

## ФРАНЦИЙ



Среди элементов, стоящих в конце периодической системы Д. И. Менделеева, есть такие, о которых многое слышали и знают специалисты, но есть и такие, о которых мало что может рассказать даже химик. К числу первых относятся, например, радон (№ 86) и радий (№ 88). К числу вторых — их сосед по периодической системе элемент № 87 — франций.

Франций интересен по двум причинам: во-первых, это самый тяжелый и самый активный щелочной металл; во-вторых, франций можно считать самым неустойчивым из первых ста элементов периодической системы. У самого долгоживущего изотопа франция —  $^{223}\text{Fr}$  — период полураспада составляет всего 22 минуты. Такое редкое сочетание в одном элементе высокой химической активности с низкой ядерной устойчивостью определило трудности в открытии и изучении этого элемента.

### Как искали франций

На долю женщин-ученых не так уж часто выпадает счастье открытия новых элементов. Всем известно имя Марии Склодовской-Кюри, которая открыла радий и полоний. Менее известна Ида Ноддак (Такке), обнаружившая рений. Открытие элемента № 87 связано с именем еще одной женщины — француженки Маргариты Пере, кстати, ученицы Марии Склодовской-Кюри. 9 января 1939 г. она заявила об открытии элемента № 87. Вернемся, однако, назад почти на 70 лет и рассмотрим историю открытия этого элемента более подробно.

Возможность существования и основные свойства элемента № 87 были предсказаны Д. И. Менделеевым. В 1871 г. в статье «Естественная система элементов и применение ее к указанию свойств неоткрытых элементов», опубликованной в журнале Русского физико-химического общества, он писал: «Затем в десятом ряду можно ждать еще основных элементов, принадлежащих к I, II и III группам. Первый из них должен образовывать окисел  $\text{R}_2\text{O}$ , второй —  $\text{RO}$ , а третий —  $\text{R}_2\text{O}_3$ ; первый будет сходен с це-

зем, второй — с барием, а все их окиси должны обладать, конечно, характером самых энергичных оснований».

Исходя из местоположения экацезия в периодической системе, следовало ожидать, что сам металл будет жидким при комнатной температуре, так как цезий плавится при  $28^\circ\text{C}$ . Из-за высокой реакционной способности весь земной экацезий должен бы встречаться только в виде солей, которые по своей растворимости должны превосходить соли остальных щелочных металлов, поскольку при переходе от лития к цезию растворимость солей возрастает.

Однако открыть этот интересный элемент ученым XIX столетия не удалось.

После открытия радиоактивных соседей элемента № 87 стало очевидно, что он тоже должен быть радиоактивным. Но и это не прояснило ситуацию.

Ученых, занимавшихся поисками 87-го элемента, условно можно разделить на две большие группы. Первая предполагала существование в природе стабильных или долгоживущих изотопов этого элемента и потому вела поиски его в минералах и концентратах щелочных металлов, в воде морей и океанов, в золе сена и грибов, в патоке и пепле сигар. Вторая группа ученых, ориентируясь на радиоактивность элемента № 87, искала его среди продуктов распада соседних с ним элементов.

При поисках экацезия в воде морей и океанов особый интерес представляла вода Мертвого моря, омывающего земли Палестины. В результате экспедиций было установлено, что в воде этого моря в значительных количествах содержатся ионы щелочных металлов, галогенов и других элементов. «В воде Мертвого моря невозможно утонуть», — сообщали популярные журналы. Английского ученого И. Фриенда, который в июле 1925 г. отправился в эти края, интересовало нечто иное. «Уже несколько лет назад, — писал он, — мне пришло в голову, что если экацезий способен к постоянному существованию, то его можно будет найти в Мертвом море».

Из проб воды удаляли все элементы, кроме щелочных. Хлориды же щелочных металлов разделяли путем дробного осаждения. Хлорид экацезия должен был быть самым растворимым. Однако и проводимый на последнем этапе рентгеноспектральный анализ не позволил обнаружить экацезий.

Тем не менее в литературе вскоре появилось несколько сообщений об открытии 87-го элемента, но все они впоследствии не подтвердились. В 1926 г. английские химики Дж. Дрюс и Ф. Лоринг сообщили, что наблюдали линии экацезия на рентгенограммах сульфата марганца, и предложили для вновь открытого элемента название «алкалий». В 1929 г. американский физик Ф. Аллисон с помощью в основе своей ошибочного метода магнитооптического анализа обнаружил следы 87-го элемента в редких минералах щелочных металлов — поллуците и лепидолите. Он назвал «свой» элемент виргинием. В 1931 г. американские ученые Дж. Пэшиш и Э. Вайнер вроде бы даже выделили экацезий из минерала самарскита, а в 1937 г. румынский химик Г. Хулубей обнаружил экацезий в минерале поллуците и назвал его молдавием. Но все эти открытия не удалось подтвердить, ибо открыватели алкалия, виргиния и молдавия ни в малой степени не учитывали важнейшего свойства экацезия — его радиоактивности.

Однако неудачи преследовали и вторую группу ученых, занимавшихся поисками 87-го элемента среди продуктов распада радиоактивных семейств. Ни в одном из известных в то время радиоактивных семейств — урана 238 ( $4n+2$ ), урана-235 ( $4n+3$ ) и тория-232 ( $4n$ ) — линии радиоактивных превращений не проходили через изотопы 87-го элемента. Это могло быть по двум причинам: либо элемент № 87 — член отсутствующего ряда ( $4n+1$ ), либо недостаточно тщательно изучен процесс радиоактивного распада урана-238 или урана-235 на участке радий — полоний. Действительно, уже в самом начале более тщательного изучения ряда урана-238 было обнаружено, что изотоп  $^{214}\text{Bi}$  может распадаться двумя путями: испытывать альфа-распад, превращаясь в  $^{210}\text{Tl}$ , или бета-распад, переходя в изотоп  $^{214}\text{Po}$ . Это явление получило название разветвленного распада, или радиоактивной вилки. Можно было ожидать подобных вилок и на участке радий — полоний.

Первое сообщение об открытии 87-го элемента как продукта радиоактивного распада появилось еще в 1913 г. и принадлежало английскому химику Дж. Крэнстону. Работая с препаратом  $^{228}\text{Ac}$ , он обнаружил наличие у этого изотопа слабого альфа-излучения (помимо известного и ранее бета-излучения). В результате альфа-распада  $^{228}\text{Ac}$  превращается в изотоп 87-го элемента —  $^{224}\text{Fr}$ . К сожалению, сообщение Крэнстона осталось незамеченным.

Через год сразу три австрийских радиохимика — Мейер, Гесс и Панет — наблюдали явление разветвленного распада изотопа  $^{227}\text{Ac}$ , принадлежащего к ряду урана-235 ( $4n+3$ ). Они обнаружили альфа-частицы с длиной пробега в воздухе 3,5 см. «Эти частицы образуются при альфа-распаде обычно бета-активного  $^{227}\text{Ac}$ , — рассуждали они, — ...продуктом распада должен быть изотоп элемента 87».

Однако к выводам этих ученых многие отнеслись с недоверием. Оно было вызвано в основном тем, что наблюдаемая альфа-активность была очень слабой, а это таило в себе возможность ошибки, тем более что препарат актиния-227 мог содержать примесь протактиния, а протактиний способен испускать подобные альфа-частицы.

Наряду с этими экспериментальными работами представляет интерес теоретическое исследование одесского химика Д. Добросердова. В 1925 г. в «Украинском химическом журнале» он опубликовал сообщение, в котором высказал интересные соображения о величине атомного веса, физических и химических свойствах 87-го элемента и о том, где и какими методами следует его искать. В частности, он подчеркнул, что экацезий «непременно должен быть весьма радиоактивным элементом». Однако Добросердов допустил досадную ошибку, предполагая, что известная радиоактивность калия и рубидия объясняется присутствием в них экацезия.

В случае открытия элемента со столь интересными свойствами русскими учеными Добросердов предлагал назвать его руссем.

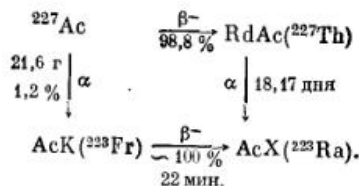
В следующем году появились сразу две работы: выдающиеся радиохимики О. Ган (Германия) и Д. Хевеши (Венгрия) предприняли попытки доказать присутствие экацезия в радиоактивных рядах. Хевеши изучил альфа-распад  $^{223}\text{Ac}$  и  $^{227}\text{Ac}$ , а также бета-распад эманаций — изотопов радона и показал, что при бета-распаде эманаций изотопы 87-го элемента не образуются, а при распаде актиния-228 если и образуется изотоп  $^{224}\text{Fr}$ , то его количество должно составлять менее  $1/200\,000$  доли исходного количества ядер  $^{228}\text{Ac}$ .

Прошло 12 лет, и в конце 1938 г. к поискам 87-го элемента приступила французский химик Маргарита Пере, сотрудница парижского Института радия. Повторив опыты Мейера, Гесса и Панета, она, естественно, также обнару-

жила альфа-частицы с пробегом 3,5 см. Чтобы доказать, что эти загадочные частицы испускаются актинием, а не протактинием, Пере очень тщательно очистила актиний от примесей и дочерних продуктов. Соосаждением с гидроксидом четырехвалентного церия она удалила из раствора радиоактивный изотоп тория; с карбонатом бария были выведены изотопы радия, а с гидроокисью лантана — актиний.

Оставшийся после такой обработки маточный раствор мог содержать только щелочные и аммонийные соли и, как казалось, не должен был быть радиоактивным. Однако в остатке после выпаривания отчетливо регистрировалась бета-активность с периодом полураспада 22 минуты. Стало ясно, что эта активность связана с каким-то щелочным элементом. Можно было предположить, что она возникает в результате альфа-распада актиния и, согласно правилу смещения, принадлежит ядру элемента № 87. Чтобы доказать это, Пере перевела активность в осадок вместе с перхлоратом цезия. Активность полученных кристаллов перхлората цезия также убывала с периодом полураспада 22 минуты.

