов ядер их атомов (Z) и объединяет сходные по свойствам элементы в рамках определенных групп.

Например, все галогены — фтор, хлор, бром, иод, астат — размещаются в VII группе системы. Но мы видим, что в той же группе в виде параллельного вертикального ряда размещены еще три элемента — марганец, технеций и рений. Они тоже сходны друг с другом. Но почему они попали в одну группу с галогенами? Это интересный и важный вопрос, и в свое время мы дадим на него ответ.

Пока же давайте заметим, что каждая группа периодической системы подразделяется на две подгруппы — главную (*a*) и побочную (*b*). В нашем примере галогены составляют *a*-подгруппу, а марганец и его аналоги — *b*-подгруппу.

И все же для объяснения структуры периодической системы, такой, как ее разработал Д. И. Менделеев, все это еще не самое главное.

Быть может, самое главное — это понятие о периодах. Действительно, система потому называется периодической, что она представляет совокупность периодов. Каждый период содержит строго определенное число элементов, начинается щелочным металлом и заканчивается инертным газом. Исключение составляет только первый период, на-

чинающийся с газообразного водорода. Все это, разумеется, чрезвычайно важно, но все-таки тоже еще не самое главное.

Закон Мозли позволил однозначно определить число элементов в каждом периоде системы:

Номер периода:	1	2	3	4	5	6	7
Число							
элементов:	2	8	8	18	18	32	32

Среди чисел химических элементов в периодах нет ни одного, которое бы уже не встречалось в схеме распределения электронов по определенным электронным оболочкам. Но такое совпадение может привести к выводу: в атомах элементов на протяжении одного периода происходит заполнение определенной электронной оболочки.

Иначе говоря, число элементов в периоде равно числу электронов в соответствующей оболочке. Тогда связать построение периодической системы со строением атома было бы чрезвычайно просто. И такая связь оказалась бы до удивления очевидной.

Но в действительности подобное совпадение наблюдается только для первого и второго периодов системы. Они содержат соответственно 2 и 8 элементов. Столько же электронов содержат первая и вторая электронные оболочки. Третья включает 18 электронов. Третий же период состоит, как и второй, из 8 элементов.

Таким образом, заманчивое равенство: емкость периода = емкости электронной оболочки — выполняется, как сказали бы математики, в очень ограниченных условиях.

Стало быть, периодическая система построена по более сложному закону, нежели система последовательных электронных оболочек.

Тут-то мы и можем наконец сказать: самым главным оказывается то, что в периодической системе емкости периодов, начиная со второго, попарно повторяются. Лишь первый период, состоящий из водорода и гелия, остается в одиночестве.

Чтобы объяснить структуру периодической системы, необходимо было установить причину повторяемости периодов. Установить, опираясь на те данные, которыми уже располагала наука о строении атома.

Электронные оболочки заполняются ступенчато. Установлению действительной связи между строением атома и структурой периодической системы наука обязана в первую очередь великому датскому физики Н. Бору. Он же был первым, кто объяснил истинные принципы периодического изменения свойств элементов.

Бор начал с того, что сделал жизнеспособной резерфордовскую модель атома. Согласно всем классическим законам, электрон, вращаясь вокруг ядра, постепенно терял свою скорость. В определенный момент он должен был остановиться и упасть на ядро, т. е. если «планетарный» атом и мог бы существовать, то ничтожное время. Между тем атомы были везде и повсюду и не выказывали тенденции разваливаться.

Нильс Бор преодолел это противоречие, допустив, что электроны вокруг ядра вращаются не по любым, а по определенным орбитам и, находясь на них, не теряют энергии. Лишь переходя с орбиты на орбиту, электроны, как говорят физики, излучают или поглощают кванты света. Визитная карточка: определенная линия в спектре. Такие «разрешенные» орбиты получили название квантовых, а за Бором укрепилась слава создателя квантовой (не путать с квантовомеханической!) теории атома. И,

опираясь на эту теорию, Бор начал объяснять строение периодической системы.

В атоме водорода и гелия заполняется *K*-оболочка, содержащая два электрона. У гелия она заполнена, и потому он инертный газ — в силу прочности заполненной оболочки. К тому времени ученые уже понимали, что химические свойства элементов должны определяться числом и расположением электронов на внешних оболочках.

Второй период — от лития до неона — 8 элементов и 8 электронов в *L*-оболочке. Восьмиелектронная внешняя оболочка (так же как и двухэлектронная у гелия) весьма прочное образование. А потому неон — инертный газ. Вступая в химические реакции, атомы элементов должны либо терять, либо приобретать электроны. Атому неона невыгодно ни то, ни другое.

В третьем периоде также 8 элементов — от натрия до аргона. Но в третьей, *M*-оболочке должно быть 18 электронов. Восемь вакансий заполняются в атомах элементов третьего периода, аргон, по понятной причине (8 электронов на внешней оболочке), снова инертный газ. Десять мест для электронов *M*-оболочки пока остаются свободными. У каких элементов продолжится заполнение свободных вакансий?

За аргоном следуют калий и кальций. Быть может, у них? Вряд ли. Это типичные щелочной и щелочноземельный металлы, и, как свидетельствует строение предыдущих периодов, второго и третьего, с калия должно начаться заполнение новой, *N*-оболочки и тем самым построение нового, четвертого периода системы. Думается, вы уже усвоили простую истину: каждый период (кроме первого) начинается с щелочного и щелочноземельного металлов, а в атомах этих элементов начинает заполняться новая оболочка.

Всего в четвертом периоде 18 элементов. Стало быть, в их атомах должны каким-то образом распределяться 10 электронов из *M*-оболочки и 8 электронов из *N*-оболочки. В какой строгой последовательности — Бор пока не знал.

Зато он твердо установил фундаментальное положение: заполнение электронных оболочек в атомах химических элементов происходит начиная с третьей, *M*-оболочки не последовательно, постепенно до полной емкости (т. е. так, как это было у *K*- и *L*-оболочек), а ступенчато. Иначе говоря, построение электронных оболочек на время прерывается из-за того, что в атомах появляются электроны, принадлежащие другим оболочкам.

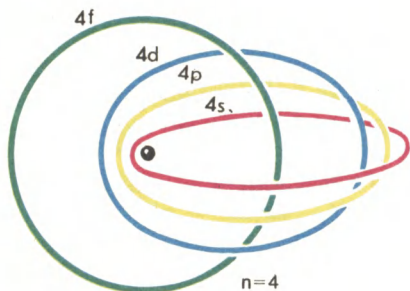
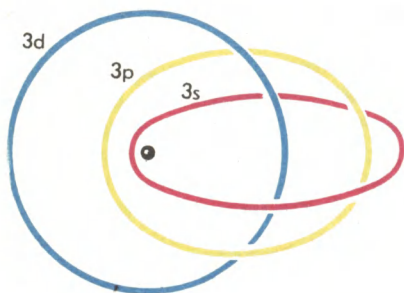
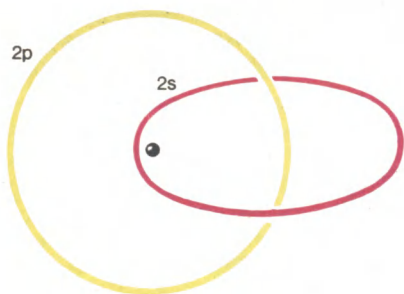
Чтобы понять теорию Бора, придется познакомиться со своеобразной атомной азбукой. Только с ее помощью можно наглядно изложить сокровенные тайны атомов.

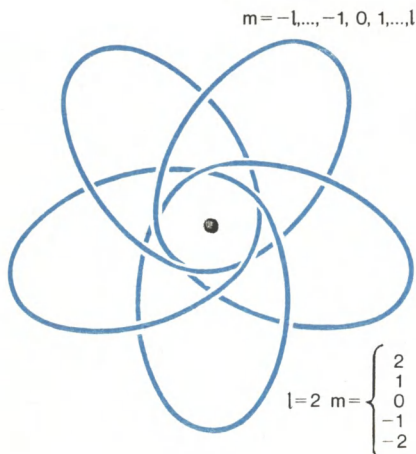
Четыре буквы атомного алфавита. Эти буквы обозначаются так: n , l , m_l , m_s — и на языке атомной физики называются квантовыми числами. Исторически они вводились постепенно, и их возникновение в значительной степени связано с изучением атомных спектров.

Так вот оказывается, что состояние любого электрона в атоме можно записать особым шифром, представляющим собой комбинацию четырех квантовых чисел. Это не просто какие-то отвлеченные величины, используемые для записи электронных состояний. Напротив, все они имеют реальное физическое содержание.

С числом n вы встречались несколькими страницами раньше; оно входит в формулу для емкости электронной оболочки ($2n^2$), т. е. данное квантовое число n соответствует номеру электронной оболочки;

Электрон в атоме Бора описывает не только круговые, но и эллиптические орбиты. Вот как они выглядят для различных значений l при $n=2, 3$ и 4 .





Орбит только одного типа d в одной только электронной оболочке может быть пять. Подумайте, в каких оболочках возможны такие орбиты. Правильнее представлять себе, что все они различно ориентированы в пространстве.

иными словами, это число определяет принадлежность электрона к данной электронной оболочке.

Называемое главным квантовым числом, число n принимает только целочисленные значения

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7...,

отвечающие соответственно оболочкам

K, L, M, N, O, P, Q.

Например, когда говорят, что электрон характеризуется значением $n=4$, то это означает, что он принадлежит к *N*-оболочке. Поскольку n входит в формулу для энергии электрона, то говорят, что главное квантовое число определяет общий запас энергии электрона в атоме.

Другая «буква» нашего алфавита — орбитальное (или побочное) квантовое число — обозначается как l . Оно было введено, чтобы подчеркнуть неравноценность всех электронов, принадлежащих данной оболочке.

Оказывается, каждая оболочка подразделяется на определенные подоболочки, причем их число равно номеру оболочки. Вы сами легко сообразите, что K -оболочка ($n=1$) состоит из одной подоболочки; L -оболочка ($n=2$) — из двух; M -оболочка ($n=3$) — из трех подоболочек...

И вот каждая подоболочка данной оболочки характеризуется определенной величиной l . Орбитальное квантовое число принимает также целочисленные значения, но начиная с нуля, т. е. 0, 1, 2, 3... Таким образом, l всегда меньше n . Легко понять, что при $n=1$ $l=0$; при $n=2$ $l=0$ и 1; при $n=3$ $l=0$, 1 и 2 и т. д. Следовательно l меняется от 0 до $n-1$.

Число l , если можно так выразиться, имеет геометрический образ. Ведь орбиты электронов, принадлежащих к той или иной оболочке, могут быть не только круговые, но и эллиптические.

Разные значения l и характеризуют различные типы орбит.

Физики любят традиции и предпочитают для обозначения электронных подоболочек старые буквенные обозначения $s(l=0)$, $p(l=1)$, $d(l=2)$, $f(l=3)$. Это первые буквы немецких слов, характеризующих особенности серий спектральных линий, обусловленных переходами электронов: резкая, главная, размытая, фундаментальная.

Теперь можно кратко записать, какие электронные подоболочки содержатся в электронных оболочках.

Оболочки

Подоболочки

$K(n=1)$

$1s(l=0)$

$L(n=2)$

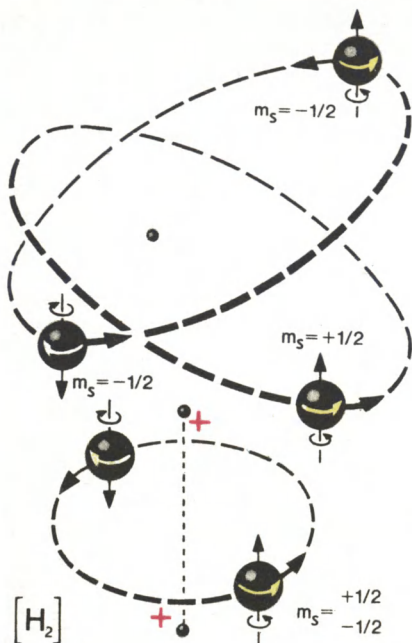
$2s(l=0)$ $2p(l=1)$

$M(n=3)$

$3s(l=0)$ $3p(l=1)$ $3d(l=2)$

$N(n=4)$

$4s(l=0)$ $4p(l=1)$ $4d(l=2)$ $4f(l=3)$



На каждой отдельной орбите может быть либо только два спаренных электрона, либо один неспаренный. Неспаренный электрон имеет большое значение для химической характеристики элемента. От него зависит образование молекул.

Подскажем, что цифры у буквенных обозначений подоболочек есть главные квантовые числа. Двух квантовых чисел — главного n и орбитального l — вполне достаточно, чтобы объяснить особенности строения периодической системы элементов на языке атомной теории. При условии, если знать, сколько электронов вмещают различные электронные подоболочки.

Это «сколько» нам поможет определить третье и четвертое квантовые числа — m_l и m_s , которые носят названия магнитного и спинowego.

Раньше мы сказали, что квантовое число l определяет тип электронных орбит. Магнитное кван-

товое число m_l тесно связано с l и определяет, с одной стороны, направление расположения этих орбит в пространстве, а с другой — их число, возможное для данного l . Из некоторых закономерностей атомной теории следует, что при данном l квантовое число m_l , принимает $2l+1$ целочисленных значений: от $-l$ до $+l$, включая нулевое. Например, для $l=3$ вот какую последовательность m_l мы имеем: $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$, т. е. всего семь значений.

Почему m_l называется магнитным? Каждый электрон, вращаясь на орбите вокруг ядра, по существу, представляет собой один виток обмотки, по которому идет электрический ток. Возникает магнитное поле, поэтому каждую орбиту в атоме можно рассматривать как плоский магнитный листок. При наложении внешнего магнитного поля каждая электронная орбита будет с этим полем взаимодействовать и стремиться занять в атоме определенное положение.

Оказывается, число электронов на каждой орбите определяется значением спинового квантового числа m_s .

Поведение атомов в сильных неоднородных магнитных полях показало, что каждый электрон в атоме ведет себя как магнетик. А это свидетельствует, что электрон вращается вокруг своей собственной оси, словно планета на орбите. Это свойство электрона получило название «спин» (в переводе с английского — *вращать*). Вращательное движение электрона постоянно и неизменно. Вращение электрона совершенно необычно: ни замедлить, ни ускорить, ни остановить его нельзя. Оно одинаково для всех электронов в мире.

Но хотя спин — общее свойство всех электронов, в нем также заключена причина различия между электронами в атоме.

Два электрона, вращаясь на одной и той же орбите вокруг ядра, обладают одним и тем же спином по величине, и все же они могут различаться направлением собственного вращения. При этом изменяется знак момента количества движения и знак спина.

Квантовый расчет приводит к двум возможным значениям спиновых квантовых чисел, присущих электрону на орбите:

$$s = +1/2 \text{ и } s = -1/2.$$

Других значений быть не может. Поэтому в атоме на каждой орбите могут вращаться либо только один, либо два электрона. Больше быть не может.

Наконец-то мы вправе сказать, что каждая электронная подоболочка максимально вмещает $2(2l+1)$ -электронов, а именно:

s-подоболочка $2(2 \cdot 0 + 1) = 2$ электрона;
p-подоболочка $2(2 \cdot 1 + 1) = 6$ электронов;
d-подоболочка $2(2 \cdot 2 + 1) = 10$ электронов;
f-подоболочка $2(2 \cdot 3 + 1) = 14$ электронов.

Отсюда простым сложением получаются емкости последовательных оболочек.

Вот теперь мы могли бы ответить на вопрос: что же такое основной закон строения атома?

Удивительна простота основного закона, к которому свелась первоначальная бесконечная сложность строения атома. Вся прихотливость поведения электронов в его внешней оболочке, управляющая всеми его свойствами, может быть выражена необычайно просто: в атоме нет и не может быть двух одинаковых электронов.

Теперь смысл этого закона нам ясен. Все электроны в атоме должны иметь разный набор значе-

ний четырех квантовых чисел: n, l, m_l, m_s . Этот закон известен в науке как принцип Паули (по имени швейцарского физика-теоретика).