Таким образом, Пере обнаружила, что в  $^{227}\text{Ac}$  существует радиоактивная ветка: в 1,2% случаев распада при вылете альфа-частиц образуется бета-излучатель со свойствами тяжелого щелочного металла и периодом полураспада 22 минуты:



Долгая и кропотливая работа завершилась успехом, и 9 сентября 1939 г. Пере заявила об открытии элемента № 87. В соответствии с номенклатурой, используемой для естественных радиоэлементов, она выбрала для него название «актиний-К». Позднее, в 1946 г., Пере назвала открытый ею элемент францием в честь своей родины, а в 1949 г. Международный союз теоретической и прикладной химии (ИЮПАК) утвердил это название и символ Fr.

## Как его исследовали

Помимо  $^{223}\text{Fr}$ , сейчас известно несколько изотопов элемента № 87. Но только  $^{223}\text{Fr}$  имеется в природе в скольких-нибудь заметных количествах. Пользуясь законом радиоактивного распада, можно подсчитать, что в грамме природного урана содержится  $4 \cdot 10^{-18}$  г  $^{223}\text{Fr}$ . А это значит, что в радиоактивном равновесии со всей массой земного урана находится около 500 г франция-223. В исчезающе малых количествах на Земле есть еще два изотопа элемента № 87 —  $^{224}\text{Fr}$  (член радиоактивного семейства тория) и  $^{221}\text{Fr}$ . Естественно, что найти на Земле элемент, мировые запасы которого не достигают килограмма, практически невозможно. Поэтому все исследования франция и его немногих соединений были выполнены на искусственных продуктах.

Франций-223 долгое время был единственным изотопом, который применяли в опытах по изучению химических свойств элемента № 87. Поэтому, естественно, химики искали методы ускоренного выделения его из  $^{227}\text{Ac}$ . В 1953 г. М. Пере и известный ныне французский радиохимик Ж. Адлов разработали экспресс-метод выделения этого изотопа с помощью бумажной хроматографии. По этому методу раствор  $^{227}\text{Ac}$ , содержащий  $^{223}\text{Fr}$ , наносится на конец бумажной ленты, которая погружается в элюирующий раствор. При движении раствора по бумажной ленте происходит распределение по ней радиоэлементов.  $^{223}\text{Fr}$ , будучи щелочным металлом, движется с фронтом растворителя и откладывается позже других элементов. Позднее Адлов предложил использовать для выделения  $^{223}\text{Fr}$  сложное органическое соединение  $\alpha$ -теноилтрифторацетон (ТТА). Описанным методом за 10–40 минут удается выделить чистый препарат франция-223. Из-за малого периода полураспада работать с этим препаратом можно не более двух часов, после чего образуется уже заметное количество дочерних продуктов и нужно или очищать франций от них, или выделять его заново.

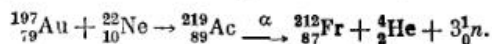
С развитием техники ускорения ионов были разработаны новые методы получения франция. При облучении ториевых или урановых мишеней протонами высоких энергий образуются и изотопы франция. Самым долгоживущим из них оказался франций-212 с периодом полураспада 19,3 минуты. За 15 минут облучения грамма урана пучком



протонов с энергией 660 Мэв на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований в Дубне образуется  $5 \cdot 10^{-13}$  г франция-212 с активностью  $2,5 \cdot 10^7$  распадов в минуту.

Выделение франция из облученных мишеней — процесс весьма сложный. За очень короткое время его трудно извлечь из смеси, содержащей почти все элементы периодической системы. Несколько методик выделения франция из облученного урана разработано советскими радиохимиками А. К. Лаврухиной, А. А. Поздняковым и С. С. Родиным, а из облученного тория — американским радиохимиком Э. Хайдом. Выделение франция основано на соосаждении его с нерастворимыми солями (перхлоратом или кремневольфраматом цезия) или со свободной кремневольфрамовой кислотой. Время выделения франция этими методами составляет 25–30 минут.

Еще один способ получения франция основан на реакциях, происходящих при облучении мишеней из свинца, таллия или золота многозарядными ионами бора, углерода или неона, ускоренными на циклотронах или линейных ускорителях. Пригодны такие пары мишеней — снаряд:  $Pb+B$ ;  $Tl+C$ ;  $Au+Ne$ . К примеру, франций-212 образуется при облучении золотой фольги ионами неона-22 с энергией 140 Мэв:



Наиболее удобная и быстрая методика выделения изотопов франция из облученного золота разработана советскими радиохимиками Н. Мальцевой и М. Шалаевским. Франций экстрагируют нитробензолом в присутствии тетрафенилбората из колонки, заполненной силикагелем.

С помощью всех этих методов получено 27 изотопов франция с массовыми числами от 203 до 229.

Поскольку франций не может быть получен в весомых количествах, его физико-химические константы чаще всего рассчитываются с учетом свойств остальных членов группы щелочных металлов. Вычислили, что температура плавления франция около  $8^\circ C$ , а температура кипения примерно  $620^\circ C$ .

Все опыты по изучению химических свойств франция проводились, естественно, с ультрамалыми количествами этого элемента. В растворах было лишь  $10^{-13}$ – $10^{-9}$  г

франция. При таких концентрациях могут стать важными процессы, о которых мы обычно забываем, имея дело с макроколичествами вещества. Например, в этих условиях радиоактивный изотоп может «потеряться» из раствора, адсорбировавшись на стенках сосудов, на поверхности осадков, на возможных примесях... Поэтому, казалось бы, изучая свойства франция, следует оперировать более концентрированными растворами. Но в этом случае возникают новые трудности из-за процессов радиолиза и ионизации.

И все же, несмотря на все трудности, получены некоторые достоверные данные о химических свойствах франция. Наиболее полно изучено соосаждение франция с различными нерастворимыми соединениями. Он увлекается из раствора хлороплатинатами цезия и рубидия  $Cs_2PtCl_6$  и  $Pb_2PtCl_6$ , хлорвисмутатом  $Cs_2BiCl_5$ , хлоростаннатом  $Cs_2SnCl_6$  и хлороантимонатом цезия  $Cs_2SbCl_5 \cdot 2,5H_2O$ , а также свободными гетерополикислотами — кремневольфрамовой и фосфорновольфрамовой.

Франций легко адсорбируется на ионообменных смолах (сульфонатионитах) из нейтральных и слабокислых растворов. С помощью этих смол легко отделить франций от большинства химических элементов. Вот, пожалуй, и все успехи.

Ожидать широкого использования элемента № 87 на практике, конечно, не приходится. И все же польза от франция есть. Во-первых, с его помощью (по его излучению) можно быстро определять присутствие в природных объектах актиния; во-вторых, франций надеются использовать для ранней диагностики сарком. Проведены предварительные опыты по изучению поведения франция в организме крыс. Было установлено, что франций избирательно накапливается в опухолях, причем и на ранних стадиях заболевания. Эти результаты очень интересны, однако удастся ли использовать их в онкологической практике, покажет лишь будущее.



## РАДИЙ



Элемент № 88 открыт супругами Кюри в 1898 г. в минерале, известном под названиями урановой смолки, смоляной обманки и настурана. Уже в ходе этой самой первой работы стало ясно, что новый элемент — аналог бария: при фракционном разделении компонентов активность накапливалась в бариевой фракции.

В названии элемента № 88, как и в названия галогенов, положено одно из самых очевидных его свойств. Слово *radium* («радий») происходит от латинского *radius* — «луч», так что дословно название этого элемента переводится как «излучающий», «лучистый». Есть еще два толкования слова «радий» — оба достаточно обоснованные и интересные, но содержащие по несколько допущений, не подтвержденных документально.

Так, существует мнение, что название элемента № 88, так же как и название полония, связано с родиной Марии Склодовской-Кюри. В свое время в «Химии и жизни» (1967, № 12) была опубликована заметка под названием «Радий — *gad*». Автор этой заметки допускал происхождение слова «радий» от слова *gad*, которое по-польски означает примерно то же, что и по-русски: рад, доволен. У Пьера и Марии, конечно, были основания остаться довольными результатами первого этапа их работы. Однако, судя по документам, воспоминаниям, письмам, этим людям самодовольство было чуждо. Именно поэтому версию «радий — *gad*» принять трудно.

Более обоснованным кажется предположение, высказанное в книге С. А. Погодина и Э. П. Либмана «Как добыли советский радий». Правда, оно касается не столько названия элемента № 88, сколько термина «радиоактивность», введенного, кстати, в научный обиход Марией Кюри. «Можно предположить, — пишут авторы, — что выбрать этот термин побудило следующее обстоятельство. М. Склодовская-Кюри, несомненно, хорошо знала жизнь и творчество своего соотечественника великого поэта Адама Мицкевича (1798—1855), пламенного борца за освобождение Польши... Когда Мицкевич служил учителем в уездном училище в Ковно, один из его друзей, Томаш Зап, органи-

зовал в Вильно «Общество лучистых». Он считал, что от каждого добродетельного человека исходят лучи, благотворно влияющие на окружающих. Добродетельность понималась в смысле латинской *virtus*, то есть как доблесть, мужество». Мицкевич в одном из своих произведений посылал «лучам приветственное слово...». Очень может быть, что с «лучистыми» строками поэта как-то связано и «лучистое» название элемента № 88.

Чем же важен и чем интересен для нас радий?

«Изучение и использование радиоактивных свойств Ra сыграло огромную роль в исследовании строения атомного ядра и явления радиоактивности. Химические методы, разработанные при выделении из руд соединений Ra и изучении их свойств, легли в основу методов радиохимии».

В этих двух фразах, взятых из краткой энциклопедии «Атомная энергия», сосредоточено в самой общей форме то главное, чем интересен для нас радий, чем славен этот элемент. Можно утверждать, что если бы три четверти века назад не был открыт элемент радий, то вряд ли наш век называли бы атомным. Проследим же историю элемента № 88 — историю его служения науке.

### История служения науке

1898 год, ноябрь — декабрь. Открытие радия.