Зная же общее число электронов в данном атоме, которое равно его порядковому номеру в менделеевской системе, мы можем сами «строить» атом: можем сами рассчитывать структуру его внешней электронной оболочки — определять, сколько в ней электронов и какие они в ней. Посмотрим теперь, как все это делается на практике.

Архитектура периодической системы. Раньше рассказывая о том вкладе, который внес Бор в объяснение периодичности, мы не упомянули об одном его важном выводе: по мере роста Z периодически повторяются сходные типы электронных конфигураций атомов. По сути, это тоже формулировка периодического закона, но применительно к процессу распределения электронов по оболочкам и подоболочкам.

Зная закон строения атома, мы можем теперь сами построить периодическую систему и объяснить, почему она построена именно так. Нам нужно лишь одно маленькое терминологическое разъяснение: те элементы, в атомах которых происходит построение s -, p -, d -, f -подоболочек, принято называть соответственно s -, p -, d -, f -элементами.

Только надо иметь в виду, что формулу атома, по традиции, принято записывать в несколько необычной форме. Но к ней нетрудно привыкнуть. Главное квантовое число физики записывают соответствующей цифрой, а побочное — буквой; число же электронов помечают справа сверху. Например, в атоме водорода только один электрон, поэтому его формула имеет самый простой вид: $1s$.

Итак, приступим.

Первый период содержит $1s$ -элементы — водород

и гелий. Так как s -элементов с данным значением n никогда не может быть больше двух, то схематическая запись первого периода следующая:



Вспомнив или перечитав то, что мы рассказывали на предшествующих страницах, вы легко сообразите, что второй период может быть изображен следующим образом:



т. е. в него входят элементы, в атомах которых заполняются $2s$ - и $2p$ -подоболочки, а третий (в нем строятся $3s$ - и $3p$ -подоболочки):

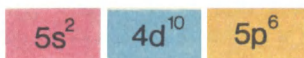


Очевидно, сходные типы электронных конфигураций повторяются, именно сходные, а не одинаковые, так как, скажем, $1s^2$ не то же самое, что $2s^2$, а $2s^2$ — не $3s^2$.

Чтобы изобразить строение четвертого периода, потребуется небольшая подсказка. В начале этого периода два $4s$ -элемента, т. е. начинается заполнение N -оболочки ($n=4$) ранее, чем завершилось построение M -оболочки. Она, как вы уже знаете, содержит еще 10 вакантных мест, которые и заполняются у десяти последующих элементов ($3d$ -элементов). Кончилось заполнение M -оболочки, продолжается заполнение N -оболочки (шестью $4p$ -электронами). Следовательно, строение четвертого периода изобразим так:



Пятый период, содержащий столько же элементов, сколько и четвертый (18), запишется аналогично:



В шестом периоде 32 элемента (к *s*-, *p*- и *d*-элементам прибавляется новый тип: *4f*-элементы). Его схематическая запись такова:



И наконец, следующий, седьмой период:



Следует только иметь в виду, что еще не все элементы седьмого периода известны. На с. 63 изображена периодическая система. Ее построение вполне соответствует тому, которое мы только что провели.

Спросим, однако, себя: ступенчатое заполнение оболочек — это лишь прием, к которому прибегали ученые, чтобы объяснить явление периодичности, или же строгая физическая закономерность?

Именно закономерность! Каждый очередной электрон, попадая в электронную оболочку, характеризуется определенной энергией (или, как говорят, он занимает определенный энергетический уровень). Сначала последовательность этих уровней такова, что соответствует монотонному заполнению электронных оболочек. А вот после того, как заполнилась *3p*-подоболочка, монотонность исчезает. Оказывается, вместо того чтобы занимать уровни *3d*-подоболочки, электронам выгоднее (с энергетической точки зрения) сначала заселить уровни *4s*-подоболочки. Вот эти-то энергетические «каче-

ли» «выгоднее — невыгоднее» и объясняют ту ситуацию, что в химических элементах заполнение электронных оболочек идет уступами. На очереди другой вопрос: почему в периодической системе аналогично построенные периоды попарно повторяются?

Мы определяли прежде период как совокупность элементов, начинающуюся щелочным металлом и завершающуюся инертным газом. Но теперь мы владеем языком электронных конфигураций и поэтому можем сказать, что атом любого щелочного металла (а также атом водорода) имеет такое строение внешней электронной оболочки:

ns^1

а атом инертного газа:

np^6

Здесь n — главное квантовое число, оно же номер внешней электронной оболочки, оно же номер периода, ибо каждый период начинается элементом, в атоме которого появляется новая электронная оболочка.

Предоставим вам возможность дать определение периода элементов в периодической системе (имея в виду специфику первого периода, содержащего только s -элементы).

Если мы примем, что конфигурации внешних электронных оболочек атомов граничных (начального и конечного) элементов периода такие, как ns^1 и np^6 , то аналогично построенные периоды — второй и третий, четвертый и пятый, шестой и седьмой будут попарно повторяться и содержать одинаковое число элементов. Ибо другого распределения элементов по периодам быть не может.

А все это лишний раз подчеркивает, насколько гениальным «архитектором» был Д. И. Менделеев, который, ничего не зная о строении атомов, сумел создать удивительно стройную конструкцию таблицы элементов. Настолько удачную конструк-

В такой
последовательности
происходит заполнение
электронных оболочек
и подоболочек в атомах
по мере роста Z.

В атомах водорода, бора,
скандия и церия впервые
появляются
электроны с новыми
значениями
орбитального квантового

числа l . Эта
закономерность
описывается простым
уравнением
 $Z_l = \frac{1}{2}l(3l^2 + 3l + 2) + 1$.
Для $l=0, 1, 2, 3...$
получаются
соответственно
значения 1(H), 5(B),
21(Sc), 58(Ce).
Интересно, что первый
5g-электрон ($l=4$)
должен появиться
в атоме элемента с
 $Z=125$.

цию, что на основе выявления в ней закономерностей химического поведения элементов оказалось сравнительно просто проникнуть в тайну строения электронных оболочек.

Периодическая система на уроке химии. Если подойти к вопросу строго и придирчиво, то о какой периодической системе мы только что вели разговор?

О периодической системе атомов: ведь мы обсуждали, как и в какой последовательности заполняются электронные оболочки и подоболочки и как периодически повторяются сходные электронные конфигурации. Элементы же с многообразием и своеобразием их свойств лишь подразумевались, но не присутствовали. В этом состоит одна из многих удивительных особенностей периодического закона. Чем больше мы о нем узнаем, тем более глубоким оказывается его содержание.

Познав закон строения атома, ученые объяснили причины периодичности изменения свойств химических элементов и структуру периодической системы. Но когда, опираясь на представления физики, мы пытались объяснить, почему тот или иной элемент обладает определенными свойствами, нам часто оказывалось недостаточно представлений о строении атома. Периодическая система элементов по

[illegible]

а	I	а	II	а	III	а	IV	а	V	а	VI	а	VII	а	VIII	а							
1	III																						
2	Li 6,94 ЛИТИЙ	3	Be 9,012 БЕРИЛЛИЙ	4	B 10,811 БОР	5	C 12,011 УГЛЕРОД	6	N 14,0067 АЗОТ	7	O 15,999 КИСЛОРОД	8	F 18,998 ФТОР	9	Ne 20,179 НЕОН	2	He 4,0026 ГЕЛИЙ						
3	Na 22,989 НАТРИЙ	11	Mg 24,305 МАГНИЙ	12	Al 26,981 АЛЮМИНИЙ	13	Si 28,086 КРЕМНИЙ	14	P 30,973 ФОСФОР	15	S 32,06 СЕРА	16	Cl 35,453 ХЛОР	17	Ar 39,948 АРГОН	26	Fe 55,847 ЖЕЛЕЗО	27	Co 58,933 КОБАЛЬТ	28	Ni 58,70 НИКЕЛЬ		
4	K 39,098 КАЛИЙ	19	Ca 40,08 КАЛЬЦИЙ	20	Sc 44,956 СКАНДИЙ	21	Ti 47,88 ТИТАН	22	V 50,942 ВАНАДИЙ	23	Cr 51,996 ХРОМ	24	Mn 54,938 МАРГАНЕЦ	25	Fe 55,847 ЖЕЛЕЗО	36	Kr 83,80 КРИПТОН	44	Ru 101,07 РУТЕНИЙ	45	Rh 102,905 РОДИЙ	46	Pd 106,4 ПАЛЛАДИЙ
5	Rb 85,47 РУБИДИЙ	37	Sr 87,62 СТРОНЦИЙ	38	Y 88,906 ИТРИЙ	40	Zr 91,22 ЦЕРКОНИЙ	41	Nb 92,906 НИОБИЙ	42	Mo 95,94 МОЛЫБДЕН	43	Tc 98,91 ТЕХНЕЦИЙ	53	I 126,904 ИОД	54	Xe 131,30 КСЕНОН	76	Os 190,2 ОСМИЙ	77	Ir 192,22 ИРИДИЙ	78	Pt 195,08 ПЛАТИНА
6	Ag 107,868 СЕРЕБРО	47	Cd 112,41 КАДМИЙ	48	In 114,82 ИНДИЙ	49	Sn 118,71 ОЛОВО	50	Sb 121,75 СВЯЩАЯ	51	Te 127,60 ТЕЛЛУР	74	W 183,85 ВОЛЬФРАМ	84	Po 209 ПОЛОНИЙ	85	At 210 АСТАТ	86	Rn 222 РАДОН				
7	Fr [223] ФРАНЦИЙ	87	Ra 226,025 РАДИЙ	88	Ac [227] АКТИНИЙ	89		90		91		92		93		94		95		96		97	

Лантанонды

58	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
140,90	140,90	140,90	144,24	144,91	150,36	157,25	158,93	162,50	164,93	167,26	168,93	173,04	174,97
ЦЕРИЙ	ПРАЗЕОДИЙ	НЕОДИМ	ПРОМЕТЕЙ	САМАРИЙ	ЕВРОПИЙ	ГАДОЛИНИЙ	ТЕРБИЙ	ДИСПРОЗИЙ	ГОЛЬМИЙ	ЭРБИЙ	ТУЛИЙ	ИТТЕРБИЙ	ЛЮТЕЦИЙ

АКТИННОНДЫ

90	Th	232.038	ТОРИЙ	91	Pa	231.036	ПРОТАКТИНИЙ	92	U	238.0289	УРАН	93	Np	(241)	НЕПТУНИЙ	94	Pu	(244)	ПУТОНИЙ	95	Am	(243)	АМЕРИЦИЙ	96	Cm	(247)	КУРИЙ	97	Bk	(247)	БЕРКЛИЙ	98	Cf	(251)	КАЛИФОРНИЙ	99	Es	(254)	ЭЙЗЕНШТЕЙН	100	Fm	(257)	ФЕРМИЙ	101	Md	(258)	МЕНДЕЛЕВИЙ	102	No	(259)	НОБЕЛИЙ	103	Lr	(262)	ЛОЙДЖИЙ
----	----	---------	-------	----	----	---------	-------------	----	---	----------	------	----	----	-------	----------	----	----	-------	---------	----	----	-------	----------	----	----	-------	-------	----	----	-------	---------	----	----	-------	------------	----	----	-------	------------	-----	----	-------	--------	-----	----	-------	------------	-----	----	-------	---------	-----	----	-------	---------

своему внутреннему содержанию гораздо глубже и шире периодической системы атомов.

Вот перед нами первый химический элемент — водород. Электронная структура его атома $1s$. Казалось бы, его место в одной группе со щелочными металлами, в I *a*-подгруппе. Но... свойства водорода таковы, что ему трудно подобрать одно вполне определенное место. Иногда его действительно помещают в первую группу, зачисляют в родственники к щелочным металлам. Как и у них, у водорода один электрон на внешней оболочке, и он может проявить положительную валентность, равную единице. И наконец, он способен вытеснять некоторые металлы из их солей. Но этим и ограничиваются свойства, родственные прочим элементам первой группы. Водород — неметалл, газ, а все остальные — типичные металлические элементы.

Зато у водорода много общего с галогенами — элементами седьмой группы. Как и у галогенов, молекулы водорода состоят из двух атомов. И галогены, и водород — типичные неметаллы. Подобно галогенам, водород может проявлять отрицательную валентность, вступая в соединения с металлами и образуя своеобразные вещества — металлические гидриды. Но и этого сходства слишком мало, чтобы считать водород родным братом галогенов.

Поэтому водород как бы объединяет в себе черты элементов и первой, и седьмой группы. Такая «двуликость» водорода объясняется строением его атома. Любой элемент, отдавая валентные электроны, сохраняет в неприкосновенности одну или несколько предыдущих оболочек. Водород, расставаясь с единственным валентным электроном, предстает перед нами в виде «голого» атомного ядра — протона. Поэтому химия водорода — это до какой-то степени единственная в своем роде химия элементарной частицы. Первый элемент периодической системы и

первое свидетельство того, насколько богаче оказываются его химические возможности по сравнению с тем, что можно предположить на основе строения его атома.

Когда-то Менделеев называл элементы второго и третьего периодов типическими. Он считал, что их химические особенности как бы определяют все последующее построение системы. И в самом деле: достаточно разобраться в поведении типических элементов, чтобы химическое лицо менделеевской таблицы во многом прояснилось.

Начинающие второй период литий и бериллий на «электронном» языке — $2s$ -элементы. Оба — металлы, литий легко отдает свой внешний электрон, бериллий — гораздо труднее. В атоме его соседа бора начинается заполнение $2p$ -подоболочки, а сам элемент оказывается неметаллом. Углерод, азот, кислород, фтор, неон — все они проявляют только неметаллические свойства.

Одно из основных правил химического взаимодействия гласит: атомы элемента могут отдавать электроны с внешних оболочек либо, напротив, могут принимать их. Этот процесс потери — приобретения электронов имеет весьма определенную цель. Каждый атом как бы хочет стать таким, как атом ближайшего инертного газа, ибо атомы инертных газов весьма прочные образования. Для элементов второго периода таким «идеалом» служат гелий и неон.

Вот почему, например, кислород и фтор оказываются сильнейшими окислителями, не имеющими равных по химической агрессивности: до восьми-электронной внешней оболочки неона им остается добрать электронов совсем немного. И они с жадностью «отбирают» их у атомов других элементов.

Расскажем об одной удивительной особенности второго периода: три принадлежащих ему элемен-

та — углерод, азот и кислород вместе с водородом являются составными частями органической материи. Так сказать, своеобразными ответственными за жизнь на Земле. Почему? Вот, пожалуй, вопрос, поиски ответа на который потребуют участия не одного поколения будущих химиков.

В третьем периоде почти все так, как и во втором: 3s-элементы (натрий, магний) и 3p-элементы (от алюминия до аргона). Почти все, да не все. Натрий химически куда активнее своего предшественника по группе лития: этим же отличается магний по сравнению с бериллием. Алюминий, в отличие от бора, типичный металл. Кремний — основа всех руд и минералов, «цемент» земной тверди — таит в себе некоторые прообразы металлических качеств. Фосфор и сера — твердые тела, а не газы, как их аналоги по группам азот и кислород. Хлор, как и фтор, — газ, тоже химический «агрессор», но менее яростный, чем фтор. Пожалуй, только аргон ничем внешне не отличается от неона.

Сопоставляя элементы второго и третьего периодов, что мы заметим? Вполне определенное, закономерное изменение свойств, по группам и по периодам, по вертикали и по горизонтали. Основные черты этих изменений сохраняются и дальше, в последующих периодах.

А именно:

в подгруппах щелочных и щелочноземельных металлов сверху вниз возрастает химическая активность (например, франций, если бы когда-нибудь удалось получить его в металлическом виде, оказался бы самым активным металлом), — такова, следовательно, особенность s-элементов;

у p-элементов сверху вниз возрастают металлические свойства (даже у галогенов, самый тяжелый из них аstat во многом похож на металл), а

слева направо (по периоду) свойства заметно изменяются при переходе от элемента к элементу. Например, углерод мало похож на бор, газообразный азот не имеет ничего общего с углеродом.