Как ни странно, более точная дата этого открытия, в отличие от даты открытия полония, не известна. Судя по сохранившимся лабораторным журналам, к началу ноября 1898 г. Пьер и Мария Кюри уже знали «о существовании активного вещества, осаждаемого серной кислотой и отличного от полония». Название «радий», правда с вопросительным знаком, впервые появился в записи, сделанной рукой Пьера Кюри и датированной 17 ноября:

«Итак, сульфат радия растворяется в  $\text{SO}_4\text{H}_2$  лучше, чем сульфат бария?»

Затем в записях журнала месячный перерыв, о причинах которого мы можем только гадать. Следующая запись сделана лишь 18 декабря. В какой-то из дней между 17 ноября и 18 декабря к супругам Кюри пришла уверенность в том, что, кроме полония, урановая смолка содержит и радий.

Первое сообщение «О новом сильно радиоактивном веществе, содержащемся в смоляной обманке», датировано 26 декабря 1898 г. Вот его аннотация:

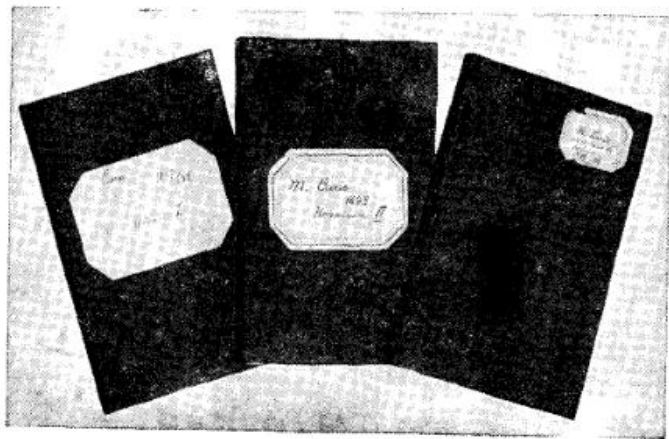
«Открытие сильно радиоактивного вещества, сопутствующего бариию. Демарсе обнаружил новую линию в спектре, интенсивность которой возрастает с увеличением активности. Для этого вещества предлагается название «радий».

Два новых химических элемента — полоний и радий — таков итог первого года совместной работы супругов Кюри по проблеме радиоактивности (первая рабочая тетрадка была начата 16 декабря 1897 г., за год и девять дней до сообщения об открытии радия). Но это было только начало их титанического труда. Новые элементы дали знать о себе излучением, намного более активным, чем излучение урана. Пьер и Мария Кюри были убеждены в том, что открыли новые элементы. Но «чтобы заставить химиков согласиться с этим мнением, необходимо было новые элементы выделить».

1899—1901 годы. Работа с радием продолжается.

«...Пьер Кюри сосредоточился на исследовании свойств радия, а я продолжала химическую обработку, с тем чтобы получить чистые соли радия. Мне приходилось обрабатывать сразу по двадцати килограммов исходного вещества, из-за чего наш сарай был заставлен большими чанами с осадками и жидкостями; это был изнурительный труд — переносить сосуды, переливать жидкости и часами разме-

Три тетради — знаменитые лабораторные дневники супругов Кюри. Здесь впервые записаны символы новых элементов — полония и радия



шивать железным прутом кипящую массу в чугунном котле. Я извлекала из руды радионосный барий, который в виде хлорида подвергался фракционной кристаллизации. Радий накапливался в наименее растворимых фракциях, и эта процедура должна была привести к выделению чистого хлористого радия».

Так пишет об этом времени Мария Склодовская-Кюри. Чистые радиевые препараты еще не были получены, но не следует думать, что эти годы не принесли ученым ничего, кроме каторжного труда. Получая все более и более концентрированные препараты радия, они открыли:

наведенную радиоактивность, вызванную радием;

влияние излучения на некоторые химические процессы; эффект свечения сильно радиоактивных препаратов.

«Особенно радовались мы, — пишет Мария Склодовская-Кюри, — когда обнаружили, что все наши обогащенные радием продукты самопроизвольно светятся. Пьер Кюри, мечтавший о том, чтобы они оказались красивого цвета, должен был признать, что эта неожиданная особенность доставила ему радость. Несмотря на тяжелые условия работы, мы чувствовали себя очень счастливыми».

Радий становится знаменит, в какой-то мере даже моден; к супругам Кюри пришла известность. Очень важно, что в этих условиях они остались самими собой. Вновь обратимся к книге о Пьере Кюри, написанной Марией:

«Пьер Кюри занял позицию самую бескорыстную и самую щедрую. В согласии со мной он отказался извлекать материальные выгоды из нашего открытия. Поэтому мы не взяли никакого патента и опубликовали, ничего не скрывая, все результаты наших исследований, равно как и способ извлечения радия...»

Это обстоятельство не могло не сказаться на развитии исследований в области радиоактивности. Ученые разных стран стали изучать препараты радия и продукты его распада. Это принесло новые открытия. В 1899 г. молодой французский физик, один из немногих помощников супругов Кюри, Андрэ Дебьерн открыл новый радиоактивный элемент актиний. В январе 1900 г. английский ученый А. Дорн сообщил об открытии эманации радия — газообразного радиоактивного вещества, оказавшегося новым элементом радоном. В мае 1900 г. открыто излучение радия, подобное рентгеновским X-лучам (гамма-излучение).

Цепная реакция выдающихся открытий в ядерной физике началась и развивалась неудержимо.

1902 год. Супруги Кюри получили, наконец, первый дециграмм чистого хлористого радия.

На этом образце впервые был определен атомный вес радия. По измерениям Марии Кюри он оказался равен 225,9 — поразительно точно! Сейчас известно, что радий из урановой руды — это изотоп с массовым числом 226.

В том же году было открыто самопроизвольное выделение тепла радием — это сделал Пьер Кюри. А в поябре того же года Эрнест Резерфорд и Фредерик Содди выдвинули теорию радиоактивного распада и сформулировали закон радиоактивных превращений.

«В частности, можно установить, что радий — потомок урана, а полоний — потомок радия», — писала Мария Кюри.

1903 год. Лавина открытий — больших и малых — все нарастала.

В частности, из Англии поступило сообщение (его авторы У. Рамзай и Ф. Содди) об открытии гелия в продуктах излучения радия — так пришло в физику представление о природе альфа-излучения. (Факт существования излучения двух видов —  $\alpha$  и  $\beta$  — обнаружен в 1899 г. Резерфордом.)

В этом же году за выдающиеся исследования в области радиоактивности Пьеру и Марии Кюри вместе с Анри Беккерелем присуждается Нобелевская премия по физике. (Нобелевскую премию по химии — и тоже в основном за радий — Мария Кюри получит в 1911 г.)

Из Нобелевской речи Пьера Кюри: «Можно думать, что в преступных руках радий станет очень опасным, и здесь уместно задать вопрос, заинтересовано ли человечество в дальнейшем раскрытии секретов природы, достаточно ли оно созрело для того, чтобы с пользой применить полученные знания, не могут ли они повлиять отрицательно на будущее человечества? Пример открытий Нобеля знаменателен: мощные взрывчатые вещества позволили осуществить замечательные работы, но одновременно — в руках великих преступников (в другом переводе «преступных властителей») — они представляют ужасное средство уничтожения, которое влечет народы к войне. Я отношусь к числу тех, кто вместе с Нобелем думает, что человечество извлечет из новых открытий больше блага, чем зла...»

1903 год знаменателен еще и тем, что в этом году впервые исследования радия и радиоактивности начаты в Рос-

сии. Летом этого года профессор физики Московского университета Алексей Петрович Соколов (1854—1928) установил, что углекислый газ минерального источника «Нарзан» радиоактивен, а около пятигорского фонтана воздух ионизирован. В дальнейшем А. П. Соколов и его сотрудники исследовали радиоактивность других минеральных вод Кавказа, лечебных грязей, воздуха. В университете А. П. Соколов читал курс «Радиоактивность», но практические занятия по этому курсу ему удалось организовать только через десять лет. А двумя годами раньше он основал радиологическую лабораторию в Москве. К тому времени подобные лаборатории уже появились в Томске и Одессе.

Кроме того, в Петербурге, в Минералогической лаборатории, практическим изучением радиоактивных минералов начали заниматься В. И. Вернадский и К. А. Ненадкевич.

Лаборатория А. П. Соколова знаменита еще и тем, что в ней впервые исследовали радиоактивность ферганской руды — той самой, из которой в 1921 г. были получены первые советские концентрированные препараты радия. 1904—1906 годы.

Исследование Пьером Кюри (совместно с А. Лабордом) радиоактивности минеральных вод и газов, выделяемых минеральными источниками. Начало исследования физиологического действия лучей и эманации радия (совместно с Беккерелем).

В 1906 г. во Франции основана первая радиологическая клиническая лаборатория. Двумя годами раньше появился первый радиевый завод. Основал этот завод Арме де Лиль, который субсидировал также новый журнал «Радий» — первое издание, целиком посвященное проблемам радиоактивности.

В 1906 г. 19 апреля не стало Пьера Кюри.

Его жизнь оборвал несчастный случай. Мария Склодовская-Кюри продолжает работу одна. Она становится преемницей Пьера на кафедре физики в Сорбонне, первой женщиной-профессором одного из самых знаменитых университетов мира...

За несколько месяцев до трагического происшествия в сад у дома супругов Кюри пробрался не в меру любопытный американский репортер. Он застал Марию врасплох, и ей пришлось давать очередное интервью. Репортера интересовало буквально все: сведения о юности



Марии, аппетит и наклонности ее дочерей, психология женщины, посвятившей себя науке,— и меньше всего сама наука. Тогда Мария Склодовская-Кюри, прерывая назойливые расспросы, впервые произнесла фразу, которую часто повторяла впоследствии: «В науке мы должны интересоваться вещами, а не личностями».

Зная об этом принципе, автор этих заметок стремился вывести на передний план «вещи» — вещества, события, факты. Тем не менее и «вещи», и неизменно сдержанные строки из документов очень многое рассказывают о «личностях», о двух в высшей степени незаурядных личностях — о таланте и исключительной работоспособности, об упорстве и бескорыстии. И о человечности во всех смыслах этого слова.