Вы обратили внимание, что пока речь идет лишь об *s*- и *p*-элементах? Эти элементы располагаются в главных, *a*-подгруппах периодической системы; у них имеется общее качество: в атомах по мере роста *Z* происходит заполнение внешней электронной оболочки (со значением главного квантового числа *n*, равного номеру периода).

Так как химические свойства элементов во многом зависят от числа внешних электронов, то поэтому-то при переходе от элемента к элементу свойства заметно меняются.

А какие же элементы относятся к *b*-подгруппам? Немного повременим с ответом. Сначала мы хотим рассказать, что...

Инертные газы могут вступать в химические соединения. Ни из периодического закона, ни из теории строения атома не следует, что элементы нулевой группы, эти химические «ленивцы», вообще не способны вступать в реакции химического взаимодействия с другими элементами. Теория, родившаяся на основе опытов, указывала на исключительную прочность внешних электронных оболочек у этих «безразличных ко всему на свете» элементов: гелия, неона, аргона, криптона, ксенона и радона. Из опыта же вытекала их высокая химическая инертность.

Это полностью соответствует их свойствам. В обычных условиях они ни с чем не соединяются. В природе они находятся в свободном состоянии. Они даже не способны образовать свою собственную молекулу. Все это одноатомные газы. Их нормальное состояние — нулевая валентность.

Когда в 1900 г. Д. И. Менделеев и В. Рамзай встретились в Берлине, оба ученых пришли к убеждению, что в периодической системе нужно для этих бездеятельных элементов добавить еще одну, нулевую группу. Такое положение в менделеевской таблице для этих элементов долгое время было общепринято. Оно хорошо характеризует их свойства.

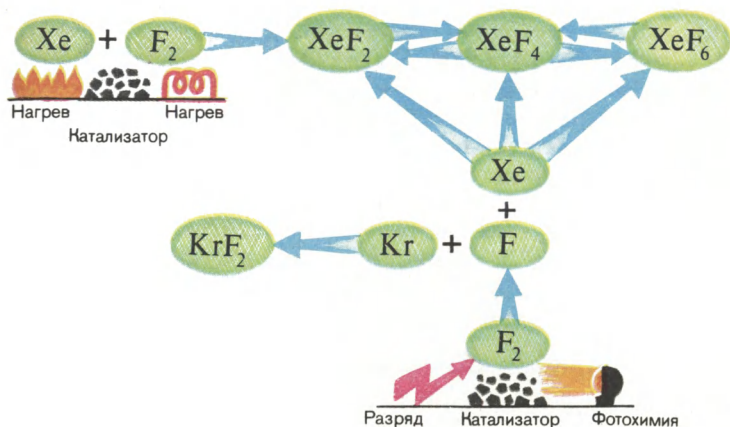
Однако химики никогда не теряли надежду преодолеть химическую «лень» инертных газов и заставить их вступать в химические соединения. Это оказалось чрезвычайно трудной задачей. Решение ее потребовало более 60 лет напряженной работы.

Попытки получить химические соединения инертных газов были предприняты сразу после открытия аргона. В 1896 г., всего через два года после открытия аргона, было получено при очень высоком давлении первое соединение аргона с водой: $\text{Ar} \cdot \text{H}_2\text{O}$, однако оно не было соединением, где проявлялись химические связи. Но чтобы получить даже такие соединения для криптона и ксенона, химикам пришлось работать еще почти 30 лет.

В 1940 г. советскому химику Б. А. Никитину удалось заставить инертные газы вступать в реакцию с некоторыми органическими соединениями. И все же полученные им соединения нельзя было считать химическими. Это были соединения без химической связи. В них атом инертного газа находился внутри органической молекулы и не мог ее покинуть. Такие соединения называются теперь клатратными соединениями.

Непрерывные неудачи создали общепринятое мнение о том, что инертные газы вообще не способны участвовать в химических реакциях. Но упорная борьба продолжалась. Развивая теорию химической связи, ученые-теоретики смогли с уверенностью предсказать возможности взаимодействия некоторых инертных газов с фтором.

Схема синтеза фторидов
ксенона и криптона



И наконец в 1962 г. был достигнут замечательный успех. Канадскому химику Н. Бартлетту удалось получить первое настоящее соединение ксенона с платиной и фтором — XePtF_6 . Вскоре были получены соединения XeF_6 , XeF_4 и XeF_2 . Это твердые кристаллические устойчивые вещества белого цвета.

Потом наступила очередь криптона. Оказалось, что и он может образовывать химические соединения. Вслед за криптоном и у радона были обнаружены химические свойства, причем радон, вероятно, должен быть самым активным среди инертных газов (правда, как редчайший радиоактивный элемент он доступен в очень малых количествах). Попытки вызвать на химическую откровенность аргон, неон и гелий успеха не имели, и теория химической связи весьма скептически смотрит на возможность получения их соединений.

В настоящее время известно более 150 химических соединений — фторидов, хлоридов, окислов, кислот и солей — ксенона, криптона и радона. Недавно получено соединение ксенона с азотом. А тем самым пресловутая идея о незыблемой прочности внешней восьмизлектронной оболочки оказалась основательно поколебленной. Теперь прилагательное «инертные» по отношению к криптону, ксенону и радону употребляется лишь по традиции. Поскольку же половина инертных газов обнаружила необыкновенную химическую деловитость, то в последнее время в периодической системе нулевую группу вообще упразднили, т. е. инертные газы составляют теперь VIIIa-подгруппу.

А какие элементы входят в б-подгруппы? В побочные, или б-подгруппы входят те элементы, в атомах которых происходит построение оболочек, ранее остававшихся недостроенными. Именно поэтому, как вы легко сообразите сами, в первом, втором и третьем периодах содержатся лишь элементы, входящие в главные подгруппы. Элементы побочных подгрупп появляются в четвертом периоде, и первым таким элементом оказывается скандий (3*d*-элемент).

У всех *d*-элементов (за редкими исключениями, которые никак почти не сказываются на свойствах) число внешних *s*-электронов постоянно и равно двум. Поэтому-то, во-первых, все *d*-элементы — металлы. Их нередко называют переходными, так как действительно они представляют в больших периодах переход от *s*- к *p*-элементам.

Во-вторых, при переходе от одного *d*-элемента к другому мы не наблюдаем столь же резкого изменения свойств, как в случае *p*-элементов. Скорее мы видим плавное изменение. Иногда оно становится настолько плавным, что соседние элементы оказываются весьма похожими.

И тогда-то обнаруживается: симметричность структуры периодической системы нарушается, потому что нужно разместить эти «весьма похожие» элементы, да еще и наиболее логичным способом. Так в системе появляется пристройка, которая соответствует своеобразной группе — восьмой. Входящие в нее элементы группируются по три в каждом большом периоде таблицы. Эти группировки называются триадами.

Элементы триад очень сходны между собой. Даже названия некоторых из них объясняются именно таким сходством. В средние века рудокопы находили иногда загадочные руды, похожие на железные, из которых никак не удавалось выплавить железо. Озадаченные рудокопы наивно думали, что над ними зло шутят горные духи — карлики кобольды и старый черт Ник. Отсюда и имена двух элементов первой триады: кобальт и никель.

Элементы двух других триад еще более похожи друг на друга; их даже объединяют общим названием: платиновые металлы. И все они встречаются в природе в самородном металлическом состоянии. Казалось бы, максимальная валентность элементов в триадах должна равняться восьми. Ведь в других группах подавляющее большинство элементов способно проявлять валентность, равную номеру группы. Но таких «высот» достигают лишь рутений и осмий: им удается образовывать окислы RuO_4 и OsO_4 . Получается, что номер группы носит чисто формальный характер. И некоторые химики не без основания указывали на это как на слабое место периодической системы.

У железа, кобальта и никеля происходит достройка предыдущей электронной оболочки (*M*-оболочки) *d*-электронами. И эта оболочка уже близка к завершению. Точно такую же картину мы видим и в атомах платиновых металлов.

Рекомендуем внимательно изучить эту упрощенную схему строения сложного атома лантана. Обратите внимание: на всех энергетических уровнях обязательно по два s -электрона, по шесть p -электронов. В оболочках M и N кроме этих электронов есть еще

по десять d -электронов. Заметьте, что подоболочка, где должны быть f -электроны, пустая, на ней ни одного электрона нет. Затем у лантана только один $5d$ -электрон и, наконец, еще два $6s$ -электрона. Справа вверху — схема строения атома криптона.

А раз предыдущая оболочка вот-вот должна заполниться до нужной емкости, то атому из восьмой группы становится невыгодным отдавать с нее много электронов. Поэтому восьмивалентное состояние — большая редкость для элементов триад.

Платиновые металлы вообще неохотно позволяют вовлекать себя в химические реакции даже самым яростным химическим агрессорам.

Теперь элементы триад включают в побочную, VIII б-подгруппу, хотя и не все химики с этим согласны.

Загадка редкоземельных элементов. Но ведь мы с вами знаем, что еще есть и f -элементы. Лишь беглый взгляд на периодическую систему может вызвать удивление: для $4f$ -элементов словно не нашлось места в системе. Они в количестве четырнадцати — от церия до лютеция — вынесены под таблицу.

История так называемых редкоземельных элементов (под этим именем фигурируют лантан и 14 лантаноидов — $4f$ -элементов) — одна из самых сложных и запутанных страниц истории периодического закона.

Сколько редкоземельных элементов должно помещаться в одной клетке периодической системы?

Для Менделеева такой вопрос был просто неуместен: одну клетку в таблице может занимать только один элемент.

Многие известные химики, среди них и сам Менделеев, долго бились над размещением редкоземельных элементов в периодической системе: пытались поместить, например, церий в четвертой группе, празеодим в пятой, для неодима искали место в шестой.

Но эти необыкновенные элементы нарушали самую основу структуры периодической системы. При любых попытках разместить их в таблице периодическая повторяемость свойств не соблюдалась. В побочных подгруппах, куда они попадали, должны быть сходные элементы. Церий же не имел ничего общего с цирконием, празеодим — с ниобием, и неодим совершенно не был похож на молибден.

Зато по мере того, как изучались их химические свойства, становилось все более ясным, что эти элементы сходны друг с другом, как братья-близнецы. Они настолько химически подобны, что и различить, и разделить их чрезвычайно трудно. Но все они, бесспорно, разные элементы. В этом химики не сомневались.

Друг Менделеева — чешский химик Б. Браунер предложил самое простое решение: поместить все эти элементы в одну клетку таблицы. Но, по существу, это только увеличило принципиальную трудность проблемы, не разрешив ее.

Если одно место могут занимать несколько различных элементов, то, во-первых, нарушается основной принцип периодической системы и, во-вторых, становится совершенно невозможно предвидеть и предсказать, сколько же элементов можно найти в природе, сколько их вообще может суще-

ствовать. Химики всего мира разыскивали их очень усердно и более чем успешно. За короткий период, примерно за 30 лет, было открыто почти сто (!) редкоземельных элементов, и подавляющее большинство открытий оказалось ошибочным. Все попытки найти разумное решение проблемы редких земель были безуспешными.

Только квантовая теория строения атома помогла решить окончательно эту большую загадку химии. Детальное изучение спектральных характеристик у редкоземельных элементов показало, что строение их атомов очень своеобразно. Все они внешне совершенно сходны между собой. Их наружные электронные оболочки, за некоторыми исключениями, о которых мы скажем дальше, построены совершенно одинаково.

У всех них в самой наружной *P*-оболочке по два *s*-электрона, поэтому все они металлы. Глубже расположенная *5d*-подоболочка, принадлежащая к *O*-оболочке, в атомах редкоземельных элементов еще не заполнена — в ней всего лишь один электрон, который тоже может принимать участие в химических превращениях, да и то у церия, гадолиния и лютеция. Определение порядкового номера установило, сколько же всего редкоземельных элементов, а изучение спектров помогло выяснить строение их атомов. Оказалось, что они отличаются друг от друга числом *4f*-электронов на оставшейся незаполненной, глубоко скрытой в недрах атома *N*-оболочке. Эти электроны защищены снаружи броней устойчивой оболочки $5s^2 5p^6$. Они почти совершенно заблокированы и не могут проявить себя в химических свойствах.

Все редкоземельные элементы трехвалентны. Почему? Ответить не так-то просто. Только у La, Ce, Gd и Lu три валентных электрона налицо. А у остальных — лишь два *6s*-электрона готовы принять участие в химических связях. Откуда же берется

третий? Ведь $4f$ -подоболочка глубоко запрятана в недрах атома... Вот задача, до конца не решенная...

Зная теперь законы построения внешних электронных оболочек атома, любой из вас, будущих химиков, сможет сам решить проблему, над которой химики прошлого бились многие десятилетия: сколько редкоземельных элементов существует в природе?

Очевидно, ровно столько, сколько их соответствует постепенному заполнению всех орбит с этими электронами. Обозначение f заменяет квантовое число $l=3$. Мы уже знаем, что таких орбит может быть $2 \cdot 3 + 1 = 7$. А на каждой может быть не больше двух электронов. Следовательно, таких элементов в природе может быть **четырнадцать**. Всего же в природе должно существовать ровно **пятнадцать** элементов-близнецов, считая и лантан, свойствами близкий к лантаноидам. Столько их в действительности и оказалось, начиная с 57-го — лантана до 71-го — лютеция. Правда, в природе все-таки оказался пробел: 61-й элемент нашли недавно. Ученым пришлось получить (синтезировать) его искусственно. Этот элемент называли прометием.

Итак, можно ли сказать, что в одной клетке периодической системы размещаются пятнадцать элементов? Этот вопрос обсуждается часто и в наши дни. Периодический закон Менделеева — это всеобщий закон природы. В естественной системе элементов каждый элемент занимает одно место и, следовательно, в таблице каждый элемент — одну клетку. Менделеев придал своей таблице самую простую и удобную форму. Изображать же ее можно по-разному. Можно просто помнить, что одна клетка между барием и гафнием условно заменяет сразу пятнадцать клеток. Но можно менделеевскую таблицу начертить так, чтобы все длинные периоды оказались развернутыми. Периодический закон от этого не изменится.

Так ли все просто в теории периодической системы? Порой с оговорками, но с помощью теории строения электронных оболочек можно объяснить многие закономерности и особенности химического поведения элементов. Согласитесь, что эта теория оказывается очень удобным рабочим инструментом и для тех, кто только начал изучать химию, и для тех, кто уже работает в научно-исследовательском институте или заводской лаборатории.

Ее, эту теорию, ученые называют формальной теорией периодической системы.

Формальная? Ведь этому прилагательному противостоит другое: фактическая. Следовательно, в теории есть что-то такое, что не удовлетворяет ученых, что не совсем соответствует действительному положению вещей? Да, это так. Представление об атоме как о системе, состоящей из ядра и вращающихся вокруг него по определенным орбитам электронов, не соответствует истине. Все гораздо сложнее...

Атом квантовомеханический. Здесь вам нередко придется верить нам на слово. Потому что те проблемы, о которых мы будем рассказывать, требуют очень большой подготовки.

Стройность и изящество атомной теории Бора покорила воображение, но физики видели в ней не только достоинства, но и существенные изъяны. Они, например, справедливо замечали, что боровская теория наполовину использует новые (квантовые) представления, наполовину старые (взятые из классической физики). Один ученый даже остроумно пошутил: «В теории Бора мы как бы должны по понедельникам, средам и пятницам пользоваться классическими законами, а по вторникам, четвергам и субботам — квантовыми».

Когда Бор строил схему последовательного заполнения электронных оболочек и подоболочек, то

он опирался, во-первых, на периодическую систему элементов и накопленные знания об их химических свойствах, а во-вторых, на результаты исследований атомных спектров.

Схема заполнения как бы строилась в соответствии с уже готовым каркасом — менделеевской таблицей элементов, а не была плодом какой-либо фундаментальной физической теории.

И это тоже не удовлетворяло ученых.

Но будем объективными. Более полувека прошло с того времени, как Бор объяснил причину периодического изменения свойств элементов, а ученые и сейчас пользуются, и в дальнейшем будут пользоваться его представлениями. Потому что они чрезвычайно наглядны. Это хоть и приближенная, но прекрасно работающая модель действительного положения вещей.