Почти постоянно связанная с радием работа Марии Склодовской-Кюри продолжалась еще 28 лет. 4 июля 1934 г. Мария Склодовская-Кюри умерла от лучевой болезни.

Но вернемся к истории элемента № 88.

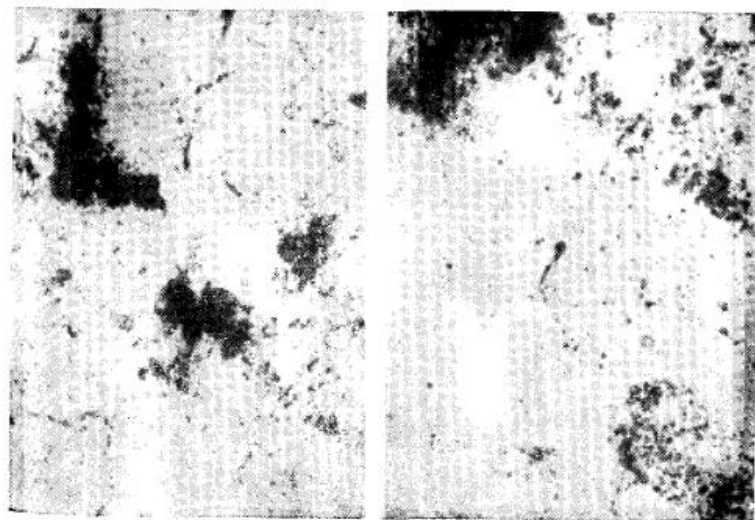
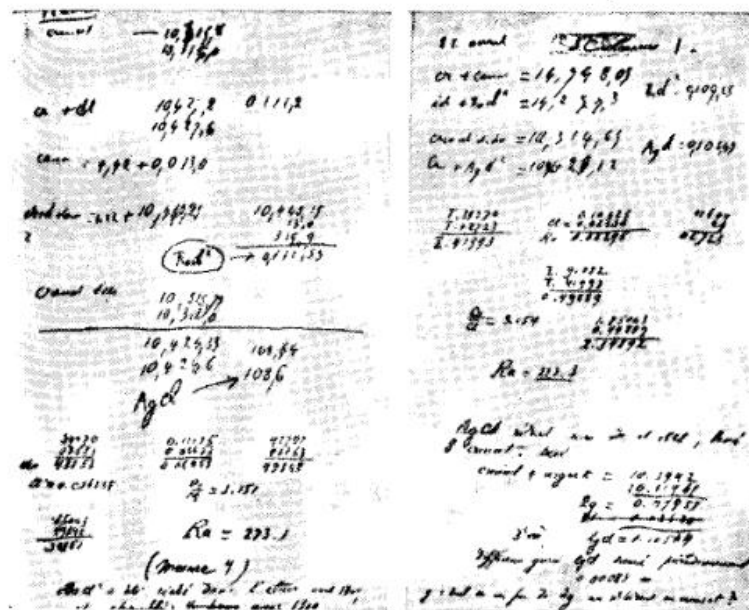
1910 год. Марии Кюри и Андре Дебьерну удалось получить металлический радий.

Он был получен электролизом из водного раствора, в котором находилось 0,106 г  $\text{RaCl}_2$ . Были применены ртутный катод и анод, сделанный из сплава платины с иридием. Полученную амальгаму радия нагрели до  $700^\circ\text{C}$  в струе водорода, чтобы отогнать ртуть.

Радий оказался серебристо-белым довольно легким металлом с плотностью около  $6\text{ г/см}^3$ . И не очень тугоплавким — точка плавления около  $700^\circ\text{C}$  (по более поздним измерениям —  $960^\circ$ ). На воздухе радий быстро чернел, взаимодействуя с азотом и образуя нитрид  $\text{Ra}_3\text{N}_2$ . Оказалось, что по химической активности элемент № 88 заметно превосходит щелочноземельные металлы. В частности, он бурно разлагает воду по реакции



На Всемирной брюссельской выставке 1958 г. в павильоне Франции демонстрировалась одна из рабочих тетрадок Пьера и Марии Кюри. Рядом стоял и «щелкал» счетчик Гейгера. Тетрадь оставалась радиоактивной и через 60 лет после того, как была заполнена. На снимках — две странички из этой тетради. На этих страничках впервые рукой Пьера Кюри записан символ радия. Под автографами — «радиоавтографы» этих же страниц.



## Будни и практика

На этом, собственно, заканчивается наиболее яркий период истории элемента № 88. В истории радиоактивности будет еще одно бурное двадцатилетие — 30–40-е годы нашего века, когда цепная реакция открытий сделает свой второй виток. Но эти открытия в основном будут связаны уже с другими элементами, прежде всего с ураном.

А что же радий? Можно сказать, что после 1910 г. для него начались будни. Его стали использовать довольно широко. Радиевые препараты применяли для лечения злокачественных опухолей и других тяжелых заболеваний. Соли радия вводили в состав светящихся красок. Немногим позже гамма-излучение радия впервые попытались применить для дефектоскопии металлических изделий. Делались радиевые эталоны единиц радиоактивности. Позже, после открытия нейтрона (1932 г., Д. Чедвик), появились радий-бериллиевые источники нейтронов. Продолжались исследования свойств самого радия и его соединений.

Но с годами, по мере развития ядерной физики и атомной техники, радий постепенно был отодвинут на второй план. Другие радиоактивные элементы и изотопы оказались более приемлемыми и для гамма-дефектоскопии, и для радиотерапии. (Кобальт-60, применяемый ныне для этих целей, намного дешевле и доступнее радия.)

Другие менее опасные излучатели пришли и в производство светящихся красок. Радий-бериллиевые и радон-бериллиевые источники нейтронов тоже постепенно сошли со сцены: появились более совершенные.

Лишь в качестве эталонов радиоактивности соли радия не утратили своих позиций. И еще — как источник радона.

Последнее большое событие в истории элемента № 88 произошло в 1967 г. Практически одновременно в знаменитых лабораториях Дубны и Беркли были получены нейтроно-дефицитные изотопы радия с массовыми числами от 206 до 214. До этого времени были известны лишь изотопы с массовыми числами 213 и от 218 до 230.

Все эти изотопы оказались короткоживущими альфа-излучателями с периодами полураспада от 0,4 до 15 секунд. А самый долгоживущий изотоп радия — тот самый радий-226, который открыли супруги Кюри, — имеет период полураспада 1600 лет.

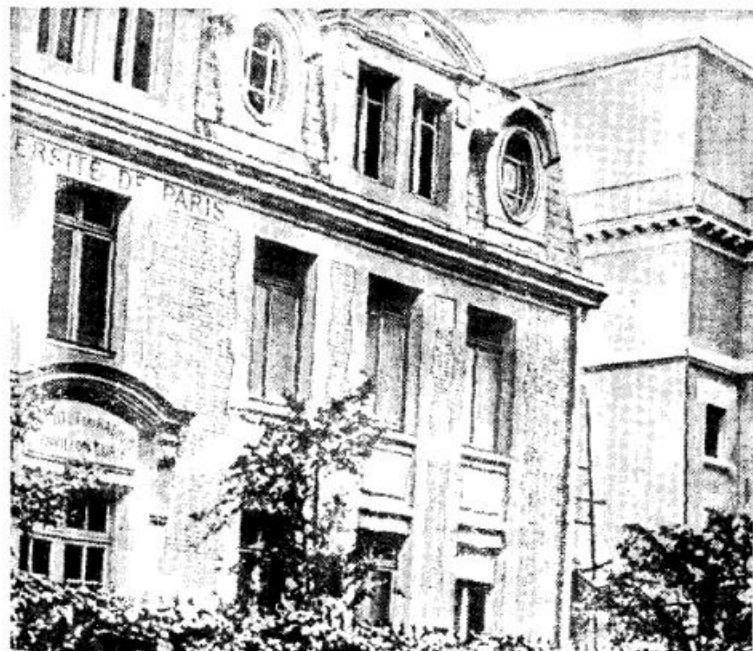
## Радиевые институты

Итак, радий отошел на второй план. Тем не менее и в наши дни в мире активно работает несколько радиевых институтов.

Пьер Кюри до конца своих дней мечтал об организации в Париже Института радия. Такой институт был организован лишь в 1913 г. Он состоял из двух отделений — радиоактивной лаборатории под руководством Марии Склодовской-Кюри и лаборатории биологических исследований и радиотерапии, первым руководителем которого был видный французский медик Клод Рего. Этот институт существует и поныне.

В 1922 г. был основан Радиевый институт в Ленинграде, его первым директором был академик В. И. Вернадский. В этом институте, в отличие от парижского, наряду с физико-химическими отделениями и лабораторией, ведущей

Институт радия в Париже. Вид с улицы Пьера и Марии Кюри



медико-биологические исследования, есть отдел, занимающийся геохимией радиоактивных элементов и минералов.

Третий радиевый институт — преимущественно медицинский, радиологического профиля — был основан в Варшаве в 1932 г. Сейчас он называется Онкологическим институтом и носит имя Марии Склодовской-Кюри. Еще один радиевый институт работает в Вене.

### Как добыли советский радий

Так уж случилось, что история радия всегда драматична...

В конце прошлого века Ферганскую долину пересекала Среднеазиатская железная дорога и начались поиски полезных ископаемых в ее окрестностях. В 1900 г. профессор петербургского Горного института И. А. Антипов сообщил, что в двух образцах кальцита, привезенного из этих мест, он обнаружил следы медного уранита, одного из минералов урана. Вместе с К. А. Непадкевичем Антипов исследовал минералы этого месторождения (Тюя-Муюн-ского), и в 1913 г. в докладе учрежденной незадолго до того Комиссии по исследованию месторождений радиоактивных минералов было сказано: «Руды на радий (в Туркестане) представляются совершенно исключительными по своему составу». И в том же 1913 г. в Берлине (!) было учреждено Международное акционерное общество для извлечения туркестанского радия. Оно начало вывозить драгоценную руду, и лишь первая мировая война прекратила этот узаконенный грабёж.

Лишь после Великой Октябрьской революции радием занялись всерьез. В 1918 г. было принято решение об организации завода и лабораторий для извлечения радия.

Государственный запас драгоценного элемента (в виде руды) находился в Петрограде. Шла война, на город наступали белые. Было решено эвакуировать радиевое сырье в Березники. Вагоны, груженные ферганской рудой, сопровождал химик Л. Н. Богоявленский, который сумел сохранить ценное сырье и в декабре 1918 г., когда Березники были заняты войсками Колчака. Однако попытка организовать производство радиевых препаратов на Березниковском заводе оказалась неудачной. Первые миллиграммы препаратов советского радия были получены на Бондюжском заводе под руководством И. Я. Башилова и В. Г. Хлопина в конце 1924 г.

## АКТИНИЙ



Есть лишь одна причина, по которой элемент № 89 — актиний — интересует сегодня многих. Этот элемент, подобно лантану, оказался родоначальником большого семейства элементов, в которое входят все три кита атомной энергетики — уран, плутоний и торий. Это не заслуга актиния, но тем не менее его место в периодической системе особое.

Впрочем, заметим сразу же, что ни в одной из работ Д. И. Менделеева, связанных с открытием и развитием периодического закона, нет сколько-нибудь серьезных рассуждений об элементе, который должен занять в таблице 89-ю клетку. Более того, даже в последних прижизненных изданиях «Основ химии», вышедших уже в XX в., актинию уделено всего несколько строк, да и то лишь в дополнениях к 21-й главе. Менделеев упоминает о сходстве актиния с торием и о том, что этот элемент «выделяется с торием и осаждается ранее его как от серноватистонадровой соли, так и от перекиси водорода». И все! Пожалуй, ни одному из открытых к тому времени элементов не уделено в «Основах химии» так мало места. Для этого были причины.

### Причины

Спустя десять лет после открытия актиния знаменитый английский физик Фредерик Содди остроумно систематизировал комплекс накопленной к тому времени информации об элементе № 89. Вот он:

«Атомный вес — неизвестен; средняя продолжительность жизни — неизвестна; характер излучения — не испускает лучей; материнское вещество — неизвестно; исходным веществом, вероятно, является уран; продукт распада — радиоактиний»\*.

То обстоятельство, что открытие элемента № 89 в 1899 г. было все-таки признано свершившимся, часть историков науки объясняет некоторой причастностью к это-

\* Изотоп тория с массой 227 и периодом полураспада 18,17 суток.



му делу супругов Пьера и Марии Кюри и их непрекаемым авторитетом во всем, что связано с радиоактивностью.

В хронологической таблице открытия элементов актиний стоит сразу же после полония и радия. В октябре 1899 г. о нем сообщил французский химик Андрэ Дебьерн, один из немногих добровольных помощников Пьера и Марии Кюри в их исследованиях радиоактивных элементов.

Об этом ученом в нашей стране знают немногие и немного. Попробуем хотя бы в малой степени восполнить этот пробел. Дебьерн стал сотрудником супругов Кюри, будучи совсем молодым человеком: ему было около 25 лет. Самое большое его открытие — актиний. Кроме того, он вместе с Марией Склодовской-Кюри получил в 1910 г. первый образец металлического радия. В том же году они подтвердили открытие полония. После смерти Марии Склодовской-Кюри Дебьерн заведовал Лабораторией имени Пьера Кюри в парижском Институте радия.

В записях Марии Склодовской-Кюри сохранились такие строки: «Около 1900 г. Пьер Кюри познакомился с молодым химиком Андрэ Дебьерном, работавшим преподавателем у профессора Фриделя, который очень ценил его как ученого. На предложение Пьера заняться радиоактивностью Андрэ Дебьерн охотно согласился: он принял исследование нового радиоэлемента, существование которого подозревалось в группе железа и редких земель. Он открыл этот элемент, названный актинием (подчеркнуто в оригинале.— *Ред.*). Хотя Андрэ Дебьерн работал в химико-физической лаборатории Сорбоннского университета, руководимого Жаном Перреном, он часто заходил к нам в сарай, вскоре став очень близким другом и нашим, и доктора Кюри \*, а впоследствии и наших детей».

Что же сделал этот молодой химик осенью 1899 г.?

Исследуя остатки урановой смолки, из которой уже были удалены и радий и полоний, он обнаружил слабое излучение. Значит, знаменитая смолка содержала еще один новый элемент? Такое предположение после открытия радия и полония казалось естественным и неоспоримым.

\* Имеется в виду отец Пьера.

м. Дебьерн предложил назвать этот элемент актинием (от греческого  $\alpha\upsilon\tau\iota\varsigma$  — «излучение, свет») по аналогии с радием. Были предприняты попытки выделить новый элемент, но они оказались безуспешными, и Дебьерн вместе с супругами Кюри сосредоточился на радии.

Спустя год с небольшим из такой же содержащей редкие земли фракции урановой смолки получил сильно излучающий раствор немецкий исследователь Ф. Гизель. Ему даже удалось (это стоило колоссального труда) освободить этот раствор от многих примесей, получить относительно чистый излучатель — по сути дела, первый препарат актиния. Но этого Гизель не знал: он считал, что открыл новый элемент, и назвал его эманьем. Но вскоре была доказана идентичность эманья и актиния, и новый элемент «не состоялся».

Самое необычное здесь, наверное, то, что элемент, названный «излучающим» (так дословно переводится название «актиний»), в действительности не мог быть открыт по его излучению. Как теперь известно, самый долгоживущий природный изотоп актиния  $^{227}\text{Ac}$  в подавляющем большинстве случаев распадается, испуская очень мягкие, малоэнергичные бета-лучи. Регистрирующая аппаратура, существовавшая на рубеже XIX и XX вв., не могла уловить это излучение. Нельзя было с ее помощью и зарегистрировать те редкие (примерно 1,2%) случаи, когда эти ядра распадались, испуская альфа-частицы. И Дебьерн, и Гизель открыли элемент № 89 не по его собственному излучению, а по излучению дочерних продуктов: по сути дела, они наблюдали излучение изотопа уже известного тория.

Но новая активность ассоциировалась с лантаном и его семейством. В таблице Менделеева было свободное место для аналога лантана — тяжелого радиоактивного элемента III группы. Сюда и определили актиний. И не ошиблись.

### Следствия

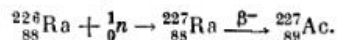
Актиний действительно подобен лантану. У них очень сходные химические свойства: общая валентность (3+), близкие атомные радиусы (1,87 и 2,03 Å), почти идентичное строение большинства соединений. Как и у лантана, большинство солей актиния окрашено в белый

цвет; окись  $As_2O_3$  тоже. А то, что актиний превосходит лантан по химической активности, вполне естественно. Это более тяжелый металл-аналог: валентные электроны циркулируют дальше от ядра. Впрочем, когда речь идет о валентности лантана, актиния и их семейств, еще вопрос, — какие электроны самые главные...

Но, сообщив читателю эти сведения, мы явно забежали вперед. Рассказывать о соединениях прежде, чем о физических свойствах самого элемента, как минимум неприлично. А физические свойства актиния достоверно определены были лишь в 50-х годах, и на то тоже были причины.

Актиний есть в природе. Он, его главный и самый долгоживущий изотоп  $^{227}Ac$ , образуется в процессе распада урана-235. Количество получающегося актиния настолько мало, что этот элемент определенно входит в десятку редчайших элементов Земли. Его содержание в земной коре определяется десятиллиардными долями процента. Подсчитано, что во всех земных минералах содержится лишь 2600 т актиния, а радия (сверхтрудность добычи которого известна не только из трудов Кюри, но и из стихов Маяковского) — примерно 40–50 млн. т.

Извлечение актиния из природных источников (урановых минералов) еще больше осложняется его крайним сходством с элементами редкоземельного семейства. Известный французский радиохимик М. Гайсинский писал: «В некоторых процессах актиний отделяется от лантана, а в других следует за лантаном. Однако при фракционной кристаллизации двойных нитратов лантаноидов с магнием или марганцем актиний не выделяется в первой фракции перед лантаном, а концентрируется между неодимом и самарием. Эта аномалия пока не объяснена. В настоящее время предпочтительным методом получения актиния считается облучение радия нейтронами». Здесь происходит вот что:



Очевидно, что разделить двухвалентный радий и трехвалентный актиний легче, чем выделить тот же актиний из смеси лантана и его аналогов. А период полураспада радия-227 невелик — всего 41 минута. Поэтому быстрее и дешевле всего (если здесь вообще уместно говорить о дешевизне) получать актиний из сверхдрагоценного ра-

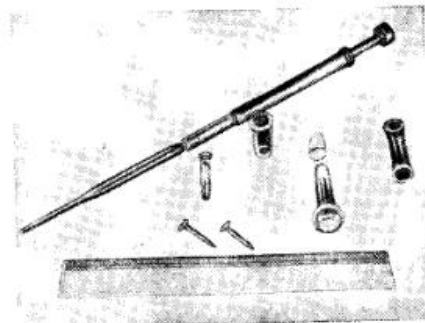
дия. Именно этим путем получили чистые препараты элемента № 89, на которых и были определены его основные свойства. Элементный актиний оказался серебристо-белым металлом, довольно тяжелым (плотность чуть больше  $10 \text{ г/см}^3$ ) и весьма химически активным. Его температура плавления, определенная экспериментально,  $1040 \pm 50^\circ \text{C}$ , а температура кипения, рассчитанная теоретически, около  $3200^\circ \text{C}$ .

На воздухе актиний окисляется до  $As_2O_3$ . Кстати, металлический актиний (в миллиграммовых количествах) сумели получить двумя способами: восстанавливая  $AsCl_3$  парами калия при  $350^\circ \text{C}$  и из трифторида, действуя на него парообразным литием. В последнем случае понадобилась более высокая температура — за  $1000^\circ \text{C}$ , но полученные образцы были чище.

Изотопов актиния сейчас известно 24, три из них встречаются в природе. Это сравнительно долгоживущий актиний-227, актиний-228 (он же мезоторий-11) с периодом полураспада 6,13 часа и актиний-225 с периодом полураспада около 10 суток. Остальные изотопы — искусственные: большинство из них получено при бомбардировке тория различными частицами.