В середине 20-х гг. французский физик Л. де Бройль высказал смелую идею: все материальные частицы (в том числе и электроны) обладают не только материальными, но и волновыми свойствами. Вскоре удалось показать, что электроны, подобно световым волнам, могут также огигать препятствия.

Раз электрон — волна, то его движение в атоме может быть описано с помощью волнового уравнения. Такое уравнение вывел в 1926 г. австрийский физик Э. Шрёдингер. Математики называют его дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных. Для физиков же это основное уравнение квантовой механики.

Вот как выглядит уравнение Шрёдингера:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} \left(E + \frac{Ze^2}{r} \right) \psi = 0$$

Легко увидеть в этом уравнении знакомые обозначения — m , e , r , Z , которыми не раз приходилось пользоваться на школьных уроках физики:

m — это, конечно, масса, в данном случае масса электрона;

r — расстояние электрона от ядра;

e — заряд электрона;

E — полная энергия электрона, равная сумме кинетической и потенциальной энергии;

Z — порядковый номер атома (для атома водорода равен 1).

Конечно, вам знакомо и обозначение h , а что касается h , то эта величина — основная в квантовой теории и называется «квант действия».

Буквами x , y и z обозначаются координаты электрона.

Как видите, пока нет ничего необычного. Необычной оказывается величина ψ , которая носит название волновой функции.

Она не измеряется ни в граммах, ни в сантиметрах, ни в секундах. Это абстрактная отвлеченная величина, которая характеризует... степень вероятности.

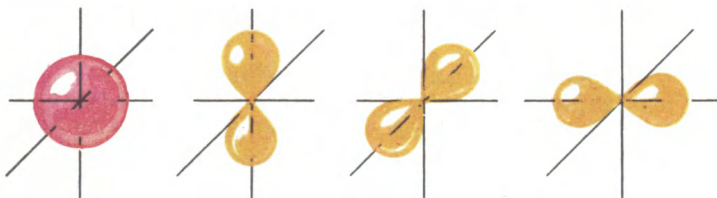
Степень вероятности того, что электрон находится в определенном месте пространства вокруг ядра. Если $\psi=1$, то, значит, электрон действительно должен находиться в этом самом месте; если же $\psi=0$, то электрона там нет и в помине.

Вот это-то представление о вероятности нахождения электрона центральное в квантовой механике. А величина ψ (пси)-функции (точнее говоря, квадрат ее величины — ψ^2) выражает вероятность пребывания электрона в той или другой точке пространства.

Так как же выглядит атом квантовомеханический?

Прежде всего в нем нет определенных электрон-

Схематическое
изображение s- и
p-орбиталей.



ных орбит, столь четко очерченных в боровской модели атома. Электрон словно бы размазан в пространстве в виде некоторого облака. Но плотность этого облака различна: как говорится, где густо, а где и пусто. Большей плотности облака соответствует большая вероятность нахождения электрона.

Все это не очень наглядно, но, право же, мы нарисовали картину, по возможности более точно передающую основную идею квантовомеханического атома. Добавим, самого простого атома — атома водорода с одним электроном. Когда электронов два или больше, все существенно усложняется, так как нужно учитывать явление взаимодействия электронов (электронных облаков).

Прочтя все это, вы можете резонно заметить: пусть действительно атом устроен так, как его описывает квантовая механика. Но, собственно говоря, каким же образом он связан с реальными свойствами химических элементов?

Оказывается, связан. Вся современная теория химической связи опирается на представление о квантовомеханическом атоме. Как именно — на этом мы не будем останавливаться. Обратим внимание на другое обстоятельство, на то, что от отвлеченной квантовомеханической модели можно перейти к уже знакомой нам, такой наглядной и зримой модели атома Бора.

Для этого нужно решить уравнение Шрёдингера. Как его решить — это объяснить непросто. Сообщим лишь конечный результат: оказывается, что волновая функция связана с тремя различными величинами, которые могут принимать только целочисленные значения. Более того, последовательность изменения этих величин такова, что они не могут быть ни чем иным, как квантовыми числами. Главным, орбитальным и магнитным.

Следовательно, наши знакомые n , l и m , получаются на основе весьма солидной физической теории — квантовой механики. А ведь они были введены когда-то специально для объяснения спектров различных атомов. Затем они весьма органично перекочевали в боровскую модель атома. И вот теперь выясняется, что квантовые числа получаются в результате решения важнейшего уравнения квантовой механики. Такова научная логика — к ней не подкопается даже самый суровый скептик.

Но ведь все это значит, что решение уравнения Шрёдингера в конечном счете приводит к выводу последовательности заполнения электронных оболочек и подоболочек атомов. К строгому физическому выводу. В этом главное достоинство атома квантовомеханического перед атомом Бора. И привычные для планетарного атома понятия можно пересмотреть под углом зрения квантовой механики.

Например, можно считать, что «орбита» — это некоторая совокупность вероятных положений данного электрона в атоме. Она соответствует определенной волновой функции.

Вместо термина «орбита» в современной атомной физике и химии употребляется термин «орбиталь» или «атомная орбиталь», например: s -орбитали, p -орбитали, d -орбитали, f -орбитали. Они отвечают значениям $l=0, 1, 2, 3...$

Итак, уравнение Шрёдингера — это словно вол-

шебная палочка, которая устраняет все недочеты, содержащиеся в формальной теории периодической системы. Превращает «формальное» в «фактическое».

В идеале это так, а в действительности далеко не так. Потому что уравнение имеет точное решение для атома водорода, самого простейшего из атомов, и только для него.

Для атома гелия и последующих точно решить уравнение Шрёдингера нельзя, поскольку прибавляются силы взаимодействия между электронами. А учесть их, правильно оценить их влияние на конечный результат — математическая задача невообразимой сложности.

Человеческим способностям она недоступна; только быстродействующие электронно-вычислительные машины, проводящие сотни тысяч операций в секунду, могут справиться с ней. Да и то лишь при условии, что программа для вычислений разрабатывается с многочисленными упрощениями и приближениями.

Искусственные элементы

Если спросить ученых, какие из открытий XX в. важнейшие, то едва ли кто-нибудь забудет назвать искусственный синтез химических элементов. За короткий срок — менее 40 лет — список известных химических элементов увеличился на 19. И все 19 элементов были синтезированы, приготовлены искусственным путем.

Слово «синтез» обычно обозначает процесс получения из простого сложного. Например, взаимодействие серы с кислородом есть химический синтез двуокиси серы SO_2 из элементов.

Синтез элементов можно понимать таким же образом: искусственное получение из элемента с меньшим зарядом ядра, меньшим порядковым номе-

ром элемента с большим порядковым номером. А сам процесс получения называется ядерной реакцией. Ее уравнение записывается так же, как и уравнение обыкновенной химической реакции. В левой части — реагирующие вещества, в правой — получающиеся продукты. Реагирующие вещества в ядерной реакции — это мишень и бомбардирующая частица.

Мишенью может служить практически любой элемент периодической системы (в свободном виде или в виде химического соединения).

Роль бомбардирующих частиц играют α -частицы, нейтроны, протоны, дейтроны (ядра тяжелого изотопа водорода), а также так называемые многозарядные тяжелые ионы различных элементов — бора, углерода, азота, кислорода, неона, аргона и других элементов периодической системы.

Чтобы произошла ядерная реакция, необходимо столкновение бомбардирующей частицы с ядром атома мишени. Если частица обладает достаточно большой энергией, то она может настолько глубоко проникнуть к ядру, что сольется с ним. Так как все перечисленные выше частицы, кроме нейтрона, несут положительные заряды, то, сливаясь с ядром, они увеличивают его заряд. А изменение значения Z и означает превращение элементов: синтез элемента с новым значением заряда ядра.

Чтобы найти способ ускорять бомбардирующие частицы, придавать им большую энергию, достаточную для их слияния с ядрами, изобрели и сконструировали специальный ускоритель частиц — циклотрон. Затем построили специальную фабрику новых элементов — ядерный реактор. Его прямое назначение — вырабатывать ядерную энергию. Но поскольку в нем всегда существуют интенсивные потоки нейтронов, то их легко использовать для целей искусственного синтеза. Нейтрон не имеет заряда, и пото-

му его не надо (да и невозможно) ускорять. Напротив, медленные нейтроны оказываются более полезными, чем быстрые.

Химикам пришлось изрядно поломать голову и проявить подлинные чудеса изобретательности, чтобы разработать способы отделения ничтожных количеств новых элементов от вещества мишени. Научиться изучать свойства новых элементов, когда в наличии были считанные количества их атомов...

Трудами сотен и тысяч ученых в периодической системе было заполнено девятнадцать новых клеток.

Четыре — в ее старых границах: между водородом и ураном.

Пятнадцать — за ураном.

Вот как все это происходило...

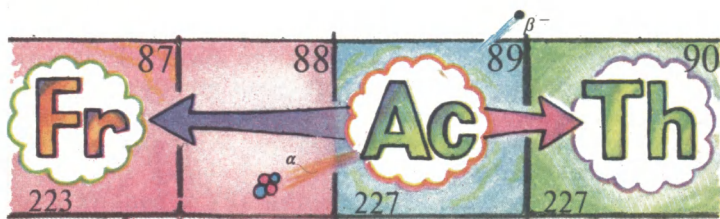
Технеций, прометий, астат, франций... Четыре места в периодической системе долго оставались пустыми. Это были клетки с № 43, 61, 85 и 87. Из четырех элементов, которые должны были занять эти места, три предсказаны Менделеевым: экамарганец — 43, экаиод — 85 и экацезий — 87. Четвертый — 61 — должен был принадлежать к редкоземельным элементам.

Эти четыре элемента были неуловимы. Усилия ученых, направленные на их поиски в природе, оставались безуспешными. С помощью периодического закона давно уже были заполнены все остальные места в таблице Менделеева — от водорода до урана.

Не один раз в научных журналах появлялись сообщения об открытии этих четырех элементов. Экамарганец «открывали» в Японии, где ему дали имя «ниппоний», в Германии назвали «мазурий». Элемент 61 «открывали» в разных странах по крайней мере трижды, он получал имена «иллиний»,

Схема образования элемента № 87 — франция. Некоторые радиоактивные изотопы могут распадаться двумя путями, например посредством и α - и

β -распада. Такое явление называется радиоактивной вилкой. Все природные радиоактивные семейства содержат вилки.



«флоренций», «циклоний». Экаиод находили в природе также неоднократно. Ему давали имена «алабамий», «гельвеций». Экацезий, в свою очередь, получал названия «виргиний», «молдавий». Некоторые из этих названий попадали в различные справочники и даже проникали в школьные учебники. Но все эти открытия не подтверждались: каждая раз точная проверка показывала, что допущена ошибка и случайные ничтожные примеси были приняты за новый элемент.

Долгие и трудные поиски привели наконец к открытию в природе одного из неуловимых элементов. Оказалось, что экацезий, который должен занимать в периодической таблице 87-е место, возникает в цепочке распада природного радиоактивного изотопа урана-235. Это короткоживущий радиоактивный элемент.

Элемент 87 заслуживает того, чтобы о нем рассказать подробнее.

...Теперь в любой энциклопедии, в любом учебнике по химии читаем: франций (порядковый

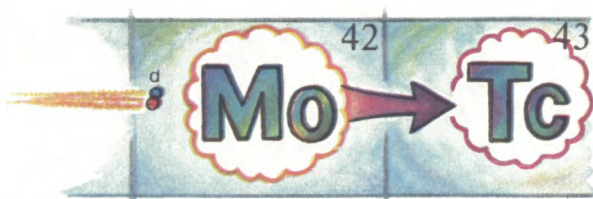
№ 87) открыт в 1939 г. французской ученой Маргаритой Перей. Кстати сказать, это третий случай, когда честь открытия нового элемента принадлежит женщине (раньше Мария Кюри открыла полоний и радий, Ида Ноддак — рений).

Как Перей все же удалось поймать неуловимый элемент? Вернемся на много лет назад. В 1914 г. три австрийских радиохимика — С. Мейер, В. Гесс и Ф. Панет — занялись изучением радиоактивного распада изотопа актиния с массовым числом 227. Было известно, что он входит в семейство актиноурана и испускает β -частицы; следовательно, продукт его распада торий. Однако у ученых мелькали смутные подозрения, что актиний-227 в редких случаях испускает и α -частицы. Иными словами, здесь наблюдается один из примеров радиоактивной вилки. Легко сообразить: в ходе такого превращения должен образовываться изотоп элемента 87. Мейер и его коллеги действительно наблюдали α -частицы. Требовались дальнейшие исследования, но они были прерваны первой мировой войной.

Маргарита Перей шла по тому же пути. Но в ее распоряжении были более чувствительные приборы, новые, усовершенствованные методы анализа. Поэтому-то ей и сопутствовал успех.

Франций относят к числу искусственно синтезированных элементов. Но все-таки сначала элемент был обнаружен в природе. Это изотоп франций-223. Его период полураспада составляет всего 22 мин. Становится понятным, почему франция так мало на Земле. Во-первых, из-за своей недолговечности он не успевает концентрироваться в сколь-либо заметных количествах, во-вторых, сам процесс его образования отличается невысокой вероятностью: всего 1,2% ядер актиния-227 распадается с испусканием α -частиц.

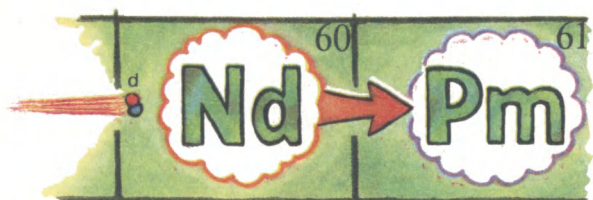
В связи с этим франций выгоднее готовить



искусственным путем. Уже получено 20 изотопов франция, и самый долгоживущий из них — франций-223. Работая с совершенно ничтожными количествами солей франция, химики сумели доказать, что по своим свойствам он чрезвычайно похож на цезий.

Элементы 43, 61 и 85 оставались неуловимыми. В природе их никак не удавалось найти, хотя ученые уже владели могучим методом, безошибочно указывающим путь для поиска новых элементов, — периодическим законом. Все химические свойства неизвестного элемента благодаря этому закону были известны ученым заранее. Так почему же были безуспешны поиски этих трех элементов в природе?

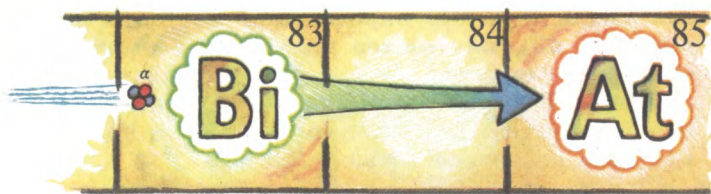
Изучая свойства атомных ядер, физики пришли к выводу: у элементов с атомными номерами 43, 61, 85 и 87 не могут существовать стабильные изотопы. Они могут быть только радиоактивными, с короткими периодами полураспада и должны быстро исчезать. Поэтому все эти элементы были созданы человеком искусственно. Пути для создания новых элементов были указаны периодическим законом. Попробуем с его помощью сами наметить путь синтеза экамарганца. Этот элемент 43 был первым искусственно созданным.



Химические свойства элемента определяются его электронной оболочкой, а она зависит от заряда атомного ядра. В ядре элемента 43 должно быть 43 положительных заряда, и вокруг ядра должны вращаться 43 электрона. Как же можно создать элемент с 43 зарядами в атомном ядре? Как можно доказать, что такой элемент создан?

Рассмотрим внимательно, какие элементы в периодической системе располагаются у пустого места, предназначенного для элемента 43. Оно находится почти в середине пятого периода. На соответствующих местах в четвертом периоде стоит марганец, а в шестом — рений. Поэтому химические свойства элемента 43 должны быть похожи на свойства марганца и рения. Недаром Д. И. Менделеев, предсказавший этот элемент, назвал его экамарганцем. Слева от клетки 43 находится молибден, занимающий клетку 42, справа, в 44-й — рутений.

Следовательно, чтобы создать элемент 43, необходимо увеличить число зарядов в ядре атома, имеющего 42 заряда, еще на один элементарный заряд. Поэтому для синтеза нового элемента 43 нужно взять в качестве исходного сырья молибден. У него в ядре как раз 42 заряда. Одним положительным зарядом обладает самый легкий элемент —



водород. Итак, можно ожидать, что элемент 43 может быть получен в результате ядерной реакции между молибденом и протоном.

Свойства элемента 43 должны быть сходными с химическими свойствами марганца и рения, и, для того чтобы обнаружить и доказать образование этого элемента, нужно воспользоваться химическими реакциями, аналогичными тем, с помощью которых химики определяют присутствие малых количеств марганца и рения.

Вот каким образом периодическая система дает возможность наметить путь для создания искусственного элемента.

Точно таким же путем, который мы только что наметили, и был создан в 1937 г. первый искусственный химический элемент. Он получил знаменательное имя — технеций — первый элемент, изготовленный техническим, искусственным путем. Вот как был осуществлен синтез технеция. Пластинка молибдена подвергалась интенсивной бомбардировке ядрами тяжелого изотопа водорода — дейтерия, которые были разогнаны в циклотроне до огромной скорости.

Ядра тяжелого водорода, получившие очень большую энергию, проникли в ядра молибдена. После

облучения в циклотроне пластинка молибдена была растворена в кислоте. Из раствора было выделено с помощью тех же реакций, которые необходимы для аналитического определения марганца (аналог элемента 43), ничтожное количество нового радиоактивного вещества. Это и был новый элемент — технеций. Вскоре были подробно изучены его химические свойства. Они точно соответствуют положению элемента в менделеевской таблице.

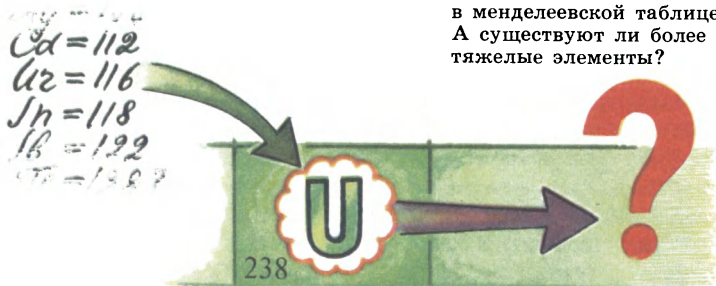
Теперь технеций стал вполне доступным: он образуется в довольно больших количествах в атомных реакторах. Технеций хорошо изучен, уже практически используется.

Метод, каким был создан элемент 61, очень похож на метод, которым получают технеций. Элемент 61 должен быть редкоземельным элементом: клетка 61 находится между неодимом (№ 60) и самарием (№ 62). Новый элемент впервые был получен в 1938 г. в циклотроне бомбардировкой неодима ядрами дейтерия. Химическим путем элемент 61 был выделен лишь в 1945 г. из осколочных элементов, образующихся в ядерном реакторе в результате деления урана.

Элемент получил символическое имя «прометий». Это название было дано ему неспроста. Древнегреческий миф рассказывает о том, что титан Прометей похитил с неба огонь и передал его людям. За это он был наказан богами: его приковали к скале и громадный орел ежедневно терзал его. Название «прометий» не только символизирует драматический путь похищения наукой у природы энергии ядерного деления и овладения этой энергией, но и предостерегает людей от страшной военной опасности.

Прометий теперь получают в немалых количествах: его используют в атомных батарейках — источниках постоянного тока, способных действовать без перерыва несколько лет.

Так уран стал
последним элементом
в менделеевской таблице.
А существуют ли более
тяжелые элементы?



Аналогичным путем был синтезирован и самый тяжелый галоген — экайод — элемент 85. Он впервые был получен бомбардировкой висмута (№ 83) ядрами гелия (№ 2), ускоренными в циклотроне до больших энергий.

Ядра гелия, второго элемента в периодической системе, обладают двумя зарядами. Поэтому для синтеза элемента 85 был взят висмут — элемент 83. Новый элемент назван астатом (неустойчивый). Он радиоактивен, быстро исчезает. Его химические свойства также оказались точно соответствующими периодическому закону. Он похож на йод.

Трансурановые элементы. Так называют искусственно синтезированные химические элементы, располагающиеся в периодической системе после урана. В настоящее время известно 15 таких элементов. Сколько их удастся синтезировать в будущем, пока никто определенно ответить не может.

Разрабатывая свою периодическую систему элементов, Д. И. Менделеев пришел к выводу, что атомный вес урана определен неправильно, и предложил увеличить его в 2 раза. Так уран стал замыкающим в естественном ряду химических элементов и был таковым на протяжении долгих 70 лет.

И все это время ученых, естественно, волновал вопрос: существуют ли в природе элементы тяжелее урана? Дмитрий Иванович полагал, что если трансурановые элементы и удастся когда-либо обнаружить в земных минералах, то число таких элементов должно быть ограничено. После открытия явления радиоактивности отсутствие трансурановых элементов в природе объясняли тем, что периоды их полураспада невелики и все они распались, превратились в более легкие элементы, очень давно, на самых ранних стадиях эволюции нашей планеты. Но уран, оказавшийся радиоактивным, имел настолько большую продолжительность жизни, что сохранился до нашего времени. Почему же хотя бы ближайшим трансуранам природа не могла отпустить столь же щедрое время на существование? Вопрос этот оставался без ответа, однако никаких элементов тяжелее урана в земных недрах не обнаруживалось. Было много сообщений об открытии якобы новых элементов внутри системы — между водородом и ураном, но почти ни разу научные журналы не писали об обнаружении трансуранов. Ученые лишь спорили, в чем причина обрыва периодической системы на уране.

Только ядерный синтез позволил установить интересные обстоятельства, о которых раньше даже нельзя было подозревать.

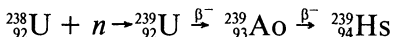
Первые исследования по синтезу новых химических элементов были направлены на искусственное получение трансуранов. О первом искусственном трансурановом элементе заговорили на три года раньше, чем появился на свет технеций. Стимулирующим событием оказалось открытие нейтрона. Элементарная частица, лишенная заряда, обладала огромной проникающей способностью, могла достичь атомного ядра, не встречая никаких препятствий, и вызывать превращения различных элементов. Нейтронами стали обстреливать мишени из самых разных

веществ. Пионером исследований в этой области стал выдающийся итальянский физик Э. Ферми.

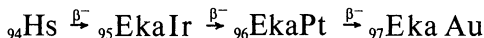
Уран, облученный нейтронами, обнаруживал неизвестную активность с небольшим периодом полураспада. Каким образом? Ход рассуждений мог быть таков: уран-238, поглотив нейтрон, превращается в неизвестный изотоп элемента уран-239, который является β -радиоактивным и должен превращаться в изотоп элемента с порядковым номером 93. Подобный вывод и сделал Ферми со своими коллегами.

В действительности потребовалось очень много усилий, чтобы доказать, что неизвестная активность действительно соответствует первому трансурановому элементу. Химические операции привели к выводу: новый элемент по своим свойствам похож на марганец, т. е. принадлежит к VII б-подгруппе. Этот аргумент оказался впечатляющим: в то время (в 30-х гг.) почти все химики полагали, что если бы трансурановые элементы существовали, то по крайней мере первые из них были бы аналогами d -элементов из предыдущих периодов. Это была ошибка, которая, несомненно, повлияла на ход истории открытия элементов тяжелее урана.

Словом, в 1934 г. Э. Ферми уверенно заявлял о синтезе не только элемента 93, которому дал название «аузоний», но и его правого соседа по таблице Менделеева — «гесперия» ($Z=94$). Последний был продуктом β -распада аузония:



Нашлись ученые, которые «потянули» эту цепочку еще дальше. Среди них были немецкие исследователи О. Ган, Л. Мейтнер и Ф. Штрассманн. В 1937 г. уже говорили, как о чем-то реальном, об элементе № 97:

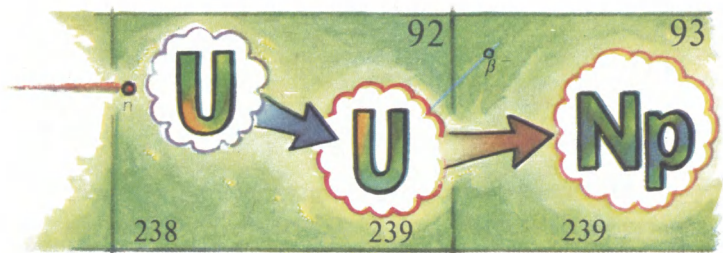


Но ни один из новых элементов не был получен в сколь-либо заметных количествах, не был выделен в свободном виде. Об их синтезе судили по разнообразным косвенным признакам.

Все это порождало сомнения, которые становились все более основательными. В конечном счете оказалось, что все эти эфемерные вещества, принимавшиеся с таким энтузиазмом за трансурановые элементы, на самом деле представляют собой элементы, относящиеся... к середине периодической системы, т. е. искусственные радиоактивные изотопы давным-давно известных химических элементов.

Это стало ясно, когда О. Ган и Ф. Штрассманн сделали 22 декабря 1938 г. одно из величайших открытий XX в. — открытие деления урана под действием медленных нейтронов. Ученые неопровержимо установили, что в уране, облученном нейтронами, содержатся изотопы бария и лантана с порядковыми номерами 56 и 57. Они могли образоваться лишь при допущении, что нейтроны как бы разваливают ядра урана на несколько более мелких осколков.

Механизм деления объяснили Л. Мейтнер и О. Фриш. Уже существовала так называемая капельная модель ядра: атомное ядро уподоблялось капле жидкости. Если капле придать достаточную энергию, возбудить ее, то она может разделиться на более мелкие капли. Так же и ядро, приведенное нейтроном в возбужденное состояние, способно распасться, разделиться на более мелкие части — ядра атомов более легких элементов. В настоящее время известно, что при делении урана под действием нейтронов образуются изотопы элементов в интервале порядковых номеров от 30 до 64 — от цинка до гадолиния. Образующиеся при делении радиоактивные изотопы связаны цепочками последовательных β^- -превращений, заканчивающимися стабильными изотопами. Не мудрено, что в такой сложной смеси мож-



но было обнаружить что угодно и принять найденное за новые трансураны...

В 1940 г. советские ученые Г. Н. Флеров и К. А. Петржак доказали, что деление урана может происходить самопроизвольно. Так был открыт новый вид радиоактивных превращений, встречающихся в природе, спонтанное деление урана. Это было исключительно важное открытие.

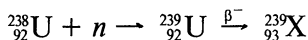
Вскоре оказалось, что неправильно объявлять ошибочными исследования по трансуранам в 30-х гг. И в экспериментах Ферми, и в опытах его немецких коллег, несомненно, рождались следы элементов тяжелее урана. Два основных природных изотопа имеет уран: уран-238 (существенно преобладающий) и уран-235. Второй из них главным образом и делится под действием медленных нейтронов, тогда как первый, поглощая нейтрон, лишь превращается в более тяжелый изотоп — уран-239, причем это поглощение тем интенсивнее, чем быстрее бомбардирующие нейтроны. Поэтому в первых попытках синтеза трансуранов эффект замедления нейтронов привел к тому, что при «обстреле» мишени из природного урана, содержащей ^{238}U и ^{235}U , превалировал процесс деления.

Но уран-238, поглотивший нейтрон, должен был непременно дать начало цепочке образования трансурановых элементов. Требовалось найти надежный способ поймать атомы элемента 93 в сложнейшей



мешанине осколков деления. Сравнительно меньшие по массе, эти осколки в процессе бомбардировки урана должны были отлетать на большие расстояния (иметь большую длину пробега), нежели весьма массивные атомы элемента 93.

Эти рассуждения положил в основу своих экспериментов американский физик Э. Макмиллан, работавший в Калифорнийском университете. Весной 1939 г. он стал тщательно исследовать распределение осколков деления урана по длине пробегов. Ему удалось отделить маленькую порцию осколков с незначительной длиной пробега. Именно в этой порции он обнаружил следы радиоактивного вещества с периодом полураспада 2,3 дня и высокой интенсивностью излучения. Такой активности не наблюдалось в других фракциях осколков. Макмиллану удалось показать, что это вещество X является продуктом распада изотопа уран-239:



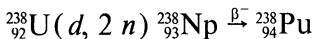
К работе подключился химик Ф. Эйблсон. Оказалось, что радиоактивное вещество с периодом полураспада 2,3 дня химически может быть отделено от урана и тория и не имеет ничего общего с рением. Так рухнуло предположение, что элемент 93 должен быть экаремием.

Об успешном синтезе нептуния (новый элемент был назван в честь планеты Солнечной системы) объявил американский журнал «Физическое обозре-

ние» в начале 1940 г. Так началась эпоха синтеза трансурановых элементов, который оказался весьма важным для дальнейшего развития менделеевского учения о периодичности.

Действительно, периоды полураспада даже самых долгоживущих изотопов трансурановых элементов, как правило, значительно уступают возрасту Земли, а потому их существование в природе в настоящее время практически исключено. Таким образом стала ясной причина обрыва естественного ряда химических элементов на уране — элементе 92.

За нептунием последовал плутоний. Он был синтезирован по ядерной реакции:

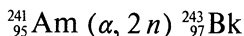


зимой 1940—1941 гг. американским ученым Г. Сиборгом с сотрудниками (в лаборатории Г. Сиборга впоследствии было синтезировано еще несколько новых трансурановых элементов). Но самым важным изотопом плутония оказался ${}^{239}\text{Pu}$ с периодом полураспада 24 360 лет. Помимо того, что он имеет довольно большую продолжительность жизни, плутоний-239 под действием медленных нейтронов делится гораздо интенсивнее, чем уран-235, а потому является превосходным ядерным горючим. Этот изотоп был использован и при создании ядерного оружия, в связи с чем химические и физические свойства плутония изучили весьма тщательно, и нет ничего удивительного, что элемент 94 ныне считается одним из наиболее изученных среди всех химических элементов.

Позднее, уже в 50-х гг., ничтожные количества нептуния и плутония удалось обнаружить в природе. Они образуются как продукты воздействия природных нейтронов на уран.

В 40-х гг. было синтезировано еще три элемента тяжелее урана: америций (назван в честь Америки),

кюри (в честь М. и П. Кюри) и берклий (в честь г. Беркли в Калифорнии). Мишенью в ядерных реакциях синтеза служил плутоний-239, бомбардируемый нейтронами и α -частицами, и америций (его облучение α -частицами привело к синтезу берклия):



Пятидесятые годы начались с синтеза калифорния ($Z=98$) (назван в честь штата Калифорния). Его удалось осуществить тогда, когда был накоплен в значительных количествах долгоживущий изотоп кюри-242 и из него изготовлена мишень. Ядерная реакция ${}_{96}^{242}\text{Cm} (\alpha, 2n) {}_{98}^{244}\text{Cf}$ привела к синтезу первых атомов элемента 98.

Но после успешного синтеза калифорния наступила пора раздумий.

Чтобы двигаться дальше, к элементам 99 и 100, прежде следовало позаботиться о накоплении исходного «сырья»: весовых количеств берклия и калифорния. Обстрел изготовленных из них мишеней α -частицами давал реальные основания синтезировать новые элементы. Но слишком малы были периоды полураспада (часы и минуты) синтезированных изотопов элементов 97 и 98, и это оказывалось препятствием для накопления их в необходимых количествах.