### Последствия

Практическое использование актиния ограничивается источниками нейтронов. Нейтроны в них образуются при облучении бериллия-9 альфа-частицами. А дают альфа-частицы дочерние продукты актиния-227. Есть основания



Для работы с микроколичествами радиоактивных веществ, в том числе с соединениями актиния, радиохимики пользуются специальной и часто весьма миниатюрной лабораторной посудой — такой, как на этой фотографии

полагать, что активный-бериллиевые нейтронные источники отнюдь не самые лучшие и не самые экономичные из устройств такого назначения.

Но это не значит, что активный бесполезен. Науке, и прежде всего ядерной физике, изучение активия дало многое. Заметим сразу же, что актинометрия (важный раздел геофизики) так же мало связана с исследованиями активия, как и активии (обитатели моря) или актиномицины (антибиотики). Но на активии держится знаменитая актиноидная теория Г. Сиборга, и если активии могут существовать без активия, то не будь этого элемента не было бы и этой теории. Элемент франций тоже не был бы открыт, если бы не активий. Точнее, если бы активий-227 не распался двойко и не превращался иногда (в среднем в 12 случаях из 1000) во франций-223.

Изучение этого элемента еще принесет науке немало нового. Физики, например, до сих пор не могут объяснить, почему самый известный и самый изученный изотоп элемента № 89 — активий-227 имеет непостоянный период полураспада. Полученный из радия искусственным путем или образующийся при альфа-распаде чистого протактиния-231, он имеет период полураспада 21,8 года, а выделенный из активийсодержащих минералов — намного меньше. Химики продолжают спорить о возможности существования соединений одновалентного активия. Вроде бы, по существующим представлениям об электронной конфигурации его атома, должны быть такие соединения, а получить их никак не удается!

Одним словом, активий еще не скоро будет считаться прекрасно изученным «хрестоматийным» элементом. Пока же, как светлячок из знаменитого детского рассказа, «он — живой и светится». Светится, правда, не так ярко, как радий, но светится...

## ТОРИЙ



Торий — один из немногих радиоактивных элементов, открытых задолго до появления самого понятия «радиоактивность».

Любопытно, что название этого элемента появилось на тринадцать лет раньше, чем он был в действительности открыт. Подобное случается не часто.

### Сначала было имя

Выдающегося шведского ученого Йенса Якоба Берцелиуса справедливо называли некоронованным королем химиков первой половины XIX столетия. Человек энциклопедических знаний и превосходный аналитик, Берцелиус работал очень плодотворно и почти никогда не ошибался. Авторитет его был так высок, что большинство химиков его времени, прежде чем обнародовать результат какой-либо важной работы, посылали сообщение о ней в Стокгольм, к Берцелиусу. В его лаборатории были определены атомные веса большинства известных тогда элементов (около 50), выделены в свободном состоянии церий и кальций, стронций и барий, кремний и цирконий, открыты селен и торий. Но именно при открытии тория непогрешимый Берцелиус совершил две ошибки.

В 1815 г., анализируя редкий минерал, найденный в округе Фалюн (Швеция), Берцелиус обнаружил в нем окись нового элемента. Этот элемент был назван торием в честь всемогущего древнескандинавского божества Тора. (По преданию, Тор был коллегой Марса и Юпитера одновременно — богом войны, грома и молнии.)

Прошло десять лет, прежде чем Берцелиус обнаружил свою ошибку: вещество, которое он считал окисью тория, на самом деле оказалось фосфатом уже известного иттрия.

«Похоронив» торий, Берцелиус же его «воскресил». Через три года из Норвегии ему прислали еще один редкий минерал, который теперь называют торитом ( $\text{ThSiO}_3$ ). Торит содержит до 77% окиси тория  $\text{ThO}_2$ . Обнаружить столь явный компонент Берцелиусу не составило особого труда. Исследовав выделенную землю, Берцелиус убедился, что



это окись нового элемента, к которому и перешло название «торий».

Получить чистый металлический торий Берцелиусу не удалось. Правда, он восстановил калием фтористые соединения нового элемента и получил серый металлический порошок, сильно загрязненный примесями. Из-за этих примесей произошла вторая ошибка, вернее, серия ошибок при описании свойств элементного тория.

Чистый препарат тория был получен лишь в 1882 г. другим известным шведским химиком — первооткрывателем скандия Ларсом Фредериком Нильсоном.

Следующее важное событие в истории элемента № 90 произошло в 1898 г., когда независимо друг от друга и практически одновременно Мария Склодовская-Кюри и немецкий ученый Герберт Шмидт обнаружили, что торий радиоактивен. Склодовская-Кюри отметила тогда же, что активность чистого тория даже выше активности урана.

Именно радиоактивность — основная причина нынешнего повышенного интереса к элементу № 90. Торий все шире используется в атомной энергетике как сырье для получения первичного ядерного горючего; но не будем забегать вперед.

#### ...кроме радиоактивности

Совершенно очевидно, что первое знакомство с торием не сулило человечеству ничего особенного. Обычный серо-белый металл, довольно тугоплавкий (температура плавления  $1750^{\circ}\text{C}$ ), но малопрочный и очень неустойчивый к действию коррозии. К примеру, в горячей воде скорость коррозии тория и сплавов на его основе в сотни раз выше, чем у алюминия. Следовательно, в качестве конструкционного материала или основы для конструкционных материалов торий не представлял интереса.

Вскоре выяснилось, что добавки тория упрочняют сплавы на основе железа и меди, но никаких особых преимуществ перед другими легирующими элементами торий не имел. Прошло много лет, прежде чем легирование торием приобрело практическое значение. В авиационной и оборонной технике наших дней широко используются многокомпонентные сплавы на основе магния. Наряду с цинком, марганцем, цирконием в их состав входят торий и редкоземельные элементы. Торий заметно повышает прочность и жаростойкость этих легких сплавов, из которых делают

ответственные детали реактивных самолетов, ракет, электронных устройств...

Сейчас торий используют и как катализатор — в процессах органического синтеза и крекинга нефти, а также при получении жидкого топлива из угля. Но все это, если можно так выразиться, приобретения XX в. В XIX же веке выход в практику нашел лишь одно соединение элемента № 90 — его двуокись  $\text{ThO}_2$ . Ее применяли в производстве газокалильных сеток.

В конце XIX в. газовое освещение было распространено больше, чем электрическое. Изобретенные видным австрийским химиком Карлом Ауэром фон Вельсбахом колпачки из окислов церия и тория увеличивали яркость и преобразовывали спектр пламени газовых рожков — свет их становился ярче, ровнее.

Из двуокиси тория — соединения весьма тугоплавкого — пробовали делать и тигли для выплавки редких металлов. Но, выдерживая высочайшие температуры, это вещество частично растворялось во многих жидких металлах и загрязняло их. Потому тигли из  $\text{ThO}_2$  широкого распространения не получили.

#### Источники тория

Вероятно, разговор о практическом применении тория был бы вообще беспредметным, если бы человечество располагало лишь торием, заключенным в торите. Минерал этот очень богат, но редок, так же как и другой богатый ториевый минерал — торинит  $(\text{Th,U})\text{O}_2$ , содержащий от 45 до 93%  $\text{ThO}_2$ .

Однако еще в конце прошлого века при участии Ауэра фон Вельсбаха на Атлантическом побережье Бразилии были начаты разработки монацитовых песков. Минерал монацит — важнейший источник и редкоземельных элементов, и тория. В общем виде формулу этого минерала обычно пишут так:  $(\text{Ce, Th})\text{PO}_4$ , но он содержит, кроме церия, еще и лантан, и празеодим, и неодим, и другие редкие земли. А кроме тория — уран.

Тория в монаците, как правило, содержится от 2,5 до 12%. Богатые монацитовые россыпи, помимо Бразилии, есть в Индии, США, Австралии, Малайзии. Известны и жильные месторождения этого минерала — на юге Африки.

Упомянутые выше торит и торинит (и разновид-

ность последнего — ураноторианит) тоже считаются промышленными минералами тория, но их доля в мировом производстве этого элемента совершенно незначительна. Самое известное месторождение ураноторианита находится на острове Мадагаскар.

Считать торий очень уж редким металлом было бы неправильно. В земной коре его  $8 \cdot 10^{-4}\%$ , примерно столько же, сколько свинца. Но ториевое сырье — это всегда сырье комплексное.

### С пляжа на комбинат

Монацит — минерал прочный, устойчивый против выветривания. При выветривании горных пород, особенно интенсивном в тропической и субтропической зонах, когда почти все минералы разрушаются и растворяются, монацит не изменяется. Ручьи и реки уносят его к морю вместе с другими устойчивыми минералами — цирконом, кварцем, минералами титана. Волны морей и океанов довершают работу по разрушению и сортировке минералов, накопившихся в прибрежной зоне. Под их влиянием происходит концентрирование тяжелых минералов, отчего пески пляжей приобретают темную окраску. Так на пляжах формируются монацитовые россыпи. Но, естественно, и там монацитовый песок перемешан с кварцевым, цирконовым, рутиловым... Поэтому первая стадия производства тория — получение чистого монацитового концентрата.

Для отделения монацита используют разные способы и приспособления. Первоначально грубо отделяют его на дезинтеграторах и концентрационных столах, используя разницу в плотности минералов и их смачиваемости различными жидкостями. Тонкого разделения достигают путем электромагнитной и электростатической сепарации. Полученный таким образом концентрат содержит 95–98% монацита. После этого начинается самое сложное. Отделение тория чрезвычайно затруднено, поскольку монацит содержит элементы, по свойствам близкие к торью, — редкоземельные металлы, уран... Расскажем о выделении тория в самых общих чертах.

Прежде всего минерал «вскрывают». Для этого в промышленных условиях монацит обрабатывают горячими концентрированными растворами серной кислоты или едкого натра. Образующиеся в первом случае сульфаты то-

рия, урана и редких земель растворимы в воде. В случае же щелочного вскрытия ценнейшие компоненты монацита остаются в осадке в виде твердых гидроксидов, которые затем превращают в растворимые соединения. «Отлучение» урана и тория от редких земель происходит на следующей стадии. Сейчас для этого в основном используют процессы экстракции. Чаще всего из водных растворов торий и уран экстрагируют несмешивающимся с водой трибутилфосфатом. Разделение урана и тория происходит на стадии избирательной реэкстракции. При определенных условиях торий из органического растворителя перетягивается в водный раствор азотной кислоты, а уран остается в органической фазе. Хотим еще раз подчеркнуть, что здесь описана лишь принципиальная схема — на практике все обстоит значительно сложнее.

После того как торий отделен, нужно превратить его соединения в металл. Распространены два способа: восстановление двуоксида  $\text{ThO}_2$  или тетрафторида  $\text{ThF}_4$  металлическим кальцием и электролиз расплавленных галогенидов тория. Обычно продуктом этих превращений бывает ториевый порошок, который затем спекают в вакууме при  $1100\text{--}1350^\circ\text{C}$ .

Многочисленные сложности ториевого производства усугубляются необходимостью надежной радиационной защиты.

### Торий и наука о радиоактивности

Радиоактивность — важнейшее свойство тория. Но первые же глубокие исследования этого явления на новом объекте дали неожиданные результаты. Радиоактивность тория отличалась странным непостоянством: хлопнет ли дверь, чихнет или закурит экспериментатор — интенсивность излучения меняется. Первыми натолкнулись на эту странность, начав работу с торием, два молодых профессора Мак-Гиллского университета в Монреале — Э. Резерфорд и Р. Б. Оуэнс. Они очень удивились, когда после тщательного проветривания лаборатории радиоактивность тория стала вовсе незаметной! Радиоактивность зависит от движения воздуха?!

Естественно было предположить, что активность «сдувается» с тория потому, что в процессе распада образуется радиоактивный газообразный продукт. Он был обнаружен,

изучен и назван эманацией тория, или торонем. Сейчас это название употребляется сравнительно редко: торон больше известен как изотоп радон-220.

Вскоре, в 1902 г., в той же монреальской Мак-Гиллской лаборатории Ф. Содди выделил из раствора ториевой соли еще один новый радиоактивный продукт — торий-Х. Торий-Х обнаруживали везде, где присутствовал торий, но после отделения от тория интенсивность его излучения быстро падала. Менее чем за четыре дня она уменьшилась вдвое и продолжала падать в полном соответствии с геометрической прогрессией! Так в физику пришло понятие о периоде полураспада. Позже было установлено, что торий-Х представляет собой сравнительно, короткоживущий изотоп радий-224.

Со временем были обнаружены достаточно многочисленные продукты алхимических превращений тория. Резерфорд изучил их, установил генетические связи. На основе этих исследований им был сформулирован закон радиоактивных превращений, а в мае 1903 г. ученый предложил схему последовательных распадов естественного радиоактивного ряда тория.

Торий оказался родоначальником довольно большого семейства. «Родоначальник», «семейство» — эти слова введены здесь не ради образа, а как общепринятые научные термины. В своем семействе торий можно было бы назвать еще и патриархом; он отличается наибольшим долголетием в этом ряду. Период полураспада тория-232 (а практически весь природный торий — это изотоп  $^{232}\text{Th}$ ) 13,9 млрд. лет. Век всех «отпрысков знатного рода» несравненно короче; самый долгоживущий из них — мезоторий-1 (радий-228) имеет период полураспада 6,7 года. Большинство же изотопов ториевого ряда «живет» всего дни, часы, минуты, секунды, а иногда и миллисекунды. Конечный продукт распада тория-232 — свинец, как и у урана. Но «урановый» свинец и «ториевый» свинец не совсем одно и то же. Торий в конце концов превращается в свинец-208, а уран-238 — в свинец-206.

Постоянство скорости распада и совместное присутствие в минералах материнских и дочерних изотопов (в определенном радиоактивном равновесии) позволили еще в 1904 г. установить, что с их помощью можно измерять геологический возраст. Первым эту идею высказал один из светлейших умов своего времени — Пьер Кюри.

## Торий радиоактивный

Предыдущую часть нашего рассказа можно было бы несколько высокопарно, но в общем точно назвать «служение радиоактивного тория чистой науке». Но науке положено поворачиваться лицом к практике. Первая попытка использовать на практике радиоактивность тория была предпринята в 1913 г. Его «дети» — мезоторий стали применять в производстве светящихся красок, которыми наносили цифры на циферблаты часов. Спустя несколько лет обнаружили, что со временем циферблаты перестают светиться (причину мы знаем: относительно малое время жизни мезотория). Но не это стало причиной слепного изгнания мезотория из лакокрасочного производства: в 20-х годах заметно увеличилась смертность среди рабочих, выписывавших кисточками цифры на циферблатах. Патологоанатомы констатировали накопление мезотория в костях погибших. Выяснилось, что, как многие рисовальщики, рабочие заостряли концы кисточек губами. При этом они проглатывали за год до 1,75 г краски и с ней почти 10 мг мезотория...

Но мезоторий все-таки не сам торий. А как обстоит дело с ним? Как ни странно, поступление тория в желудочно-кишечный тракт (тяжелый металл, к тому же радиоактивный!) не вызывает отравления. Объясняется это тем, что в желудке — кислая среда, и в этих условиях соединения тория гидролизуются. Конечный продукт — нерастворимая гидроокись тория, которая выводится из организма. Острое отравление способна вызвать лишь нереальная доза в 100 г тория...

Выходит, что «вкусать» торий не столь опасно, как дорого: упомянутое количество элемента № 90 стоит около четырех долларов. И все же есть торий не следует даже очень богатым людям. Чрезвычайно опасно попадание тория в кровь. В этом, к сожалению, люди убедились не сразу.

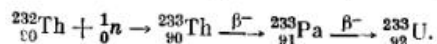
В 20—30-х годах при заболеваниях печени и селезенки для диагностических целей применяли препарат «торотраст», включавший окись тория. Врачи, уверенные в нетоксичности ториевых препаратов, прописывали торотраст тысячам пациентов. И тут начались неприятности. Несколько человек погибли от заболевания кроветворной системы, у некоторых возникли специфические опухоли.



Оказалось, что, попадая в кровь в результате инъекций, торий осаждает белок и тем способствует закупорке капилляров. Отлагаясь в костях близ кровеносных тканей, природный торий-232 становится источником гораздо более опасных для организма изотопов — мезотория, тория-228, торона... Естественно, что торотраст был спешно изъят из употребления.

Как видим, первые попытки применить радиоактивный торий на практике закончились неудачно. Элементом первостепенной важности, стратегическим металлом торий стал лишь после второй мировой войны.

Как и всякий четно-четный изотоп (четное число протонов и нейтронов), торий-232 не способен делиться тепловыми нейтронами и быть ядерным горючим. Но под действием тех же нейтронов с торием происходит вот что:



А уран-233 — отличное ядерное горючее, поддерживающее цепную реакцию.

Уран-233 имеет некоторые преимущества перед другими видами ядерного горючего: при делении его ядер выделяется больше нейтронов. Каждый нейтрон, поглощенный ядром плутония-239 или урана-235, дает 2,03—2,08 новых нейтронов, а урана-233 — намного больше — 2,37!

Применение тория в качестве ядерного горючего затруднено прежде всего тем, что в побочных реакциях образуются изотопы с высокой активностью. Главный из таких загрязнителей, уран-232, — альфа- и гамма-излучатель с периодом полураспада 73,6 года. Тем не менее ториевые ядерные реакторы есть.

Пока расход металлического тория в атомных реакторах намного меньше, чем урана. Его использованию препятствует и то обстоятельство, что торий дороже урана. Уран легче выделить. Некоторые рудные урановые минералы (уранинит, урановая смолка) — это простые окислы урана. У тория таких простых минералов (имеющих серьезное промышленное значение) нет. А попутное выделение из редкоземельных минералов, как мы уже знаем, осложнено сходством тория с элементами семейства лантана.

Тем не менее о ториевой ядерной энергетике следует думать всерьез. Запасы этого элемента только в редкозе-

мельных рудах втрое превышают все мировые запасы урана. Это неминуемо приведет к увеличению роли ториевого ядерного горючего в энергетике будущего.

### Соединения тория

Поскольку ранее речь шла почти исключительно о тории и продуктах его распада, здесь мы коротко расскажем о важнейших соединениях элемента № 90. Впрочем, эпитет «важнейшие», видимо, не совсем уместен: только одно соединение элемента № 90 — его двуокись  $\text{ThO}_2$  имеет самостоятельное применение, остальные же важны лишь для науки и... для производства тория.

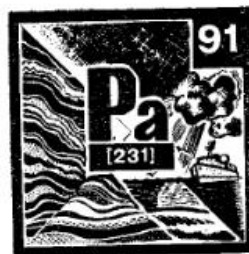
Белый тугоплавкий порошок двуокиси тория имеет структуру флюорита. Его получают при сжигании тория. То же самое вещество  $\text{ThO}_2$  образует защитную пленку на корродирующемся, окисляющемся тории.  $\text{ThO}_2$  — соединение довольно прочное и весьма термостойкое. Достаточно сказать, что остаток сгоревшей калильной сетки газового фонаря представляет собой в основном двуокись тория.

Существование двух других кислородных соединений элемента № 90 остается дискуссионным. Моноокись тория  $\text{ThO}$ , видимо, все-таки существует. В литературе описана ее кристаллическая решетка, аналогичная решетке хлористого натрия. Под действием перекиси водорода образуется перекись тория, которой раньше приписывали формулу  $\text{Th}_2\text{O}_7$ . Сейчас установлено, что состав этого вещества значительно сложнее, поскольку в его молекулу входят и захваченные из раствора анионы.

Нерастворимое в воде соединение состава  $\text{Th}(\text{OH})_4$  имеет щелочной характер и потому, растворяясь в кислотах, не растворяется в щелочах. Начинает выпадать в осадок уже при pH 3,5, в том время как гидроксиды трехвалентных редких земель получают лишь при pH 7—8. Это свойство используют для грубого разделения редкоземельных элементов и тория.