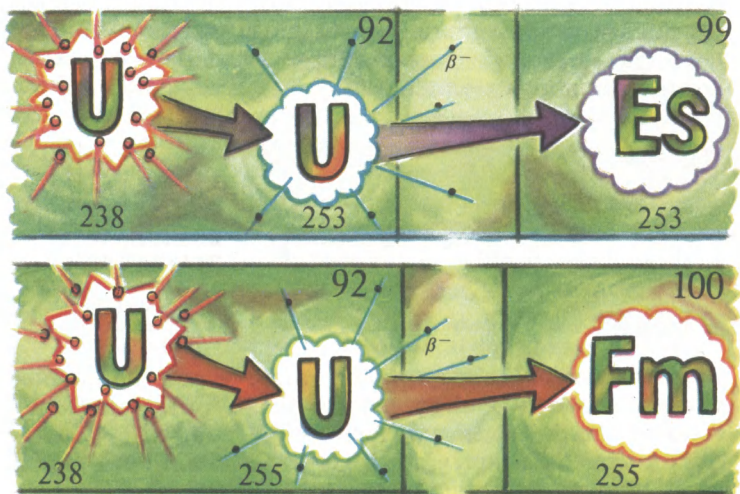
Предлагался и другой путь: длительное облучение плутония интенсивным потоком нейтронов. Но пришлось бы долгие годы ждать результатов (в свое время, чтобы получить один из изотопов берклия в чистом виде, плутониевую мишень облучали нейтронами в ядерном реакторе целых шесть лет!) Существенно сократить время синтеза можно было лишь одним-единственным способом: резко увеличить мощность нейтронного пучка. В лабораториях такое оказывалось невозможным.

На помощь пришел термоядерный взрыв. 1 ноября 1952 г. американцы произвели взрыв термоядер-

ного устройства на атолле Эниветок в Тихом океане. На месте взрыва собрали несколько сотен килограммов почвы, исследовали образцы. В результате удалось обнаружить изотопы элементов 99 и 100, названных соответственно эйнштейнием (в честь А. Эйнштейна) и фермием (в честь Э. Ферми).

Образующийся при взрыве поток нейтронов оказался настолько мощным, что ядра урана-238 сумели поглотить за очень короткий промежуток времени большое число нейтронов.

Эти сверхтяжелые изотопы урана в результате цепочек последовательных β^- - распадов превратились в изотопы эйнштейния и фермия.



Элемент имени Менделеева. Менделевием назван химический элемент 101, синтезированный американскими физиками во главе с Г. Сиборгом в 1955 г. Авторы синтеза назвали новый элемент «в честь признания заслуг великого русского химика, кото-

рый первым использовал для предсказания свойств неоткрытых химических элементов периодическую систему».

В истории синтеза трансуранов получение менделевия стало переломным моментом. Но ученым в какой-то степени повезло. Во-первых, удалось накопить достаточное количество эйнштейния, чтобы приготовить из него мишень (количество эйнштейния измерялось миллиардом атомов); облучая ее α -частицами, можно было рассчитывать на синтез ядер элемента 101: ${}_{99}^{253}\text{Es}(\alpha, n){}_{101}^{256}\text{Md}$. Во-вторых, период полураспада полученного изотопа ${}^{256}\text{Md}$ оказался значительно большим, чем предполагали теоретики. И хотя в результате синтеза были получены считанные атомы менделевия, оказалось возможным изучить их химические свойства теми же методами, которые использовались для предшествующих трансуранов.



Элемент 101 заслуживает того, чтобы подробнее рассказать о его синтезе. На тончайший листочек золотой фольги нанесли невидимое покрытие — миллиард атомов эйнштейния. По сравнению с их ценой цена золота была поистине смехотворна... Стремительные α -частицы пробивали фольгу с обратной стороны и бомбардировали атомы эйнштейния. Лишь в очень редких случаях при соударениях протекала ядерная реакция и синтезировались ядра менделевия. Они вылетали с поверхности фольги и оседали на другом, расположенном рядом листочке из золо-

та. Таким способом атомы элемента 101 выделялись из сложной смеси эйнштейния и продуктов его радиоактивного распада. Листочек растворялся в кислоте, и раствор пропускался через хроматографическую колонку. Самый ответственный момент — уловить, когда порция раствора, содержащая менделевий, выходит из раствора, и зафиксировать акт спонтанного деления, посредством которого распадается ядро.

В первом эксперименте удалось зарегистрировать лишь пять (!) событий — пять случаев спонтанного деления менделевия, а также оценить химическую природу нового элемента.

Почему же синтез его оказался переломным и в трансурановой эпопее? Все прежние способы синтеза (бомбардировка мишеней легкими ядерными снарядами — протонами, дейтронами, нейтронами и α -частицами) исчерпали свои возможности. Элемент 101 был все же настолько короткоживущим, что говорить о возможности его накопления в нужных для изготовления мишени количествах просто не имело смысла. Не было сомнений в том, что последующие, еще не известные трансураны могут существовать секунды и доли секунды. Поэтому прежние физико-химические методы их исследования становились непригодными.

Существуют ли способы синтеза трансуранов с $Z > 101$? Если да, то какими методами реально получать и изучать новые элементы, которые наверняка будут представлены единичными и притом весьма короткоживущими атомами?

Элементы-призраки. Иначе их трудно назвать. Хотя синтез каждого из них — это настоящий научно-технический подвиг, их исследование принесит новую информацию, расширяющую наши представления о периодической системе.

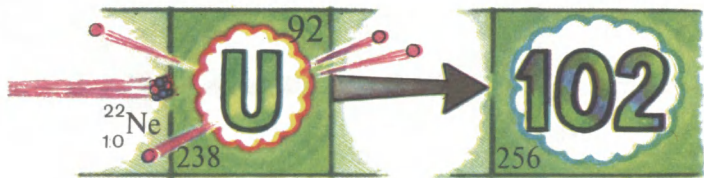
Символы этих элементов, стоящие в периодической системе, образно говоря, не имеют материаль-

ного обеспечения. Все их синтезированные изотопы живут столь недолго, что ученым приходится проявлять максимум изобретательности, чтобы за очень короткое время успеть дать оценку важнейшим свойствам элементов с порядковыми номерами: 102—107. Всякий раз, когда требуется повторить химическое исследование или предпринять новое, приходится снова повторять сам процесс ядерного синтеза.

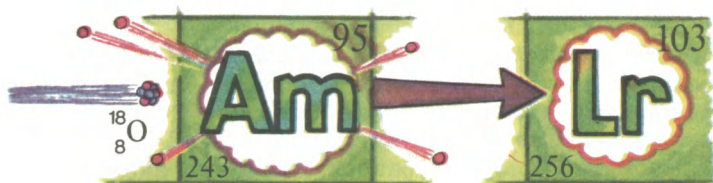
В периодической системе на с. 63 символ элемента 102, nobelium, взят в скобки: (No). В этом есть резон. О синтезе nobelium сообщили в 1957 г. сотрудники интернациональной группы физиков и химиков, работавшей в Нобелевском институте (Стокгольм). Они применили принципиально новый метод для синтеза трансурановых элементов: использовали в качестве бомбардирующих частиц ускоренные тяжелые ионы (так в ядерной физике называют ионы элементов с $Z > 2$). Поэтому отпадала проблема мишеней: их можно изготавливать из вполне доступных элементов. В данном случае мишень из кюрия обстреливалась многозарядными (лишенными нескольких электронов) ионами ^{13}C . Исследователи пришли к выводу, что в ходе этой ядерной реакции образуется изотоп элемента 102 и дали ему название «нобелий».

Вывод оказался поспешным. Ученые других стран не подтвердили его. Появилась даже горькая шутка: от nobelium осталось одно «No» (No по-английски означает «нет»). А достоверный синтез этого элемента осуществили советские ученые во главе с Г. Н. Флеровым — в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне — в 1962—1967 гг. С этого времени работы советских исследователей в области синтеза трансурановых элементов начали играть ведущую роль.

Но символ No пока так и остается в периодической системе. Возможно, уже в силу привычки, хотя это и несправедливо. Потому мы и взяли его в скобки.



Непростой была история и элемента 103 — лоуренсия. Его символ также стоит в скобках. В 1961 г. американские ученые сообщили, что при бомбардировке мишени из калифорния ионами бора образуются элемент с $Z=103$, и дали ему название в честь изобретателя циклотрона Э. Лоуренса. Этот результат оказался не бесспорным. Только в 1965 г. советские физики синтезировали изотоп очередного трансуранового элемента по ядерной реакции ${}^{243}_{95}\text{Am}({}^{18}_8\text{O}, 5n){}^{256}_{103}\text{Lr}$, причем этот результат оказался весьма надежным и получил подтверждение.



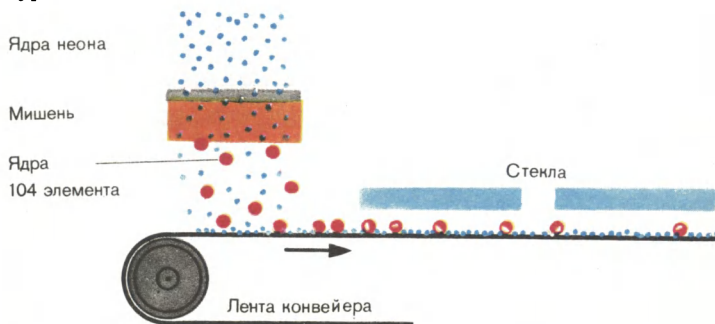
А годом раньше исследователи из Дубны пошли на штурм элемента 104. В течение 40 часов поток ускоренных ядер неона падал на плутониевую мишень. Лишь в единичных случаях происходило слияние ядер неона и плутония — в итоге рождались еще никем не пойманные ядра элемента 104. Доказать их синтез оказалось не простым делом. Ученые справедливо предполагали, что основным видом радиоактивного превращения элемента 104 будет



спонтанное деление. Как «поймать» осколки деления? Взяли специальное стекло, на котором осколки оставляли чуть заметные следы (лунки). К этим стеклам синтезировавшиеся ядра 104-го переносились на специальных лентах. По числу лунок и их расположению на стеклах рассчитывался период полураспада. Он оказался весьма небольшим — 0,3 с (как оказалось через несколько лет — еще меньше). Но ведь нужно еще выяснить, что представляет собой новый элемент с химической точки зрения. Как это сделать, если в распоряжении ученых считанные атомы, живущие доли секунды?

Советские ученые разработали простой и оригинальный способ. Синтезированные ядра элемента 104 обладают большим импульсом и выскакивают из мишени. Они попадают в струю азота и тормозятся в ней. Затем вовлекаются в химическую реакцию: взаимодействуют с атомами хлора. Тут наступает решающий момент, когда должна определиться природа нового элемента: как поведет себя его хлорид? А свойства хлорида зависят от того, является ли № 104 химическим аналогом гафния или же продолжает ряд актиноидов. Хлорид пропускается через специальный фильтр; если он $(104) \text{Cl}_4$, то легко проходит через фильтр; если же $(104) \text{Cl}_3$, то застревает в нем. На деле реализовалась первая возможность, что доказывало: курчатовий — химический аналог гафния, принадлежит к IVб-подгруппе. Советские ученые предложили назвать элемент курчатовием — в честь выдающегося советского ученого-физика И. В. Курчатова.

Схема устройства,
применявшегося в
опытах по синтезу
курчатовия.



Семидесятые годы начались синтезом элемента с $Z=105$. В Дубне использовали ядерную реакцию ${}^{243}_{95}\text{Am}({}^{22}_{10}\text{Ne}, 4n){}^{261}_{105}\text{Ns}$. Новый элемент получил имя «нильсборий», в честь великого датского физика Н. Бора. По своим химическим свойствам он оказался подобным танталу, т. е. элементом Vб-подгруппы. Период полураспада Ns составляет всего 2 с.

Хронологические таблицы свидетельствуют: в 1974 г. был синтезирован элемент 106, в 1976 г. — 107. Они пока не имеют названий. И это неспроста: слишком острой была дискуссия по поводу приоритета синтеза элементов с $Z=102—105$. Например, ученые США до сих пор записывают синтез элементов 103, 104 и 105 на свой счет, а для 105-го предлагают свое название — ганий (в честь О. Гана). В столь

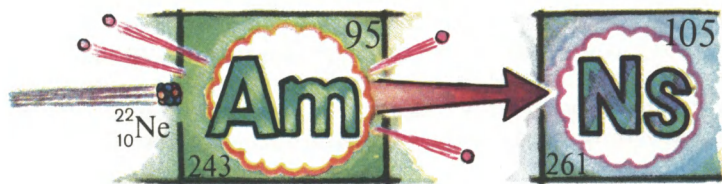
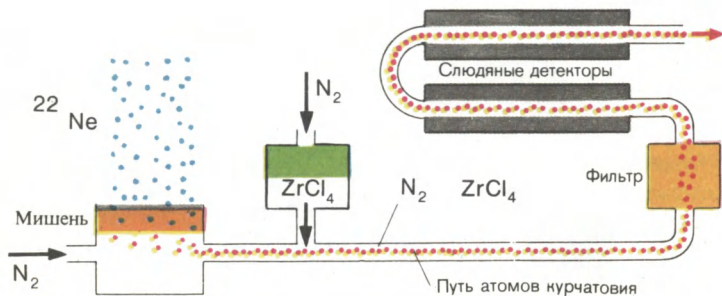


Схема установки, позволяющей изучать химическую природу единичных атомов. На этой установке было

показано, что курчатовий — аналог гафния, а нильсборий — тантала.



сложной области исследований весьма возможны и ошибки и противоречивые результаты.

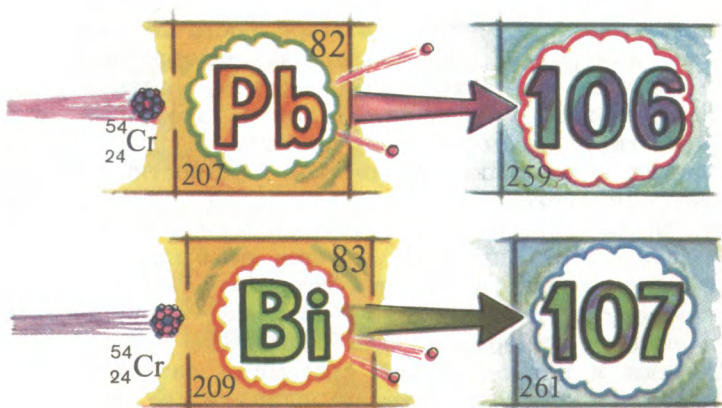
Вот почему советские ученые, синтезировавшие элементы 106 и 107, пока воздержались от их наименований.

Метод же синтеза двух последних из известных трансуранов — принципиально новый. Для синтеза всех прочих трансуранов всегда применялась мишень, которая сама была радиоактивной и тем самым создавала определенные помехи, или, как говорят физики, фон. Это нередко затрудняло правильное объяснение полученных результатов.

Физики из Дубны решили взять мишени, изготовленные из стабильных элементов — свинца и висмута. Ведь после них все элементы в периодической системе радиоактивны. Но такой выбор требовал использовать в качестве бомбардирующих частиц многозарядные ионы элементов, располагающихся в середине таблицы Менделеева. Если цель заключалась в синтезе элементов 106 и 107, то простой подсчет показывал: требуется ускорять ионы хрома, элемента 24.

Современной ускорительной технике это было под силу.

Вот какие ядерные реакции были осуществлены в Дубне:



Синтезированные изотопы живут сотые и тысячные доли секунды. Их химическую природу пока не определяли. Но едва ли можно сомневаться, что элемент 106 окажется «экавольфрамом», а 107 — «экарением».

А что же дальше? Будут ли синтезированы новые химические элементы с большими порядковыми номерами?

Взгляд в будущее

Незадолго до смерти, 10 июля 1905 г., Дмитрий Иванович Менделеев записал в своем дневнике: «По-видимости, периодическому закону — будущее не грозит разрушением, а только надстройки и развитие обещает...» И этот последний прогноз, сделанный великим ученым, многократно оправды-

вался. За восемь десятилетий, прошедших с той поры, стал ясным физический смысл учения о периодичности, в нем обнаружались новые грани.

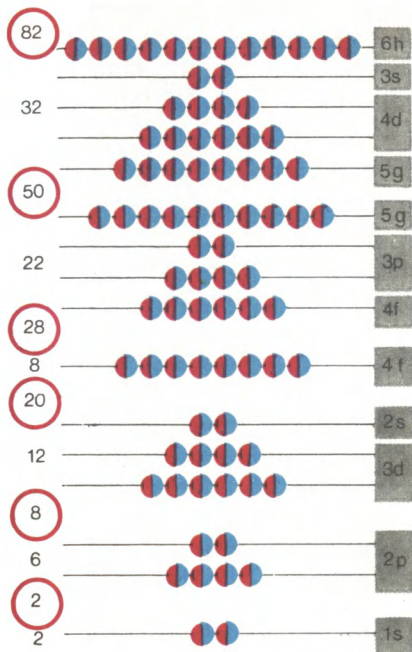
Периодически изменяются не только свойства химических элементов по мере роста их порядковых номеров в таблице, также периодически изменяются и повторяются сходные электронные конфигурации внешних оболочек атомов в зависимости от увеличения заряда ядра. И здесь заключается объяснение физической сущности явления периодичности.

Были открыты все химические элементы, которые существуют в природе, но еще не были известны в начале XX в. И искусственно синтезировано почти два десятка элементов, не содержащихся в земных минералах. Они заполнили пустовавшие клетки в периодической системе и заметно «надстроили» ее, существенно сдвинув ее верхнюю границу.

Применение методов квантовой механики позволило теоретикам изучать механизм химической связи, предсказывать возможность синтеза ранее не известных соединений, объяснять особенности протекания химических реакций.

Все это особенно яркие свидетельства развития учения о периодичности. Ныне его можно уподобить могучему дереву, в кроне которого нет веточек, обреченных на засыхание. Напротив, то и дело появляются молодые зеленые росточки...

В заключение мы расскажем о некоторых наиболее важных проблемах периодического закона, которые еще далеки от своего окончательного решения. И между тем это как раз те «надстройки», правильное «архитектурное решение» которых позволит в новом свете взглянуть на явление периодичности.



На этой схеме показана последовательность заполнения протонных и нейтронных оболочек в ядрах по мере роста Z и N . Как видно, она отличается от последовательности формирования электронных конфигураций атомов.

Периодический закон атомных ядер. Следствием открытия в 1932 г. нейтрона было не только возникновение современной экспериментальной ядерной физики, но и разработка протонно-нейтронной схемы строения атомных ядер. Раньше, на протяжении почти двух десятилетий, полагали, что ядра состоят из протонов и электронов. Такое представление об устройстве ядер сталкивалось все с большим числом противоречий и становилось тормозом для развития науки. Поэтому идея о том, что ядро состоит из протонов и нейтронов, была не менее важной, чем сама Резерфордская идея о ядерной модели атома.

Новая точка зрения о строении ядра связана с именами советского ученого Д. Д. Иваненко и немецкого — В. Гейзенберга. Но чтобы она стала жизнеспособной, протонно-нейтронную схему строения ядра следовало облечь в определенную, теоретически обоснованную модель. Одной из таких моделей стала так называемая оболочечная модель ядра. В соответствии с ней, в ядрах существуют вполне определенные протонные и нейтронные оболочки конечной емкости, подобно электронным оболочкам в атомах.

Как мы знаем, последовательность формирования электронных конфигураций атомов подчиняется четким закономерностям. Такие же закономерности лежат в основе заполнения протонных и нейтронных оболочек (нуклонных оболочек — от общего названия ядерных протонов и нейтронов: нуклоны) в ядрах. И эта последовательность также может быть установлена на основе квантовомеханических методов. Оказывается, и в ядрах существуют *s*-, *p*-, *d*-, *f*-, *g*-подоболочки и т. д., и каждая из них вмещает столько же нуклонов, сколько электронов вмещает соответствующая электронная подоболочка. Но вот последовательность построения ядерных подоболочек иная, более причудливая, чем электронных — в атомах.

Согласно оболочечной модели, наиболее устойчивыми являются протонные и нейтронные оболочки, которые содержат 2, 8, 20, 50, 82 протона или нейтрона и 126 нейтронов. Атомные ядра, в которых эти оболочки заполнены, получили название магических. «Магия» здесь заключалась в том, что соответствующие ядра обладают особыми свойствами. Так, изотопы с «магическим» числом протонов или нейтронов характеризуются повышенной распространенностью в природе. Элементы, отвечающие «магическим» значениям *Z*, имеют

много стабильных изотопов (например, олово с $Z=50$ представлено десятью природными изотопами). Наконец, «магические» ядра весьма прочны, они наиболее «инертны» по отношению к захвату нейтронов в ядерных реакциях. Все четыре семейства радиоактивных превращений заканчиваются стабильными изотопами, содержащими «магические» числа протонов ($^{206}_{82}\text{Pb}$, $^{207}_{82}\text{Pb}$, $^{208}_{82}\text{Pb}$, $Z = 82$) или нейтронов ($^{209}_{83}\text{Bi}$, $N = 126$).

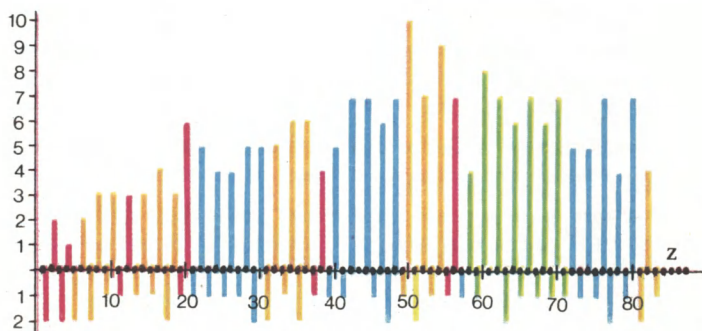
Изучая различные свойства атомных ядер (распространенность в природе, величины дефектов масс и энергий связи, радиоактивные характеристики), ученые пришли к выводу, что в изменении этих свойств просматривается определенная периодичность, связанная с особенностями строения ядер. При этом особую роль играют «магические» ядра.

А можно ли построить периодическую систему атомных ядер по аналогии с периодической системой элементов? За основу берется принцип: «магические» ядра служат границами периодов. Точно так же, как границами периодов в системе элементов служат инертные газы с порядковыми номерами 2, 10, 18, 36, 54 и 86. Но аналогия эта во многом носит приблизительный характер. Помимо «магических» чисел протонов и нейтронов выявлены еще так называемые субмагические числа (например, 14 и 28), имеющие важное значение в проявлении ядерной периодичности. Наконец — и это весьма существенно — принципиально различаются силы, действующие в атомах (кулоновские) и в ядрах (ядерные).

В настоящее время еще не разработана периодическая система атомных ядер (изотопов), которая была бы так же информативна, как периодическая система элементов. Кстати, еще и потому, что пока нам известно лишь 1/4 всех атомных ядер, принци-

Здесь показаны числа
стабильных изотопов
для элементов с четными

и нечетными порядковыми
номерами



пиально способных к существованию (т. е. живущих определенное, хотя и очень малое время).

Мы знаем, что в природе существует 280 стабильных изотопов. Некоторые из них лишь по привычке считаются стабильными. На самом деле они в слабой степени радиоактивны (таких изотопов около 20, и большинство из них имеют гигантские периоды полураспада). Однако совершенно бесспорно, что новых стабильных изотопов в природе не удастся обнаружить.

Мы почти совершенно точно знаем: в естественные радиоактивные семейства входит 46 изотопов: 18 — в семейство урана-238, 15 — в семейство урана-235 и 13 — в семейство тория-232. Между прочим, науке еще не совсем ясно, почему эти три цепочки радиоактивных превращений имеют различную «длину». Быть может, еще удастся обнаружить отдельные изотопы — продукты «разветвлений» радиоактивных превращений (подобно изотопам астата и франция). Но они практически не изменяют общего числа изотопов, содержащихся в природе. Некоторые радиоактивные изотопы постоянно образуются

в результате природных ядерных реакций: например, углерод с массовым числом 14 и тритий — сверхтяжелый изотоп водорода с массовым числом 3.

За 50 лет, прошедших со времени открытия искусственной радиоактивности, посредством различных ядерных реакций — в реакторах и на ускорителях — искусственно приготовлено около 1600 изотопов для всех, без исключения, элементов (для некоторых — более 20 искусственных разновидностей атомов). И пока мы точно не знаем, сколько таких изотопов еще удастся получить, хотя теория определяет число ядер, принципиально способных существовать, равным ≈ 6000 .

Многое в мире изотопов пока остается для нас неясным. Почему, например, четверть стабильных элементов представлена в природе одной-единственной разновидностью атомов, всего лишь одним изотопом? И почему элементы с нечетными порядковыми номерами не могут иметь более двух стабильных изотопов? Существует ли какая-нибудь закономерность в изменении периодов полураспада радиоактивных изотопов одного и того же элемента (ведь эти величины могут различаться на много порядков)? Современные варианты периодической системы изотопов не дают ответов на эти вопросы. Точно так же нам не известно, существует ли какая-нибудь закономерная связь между электронной и ядерной периодичностью? Может ли последовательность заполнения нуклонных оболочек как-либо влиять на ход заполнения электронных оболочек?

Все эти проблемы должны найти свое решение в будущем.

Где предел числа элементов? В 1930 г. в Германии вышла книга (существует и ее русский перевод) «Периодическая система химических элементов. История и теория». Теперь она является библиографи-











ческой редкостью. Это была первая монография, в которой подробно рассматривались строение атома и теоретические основы периодической системы. Авторы работы Е. Рабинович и Э. Тило специально обсуждали вопрос о причинах «обрыва» естественного ряда элементов на уране. Они рассматривали две такие причины: первая — «исчерпание» периодической системы после урана связано с неустойчивостью ядер с зарядами более 92; вторая — неустойчивость трансурановых элементов зависит от взаимодействия их электронных оболочек с ядрами, резко уменьшающего стабильность ядер.

Вторая причина казалась наименее вероятной. Интересно, что еще в середине 20-х гг. ученые произвели расчет, согласно которому «предельный» атом должен иметь заряд, равный 137. При такой величине Z электрон с ближайшей к ядру K -оболочки должен был мгновенно захватываться ядром, и его заряд уменьшался тем самым на единицу. Правда, при этом не принималось во внимание, что все неизвестные элементы, вплоть до 137-го, должны были бы быть сильно радиоактивными. Расчеты такого рода делались и позднее. Менялись исходные условия. И результаты, естественно, получались разные. Например, в одной из работ критическое значение Z оценивалось равным 170. Эту причину мы примем к сведению. Скорее всего, положение верхней границы периодической системы элементов связано с неустойчивостью атомных ядер с большими значениями Z .

Словом, в 30-х гг. вопрос о верхней границе системы особого интереса не вызывал. Уже первые опыты по синтезу трансурановых элементов (см. с. 96—98) показали, что периоды полураспада последних невелики, чем и должно объясняться отсутствие этих элементов в природе. Но почему после урана долговечность элементов столь стремительно пада-

ет? На этот вопрос даже сейчас нет вполне однозначного ответа.

Успешный синтез трансурановых элементов после 1940 г., изучение радиоактивных характеристик их изотопов приводили к четкому выводу: по мере роста Z продолжительность жизни даже наиболее долгоживущих разновидностей атомов заметно уменьшается. И чем больше Z , тем это уменьшение становится все более резким. Главным видом радиоактивных превращений в области трансурановых элементов является спонтанное деление. Приведем величины периодов полураспадов по спонтанному делению для наиболее долгоживущих изотопов трансуранов от нептуния до менделевия:

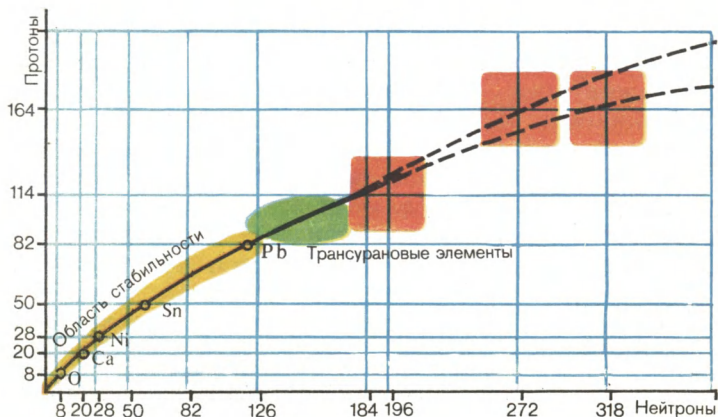
⁹³  ²³⁷ $2,2 \cdot 10^6$ лет	⁹⁴  ²⁴⁴ $7,6 \cdot 10^7$ лет	⁹⁵  ²⁴³ 7370 лет	⁹⁶  ²⁴⁷ $1,64 \cdot 10^7$ лет	⁹⁷  ²⁴⁷ 1380 лет
⁹⁸  ²⁵¹ 800 лет	⁹⁹  ²⁵⁴ 276 суток	¹⁰⁰  ²⁵⁷ 94 суток	¹⁰¹  ²⁵⁸ 56 суток	

Период полураспада элемента 102 (самого долгоживущего изотопа ²⁵⁹102) составляет 1,5 часа. Для всех последующих элементов его величина резко уменьшается от минут до тысячных долей секунды. Поэтому теоретики выносили пессимистическое заключение: предельное значение порядкового номера, при котором новые синтезируемые ядра будут спонтанно делиться фактически в момент образования, должно находиться в области $Z=108-110$.

На какой-то момент в вопросе о положении верхней границы периодической системы наступила оп-

На протонно-нейтронной диаграмме ядер красные квадраты соответствуют

«островкам относительной стабильности» ядер в области больших значений Z и N .



ределенная ясность. Хоть и следовало сожалеть, что природа так резко ограничивает возможности искусственного синтеза новых элементов. Однако в середине 60-х гг. физики-теоретики решили, что последнее слово произнесено слишком рано. Была сформулирована одна смелая гипотеза, которая в литературе сокращенно именуется гипотезой ООС: гипотеза об островках относительной стабильности. А содержание гипотезы состоит в следующем: в области некоторых больших значений Z и N (N — число нейтронов) соответствующие ядра могут иметь очень большие значения периодов полураспада по спонтанному делению. Здесь спонтанное деление как бы должно утрачивать свою роль «сокрушителя» тяжелых ядер. Вот какие это значения: 114, 126, 164 и даже 184 для Z и 184, 198 и 318 для N . Чтобы их вычислить, ученые воспользовались оболочечной моделью ядра, представлением о «магических» числах

и распространили эти представления на неизвестные области периодической системы. Продолжительность жизни ядер, принадлежащих к этим островкам относительной стабильности, в соответствии с расчетами, может превосходить 10^{15} лет. Такие «островные» гипотетические элементы получили название «сверхэлементы». Конечно, спонтанное деление для них не единственный вид радиоактивных превращений. Они могут испытывать также α - и β^- -распады, причем в этих случаях периоды полураспадов должны быть (опять по данным теории) значительно меньше. Поэтому суммарная продолжительность жизни «сверхэлементов» снижается на много порядков. Она может измеряться в минутах, часах, днях, годах, столетиях, возможно, тысячелетиях. Но может быть — в отдельных случаях — и существенно больше.

Появление гипотезы ООС моментально вызвало волну оптимизма. Ведь она делала реальными попытки ядерного синтеза «сверхэлементов». И даже давала основания для поисков их в природе. Проблема верхней границы периодической системы приобрела новое звучание. За 20 лет существования этой гипотезы ученые несколько раз пытались синтезировать некоторые «островные» элементы. Предлагались различные, иногда весьма неожиданные варианты ядерных реакций. Бывало, что полученные результаты внушали надежду. Но на этом дело и кончалось. В литературе появлялись предварительные сведения об открытии в природных образцах неизвестной активности с очень большим периодом полураспада. Конечно, делалось предположение, что носителем ее мог быть какой-либо «сверхэлемент». Но сведения так и оставались предварительными, не находили подтверждений в других работах. А природные образцы были ведь весьма экзотическими — космические лучи, метеориты, мине-

ральные конкреции со дна Тихого океана. Наконец, даже лунный грунт.

Иными словами, гипотеза ООС, столь важная для дальнейшего развития учения о периодичности, так все еще и не получила определенного подтверждения. Значит, она просто-напросто ошибочна? Значит, ее судьба — пополнить перечень красивых научных легенд?

Мы бы не стали этого утверждать. Хотя в последние годы былой оптимизм несколько убавился. Справедливее вопрос оставить открытым. И нужно обратить внимание на одно очень важное обстоятельство: гипотеза ООС, как это парадоксально ни прозвучит, позволила ученым составить вполне определенное представление об особенностях химических свойств гипотетических элементов седьмого, восьмого и даже девятого периодов.

Размывание периодичности. Когда-то видный немецкий ученый В. Клемм назвал периодическую систему элементов немного по-другому: система периодов.

Действительно, она — система периодов определенной емкости, которые попарно повторяются. Исключение составляет «одионый» первый период. И оказывается: третий период структурно аналогичен второму, пятый — четвертому. Далее следовало бы сказать: седьмой — шестому. Но подождем пока произносить эти числительные. Иными словами, каждая соседняя пара периодов сама по себе микросистема периодов. Так, во втором и третьем периодах содержатся *s*- и *p*-элементы. В четвертом и пятом периодах *s*- и *p*-элементы разделены вставками из десяти *d*-элементов. Границы между отдельными оболочками и подоболочками весьма четкие. Их построение начинается в атомах именно с теми зарядами ядер, как это предписывают теория строе-

ния атомов и теория периодической системы. И, как правило, подоболочки заполняются электронами монотонно и систематически.

Иначе говоря, структура периодической системы с ее первого по пятый период радуется своей гармонией и очень четко передает периодический характер изменения свойств химических элементов в зависимости от Z . Но в шестом периоде эта гармония нарушается. Прочтите те страницы книги, где речь идет о редкоземельных элементах. Уточним теперь, как именно происходит заполнение $4f$ -подоболочки соответствующими ей четырнадцатью электронами. Исходя из той закономерности, что во втором и третьем периодах после s -электронов появляются p -электроны, а в четвертом и пятом d -электроны, логично ожидать появления в атоме лантана ($Z=57$) $4f$ -электрона. Но не тут-то было: «лантановый» очередной электрон оказывается $5d$ -электроном. Систематическое же построение $4f$ -подоболочки начинается у следующего церия, причем однажды прерывается: в атоме гадолиния ($Z=64$) $5d$ -электрон выскакивает снова. А отсюда следует, что граница между $4f$ - и $5d$ -подоболочками словно бы оказывается размытой. Как это обстоятельство проявляется внешне? Очень просто: в существовании совокупности пятнадцати редкоземельных элементов (от лантана до лютеция), очень похожих по свойствам. Между тем застройка $4f$ -подоболочки фактически происходит на протяжении тринадцати элементов (от церия до иттербия).

Вот почему лантан и лантаноиды помещают в одну клетку таблицы.

Ряд лантаноидов расшифрован внизу таблицы. Под ним расположен другой ряд — из четырнадцати $5f$ -элементов, или ряд актиноидов. Тем самым седьмой период рассматривается как бы подобным шестому. Но всесторонние химические исследования синтезированных трансурановых элементов свиде-

тельствуют, что такое подобие двух рядов f -элементов выглядит весьма условным.

Валентные возможности актиноидов несравненно шире. Для лантаноидов преобладающей является степень окисления $3+$, хотя некоторые из них проявляют аномальные валентности. Известны, например, четырехвалентные церий, празеодим и тербий, двухвалентный самарий, европий и иттербий. В то же время элементы первой половины ряда актиноидов могут быть двух-, трех-, четырех-, пяти-, шести- и даже семивалентны (нептуний, плутоний и америций). Тяжелые актиноиды предлагают свои сюрпризы. У них исключительно устойчивой оказывается степень окисления $2+$, а у менделевия даже $1+$. Словом, каждый актиноид гораздо более индивидуален в своем химическом поведении, чем лантаноиды, все же до сих пор заслуживающие наименования химических близнецов (правда, в степени окисления $3+$ и актиноиды имеют много общего и между собой, и с соответствующими лантаноидами).

Далее, в седьмом периоде семейство актиноидов заканчивается на элементе 103. Последующие элементы — с курчатовия по сто седьмой — должны быть переходными $6d$ -элементами, химическими аналогами, соответственно, гафния, тантала, вольфрама, рения. Но, с другой стороны, аналогом гафния считается торий, тантала — протактиний, вольфрама — уран. И в некоторых современных вариантах периодической системы символы Th, Pa и U ставят в скобках в седьмом периоде под символами Hf, Ta и W. И возникает резонный вопрос: какой же элемент следует считать непосредственным аналогом гафния — торий или курчатовий? Или аналогом тантала — протактиний или нильсборий? Ответить тут непросто.

Такое изобилие химических проявлений у большой совокупности элементов седьмого периода делает вопрос об их адекватном размещении в периоди-

ческой системе отнюдь не риторическим. Выделение ряда актиноидов, подобных лантаноидам, становится данью традиции. Конечно, предлагались и другие варианты распределения трансактиниевых элементов в менделеевской таблице. Но они либо были надуманны, либо сложны. А потому и не привились.

Чем же вызвано такое разнообразие химических свойств у этих элементов? Прежде всего, тем, что граница между $5f$ - и $6d$ -подоболочками резко размыта. В элементах от тория до америция энергии этих подоболочек настолько близки, что, по сути дела, нет различия между $5f$ - и $6d$ -электронами. Кроме того, в атомах тяжелых актиноидов с большими значениями Z начинают проявляться новые эффекты. Эти эффекты как бы способствуют неустойчивости внешних электронных оболочек. Явление, заключающееся в том, что четкие границы между соседними электронными подоболочками в атомах нарушаются или вовсе отсутствуют, называется размыванием периодичности. Внешне оно выражается в большом своеобразии свойств соответствующих элементов и специфическом характере изменения этих свойств. Чем для большего числа химических элементов мы анализируем явление периодичности, тем сложнее оно оказывается. Уже в шестом периоде обнаруживаются, как мы видели, некоторые осложнения. В седьмом же периоде эти осложнения скорее становятся правилом, нежели исключением... А если нам было бы известно не 107, а 170 или более элементов и мы имели бы представление об их важнейших свойствах?!

Компьютеры рассказывают о химии, которой еще нет. Компьютеры — это общее название различных счетных устройств и механизмов, в том числе быстродействующих электронно-вычислительных машин. Без компьютеров современная наука и тех-

ника не могли бы обойтись. Например, в химии электронно-вычислительные машины позволяют заранее рассчитывать тонкие детали протекания сложных химических процессов, намечать оптимальные пути синтеза разнообразных, неизвестных природе материалов с заранее заданными свойствами.

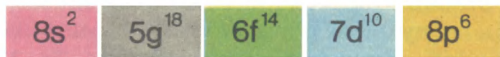
Применение ЭВМ дает возможность рассчитывать электронные конфигурации атомов на основе методов квантовой механики. Даже для машины это очень трудоемкая задача. И потому такого рода расчеты у физиков до поры до времени популярностью не пользовались: распределение электронов по оболочкам и подоболочкам определялось другими способами и полученные результаты находились в хорошем согласии со свойствами химических элементов.

С появлением гипотезы ООС делались попытки синтезировать некоторые «сверхэлементы». Ученые не сомневались, что если синтез и окажется успешным, то в их распоряжении будут лишь единичные атомы новых элементов. Чтобы разработать методику быстрого определения их свойств, надо было заранее предполагать, какими они должны быть, эти свойства. Наиболее «популярным» объектом синтеза оказался элемент 114. Мало кто сомневался в том, что по своим свойствам он будет аналогом свинца. Но в отношении другого «островного» элемента 126 такой уверенности уже быть не могло. Весьма своеобразное химическое поведение элементов в начале седьмого периода как бы предостерегало, что в восьмом периоде ученых могли бы ожидать еще большие сюрпризы.

И вот на страницах физических и химических журналов появились работы, в которых излагались результаты компьютерных расчетов электронных конфигураций атомов с очень большими Z . А также рассчитывались их важнейшие свойства. Так возникло

целое научное направление, которое один физик в шутку назвал компьютерной химией.

Что раньше предполагали ученые относительно восьмого периода менделеевской системы? То, что он должен был бы состоять из 50 элементов, начинаться «экафранцием» с $Z=119$ и заканчиваться «двирадонем» с $Z=168$. На языке электронных оболочек строение восьмого периода могло быть записано так:



Новым, по сравнению с предшествующими периодами, было бы появление $5g$ -элементов, отвечающих значению орбитального квантового числа $l=4$. Их было бы 18, и они завершали бы построение O -оболочки, которая начала заполняться давным-давно, у рубидия с $Z=37$. Можно было думать, что $5g$ -элементы сходны друг с другом еще более, чем лантаноиды; ведь они принадлежат к четвертой снаружи оболочке.

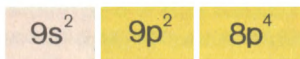
Элемент 126 как раз относится к $5g$ -элементам. И, по логике, он относился бы к третьей группе периодической системы, имел бы степень окисления $3+$. Точно так же гипотетический «сверхэлемент» 164 был бы $8p$ -элементом и еще более тяжелым, чем 114-й, аналогом свинца. Все эти выводы нетрудно было сделать в рамках привычных представлений о характере построения электронных оболочек и подоболочек в атомах.

Расчеты, проведенные на электронно-вычислительных машинах, показали, что у элементов восьмого периода явление размывания периодичности выражено чрезвычайно резко. Так, у элементов с $Z=121$ и 122 в атомах появляются не $5g$ -, не $6f$ - и даже не $7d$ -электроны. Появляются $8p$ -электроны! Но ведь построение p -подоболочки сразу вслед за заполнением s -подоболочки имело место только во втором

и третьем периодах системы. Правда, при $Z=125$ долгожданный $5g$ -электрон внедряется в вакантную $5g$ -подоболочку. А затем на большом интервале порядковых номеров происходит довольно-таки хаотическое построение электронных подоболочек. Это первый сюрприз, преподнесенный компьютерами.

Второй — еще более неожиданный: завершение восьмого периода предсказывается у элемента с $Z=164$! Он оказывается отнюдь не $8p$ -элементом, как можно было думать, а элементом с заполненной $7d$ -подоболочкой. Внешние электроны на $8s$ и $8p$ -подоболочках, полагает компьютер, связаны очень прочно и принимать участия в химических связях не могут. Поэтому элемент 164 химически должен быть инертным. Но коль скоро это так, то появляется третий сюрприз.

Компьютер предлагает следующее построение девятого периода:



т. е. у элементов с $Z=165$ и 166 заполняется $9s$ -подоболочка; далее у элементов 167 и 168 начинается построение $9p$ -подоболочки; в атомах же элементов $169—172$ происходит завершение $8p$ -подоболочки, которая долгое время оставалась недостроенной. Таким образом, согласно расчетам, девятый период, подобно второму и третьему, должен содержать 8 элементов, причем входящие в него p -элементы неоднородны: p -электроны их атомов принадлежат к разным электронным оболочкам, $n = 8$ и 9 .

Подтвердить все эти удивительные прогнозы можно будет лишь в том случае, если в конце концов удастся синтезировать хотя бы несколько «сверхэлементов» и изучить, насколько это будет возможно, их важнейшие свойства. А пока нарисованная компьютерами удивительная картина остается лишь увлекательной мечтой. И свидетельствует о том, что от-

крытое Д. И. Менделеевым явление периодического изменения свойств химических элементов на самом деле оказывается гораздо более сложным и гораздо более причудливым, чем представлялось всего два десятилетия тому назад. Так что в будущем периодический закон ожидают новые «надстройки» и новое «развитие».

Вездесущий закон

В 1969 г. исполнилось 100 лет со дня открытия периодического закона химических элементов. Началось второе столетие его триумфального шествия.

Изучать химию невозможно иначе, как на основе периодического закона и периодической системы элементов. Каким нелепым выглядел бы учебник химии без таблицы Менделеева! Но запомнить последовательность расположения химических элементов в менделеевской таблице — это еще недостаточно, да это и не нужно. Нужно другое: понять, как различные элементы связаны между собой и почему они так связаны. Только тогда периодическая система окажется богатейшим хранилищем информации о свойствах элементов и их соединений, таким хранилищем, с которым мало что может сравниться.

Опытный химик, лишь взглянув на место, занимаемое каким-либо элементом в системе, может рассказать о нем очень многое: металл данный элемент или неметалл; образует он или нет соединения с водородом — гидриды; какие оксиды характерны для этого элемента; какие валентности он может проявлять, вступая в химические соединения; какие соединения этого элемента будут устойчивы, а какие, напротив, окажутся непрочными; из каких соединений и каким способом удобнее и выгоднее всего получать данный элемент в свободном виде. И если химик способен извлечь все эти сведения из перио-

дической системы, то это значит, что он хорошо ее освоил.

Но ведь перед современной химической наукой стоит задача получать не только новые сведения о свойствах и практической применимости уже известных химических соединений. Научно-техническая революция потребовала синтеза новых материалов и веществ с новыми, необычными, заранее заданными свойствами, таких веществ, которые неизвестны природе. Они создаются теперь в больших количествах.

Многие химические процессы протекают только с участием катализаторов. В их роли выступают различные химические элементы и соединения. Проходят те времена, когда катализаторы подбирались на ощупь, когда лишь после многих десятков, а то и сотен проб удавалось найти подходящий ускоритель химической реакции. Теперь подбор катализаторов ставится на научную основу, и такой основой в значительной степени оказывается периодическая система.

Она же стала путеводной нитью и в синтезе полупроводниковых материалов. Ученые на множестве примеров обнаружили, что наилучшими полупроводниковыми свойствами обладают или должны обладать соединения элементов, занимающих определенные места в менделеевской таблице (главным образом в III—V ее группах).

Металлические сплавы были известны людям с глубокой древности, но их ассортимент долгое время был весьма ограниченным. Только в XX в. их число резко возросло — этого потребовали техника и промышленность. В результате были получены самые разнообразные сочетания элементов, в особенности когда начали использовать редкие металлы. В настоящее время известны тысячи различных сплавов. Изучая их строение и свойства, исследовате-

ли установили много важных закономерностей. И выяснилось, что эти закономерности не случайны, а во многом определяются положением металлов в периодической системе. Следовательно, нельзя ставить задачу получения новых сплавов, игнорируя периодическую систему.

Пожалуй, в любой отрасли современной химии мы можем заметить отблеск периодического закона. Но не одни только химики склоняют ныне голову перед его величием. Мы уже видели, что в трудном и увлекательном деле синтеза новых элементов невозможно обойтись без периодического закона. Гигантский естественный процесс синтеза химических элементов, самых разнообразных их изотопов происходит в звездах. Этот процесс ученые называют нуклеосинтезом.

Пока мы не представляем в деталях, какими именно способами, в результате каких последовательных ядерных реакций образовались известные нам химические элементы. Гипотез нуклеосинтеза много, законченной теории еще нет. Но можно с уверенностью сказать, что даже самые робкие предположения о путях происхождения элементов были бы невозможны без учета последовательного расположения элементов в периодической системе. Закономерности ядерной периодичности, строения и свойств атомных ядер лежат в основе разнообразных ядерных реакций нуклеосинтеза.

Долго можно перечислять те области человеческого знания и практики, где Великий закон и система элементов играют важную роль. И, по правде говоря, мы даже не представляем себе всю масштабность менделеевского учения о периодичности. Много раз оно еще блеснет перед учеными своими неожиданными гранями.

*

И вам, юные химики, еще не раз предстоит в этом убедиться!



Читайте
следующую книгу
библиотеки
«Ученые —
школьнику!»

Волны — частицы и частицы —
волны.

Порядок в световом хаосе.

Кванты — близнецы и черное из-
лучение.

Упорядоченный свет и музыка.

Световой взрыв ядер, или что мо-
жет произойти за одну миллиард-
ную долю секунды.

Свет сжимает вещество.

Лазерный свет пробивает вакуум.

Обо всем этом рассказывается в
книге «Световое чудо века», кото-
рую написали для старшеклассни-
ков академик АН СССР Н. Г. Басов
и доктор физико-математических
наук Ю. В. Афанасьев.