Известно довольно много галогенидов тория: три хлорида, три бромиды, три иодида и фторид (валентности тория в этих соединениях: 4+, 3+ и 2+). Хлориды и фторид бесцветны, бромиды и иодида желтого цвета. Безводный тетрагидрид очень гигроскопичен. Для практики наиболее важны фторид  $\text{ThF}_4$  и иодид  $\text{ThI}_4$ . Первый ис-

## ПРОТАКТИНИЙ



Протактиний — один из немногих элементов, существование которых предсказано почти за полвека до его открытия...

Протактиний — один из немногих элементов с двойственным химическим характером: в одних случаях, в одном валентном состоянии, он подобен элементам V группы ниобию и танталу, а в других — актиноидам...

Протактиний — один из немногих элементов, которые пока намного дороже золота...

Протактиний — один из немногих элементов, которые пока не нашли практического применения.

### Три открытия одного элемента

Располагая химические элементы в периодической системе, Д. И. Менделеев оставлял, как известно, пустые места для еще не открытых элементов. Осталось свободным и место между торием и ураном — двумя самыми тяжелыми из всех известных тогда элементов. Предположив, что атомный вес нового элемента будет около 235, а химические свойства аналогичны свойствам тантала, Менделеев назвал его экатанталом.

Экатантал оказался протактинием.

Первые сообщения об открытии протактиния появились в 1917 г. В некоторых книгах \* название этого элемента переводится как «первый луч», однако эта трактовка представляется слишком буквальной и оттого неточной.

История открытия элемента № 91 — одна из страниц истории поисков радиоактивных элементов и изотопов в природе. Поэтому ее нельзя рассматривать в отрыве от истории других радиоактивных элементов, прежде всего актиния.

Протактиний почти одновременно обнаружили О. Ган и Л. Мейтнер в Германии и Ф. Содди и Дж. Крэнстон в

\* См., в частности, книгу Г. Г. Дюгенова «История открытия химических элементов» (М., 1960).

пользуют для получения тория электролизом и для растворения его в азотной кислоте: чистый торий в чистой  $\text{HNO}_3$  не растворяется, необходима добавка фторида. Тетрафторид же используют для получения тория высокой чистоты, поскольку при температуре выше  $90^\circ\text{C}$  это соединение способно к термической диссоциации:  $\text{ThI}_4 \rightarrow \text{Th} + 2\text{I}_2$ .

При нагревании тория в атмосфере водорода до  $400\text{--}600^\circ\text{C}$  образуется его гидрид  $\text{ThH}_2$ . Если, не меняя условий, начать снижать температуру, то при  $250\text{--}320^\circ\text{C}$  происходит дальнейшее насыщение тория водородом и образуется гидрид состава  $\text{Th}_2\text{H}_{13}$ . Иногда гидриды тория применяют для получения высокочистого тория.

А получить его в чистом виде очень важно. В зависимости от чистоты предел прочности металлического тория на растяжение варьирует от 15 до 29  $\text{кг/мм}^2$  ( $150\text{--}290 \text{ МН/м}^2$ ), а твердость еще больше. Чистый торий — тяжелый (плотность  $11,72 \text{ г/см}^3$ ), достаточно тугоплавкий металл серебристо-белого цвета. Но чтобы увидеть истинный цвет и блеск тория, нужно процарапать черную окисную пленку, которой он, подобно многим другим металлам, защищается от воздействия химически активных компонентов атмосферы. Но, в отличие, скажем, от алюминия, в руки торий не возьмешь: при работе с ним необходимо соблюдать правила радиационной безопасности...

Производство и потребление тория растут достаточно быстрыми темпами и сейчас измеряются, по-видимому, сотнями тонн. Известно, что в 1975 г. общее потребление тория в США составляло 50 тонн, а спустя три года той же стране только на неэнергетические нужды потребовалось без малого 30 тонн тория...

Роль этого элемента в нашей жизни с годами становится все значимее.

Англии. Новый элемент был открыт при химической переработке минералов урана, точно так же, как полоний, радий, актиний. Протактиний нашли в одной из фракций урановой смолки, содержавшей тантал. Недаром Менделеев называл этот элемент экатанталом!

И тогда же обнаружилась связь этого элемента с открытым несколькими годами раньше актинием. Обе группы первых исследователей протактиния обнаружили изотоп, который, испуская альфа-частицы, превращался в актиний. Отсюда и название элемента № 91. Протактиний значит «предшествующий актинию». Греческое *πρῶτος* — это не только «первый», но и «исходный», «начальный».

Так был обнаружен самый долгоживущий изотоп элемента № 91 — протактиний-231 с периодом полураспада около 35 000 лет. Но не этот изотоп протактиния был открыт первым.

Еще в 1913 г. К. Фаянс и С. Гёрлинг обнаружили среди продуктов распада урана короткоживущий изотоп с периодом полураспада чуть больше минуты. Полагая, что открыт новый элемент, ученые назвали его «бревий» (от латинского *brevis* — «короткий»), т. е. короткоживущий. Ган и Мейтнер, пытаясь изучить химию бревия, обнаружили его сходство с танталом. Однако исследовать этот элемент достаточно глубоко им не удалось прежде всего из-за малого времени жизни бревия. Доказать, что бре-



На этой микрофотографии (увеличено примерно в 60 раз) показаны кристаллы одного из немногих точно идентифицированных соединений элемента № 91 — протактинийфтористого калия  $K_2PaF_7$ .

вий — менделеевский экатантал, тогда не смогли, и этот продукт распада урана стали именовать ураном  $X_{11}$ . Лишь спустя несколько лет было доказано, что бревий, он же уран  $X_{11}$ , — природный изотоп протактиния с массовым числом 234.

Получается, что первооткрывателями протактиния были не О. Ган и Л. Мейтнер, а К. Фаянс и О. Гёрлинг...

Спустя еще несколько лет, в 1921 г., протактиний-234 вошел в историю науки. При его детальном изучении Отто Ган открыл явление ядерной изомерии.

Суть этого явления состоит в том, что некоторые радиоактивные ядра способны распадаться двояко — разными способами или с разными периодами полураспада. У протактиния-234 большинство ядер, испуская бета-частицы (период полураспада 1,17 минуты), сразу же превращается в уран-234. Однако одно ядро из тысячи (точнее, 13 из 10 000) избирает другой путь. Испустив гамма-квант, оно превращается в новое ядро, тоже бета-активное, но отличающееся от прочих ядер протактиния-234 более низким уровнем энергии. Такое ядро более стабильно, и у этой разновидности протактиния-234 период полураспада равен 6,7 часа.

Нужно ли говорить, что работа, предпринятая Ганом, потребовала исключительной тщательности. Как и другие первые исследователи протактиния, он работал с исчезающе малыми (исчезающе — во всех смыслах этого слова) количествами элемента, вернее, его соединений, точно не идентифицированных.

Только в 1927 г. американский радиохимик А. Гроссе приготовил первые два миллиграмма чистой окиси протактиния  $Pa_2O_5$ . А спустя еще семь лет А. Гроссе и М. Аграсс сумели получить уже 100 мг  $Pa_2O_5$  и выделить из них металлический протактиний. Тогда и узнали, что цвет этого металла светло-серый и что на воздухе протактиний, подобно алюминию, отгораживается от мира (или от окисления в массе) защитной пленкой окиси.

$Pa_2O_5$  — самое устойчивое и, пожалуй, наиболее изученное из соединений элемента № 91. Этот окисел белого цвета хорошо растворяется в плавиковой кислоте, но не растворяется в азотной и соляной.

До сих пор известно немного соединений протактиния, состав которых установлен точно. Тому есть причины, и главная из них — склонность очень многих соединений



элемента № 91 к гидролизу. В водной среде они существуют в самых разнообразных формах — ионных, коллоидных, полимерных. Форма нахождения протактиния в растворе зависит не только от начального состава раствора, но и от того, каким способом и как давно этот раствор приготовлен.

Нередко протактиний вообще исчезает из раствора: многие его соединения сорбируются стенками стеклянных сосудов.

Не случайно этот элемент считается одним из самых трудных для исследования. В довершение всего — та двойственность химического характера протактиния, о которой упоминалось вначале.

В современной менделеевской таблице протактиний занимает место в отдельной строке, но это, если можно так выразиться, самый неактиноидный актиноид.

#### Актиноид или *d*-элемент?

До появления актиноидной концепции Г. Сиборга протактиний занимал в таблице Менделеева то самое место, которое было оставлено для экатапала. Для этого были все основания. Выделен из танталовой фракции — раз. Образует окисел, аналогичный пятиокисям тантала и ниобия, — два. Большинство достоверно изученных соединений пятивалентного протактиния — галогениды, оксигалогениды, фторпротактинаты, подобны соответствующим соединениям тантала — три. Тем не менее сейчас в таблице Менделеева протактиний, так же, впрочем, как и торий с ураном, вынесен в отдельную графу актиноидов. В чем дело?

Как известно, химические свойства элементов определяются прежде всего строением наружных электронных оболочек атомов. Но не всегда. У элементов побочных подгрупп происходит заполнение «дополнительными» электронами предпоследней оболочки, обозначаемой латинской буквой *d*. Отсюда относительное сходство всех переходных металлов (они же *d*-элементы) независимо от группы. Еще больше сходство элементов, в атомах которых происходит заполнение следующей, *f*-оболочки; примером тому редкое единообразие свойств лантаноидов. В седьмом периоде следовало ожидать, что начиная с элемента № 89, актиния, «лишний» электрон пойдет в предпоследнюю, *6d*-оболочку. Так, собственно, и происходит. Однако уже

у следующего элемента, тория, девятый электрон вклинивается в предыдущую, *5f*-оболочку. То же и у протактиния... Так с позиций актиноидной концепции объясняется нынешнее местонахождение элемента № 91 в таблице Менделеева.

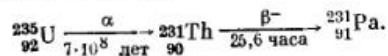
Но не все, что логично объясняется, хорошо согласуется с опытом. Протактиний весьма плохо следует правилам, принятым в актиноидном семействе. Если для большинства этих элементов наиболее характерна валентность  $3+$ , то протактиний чаще всего пятивалентен, а в трехвалентном состоянии до сих пор не получен. Известны, правда, соединения четырехвалентного протактиния, которые получают с помощью восстановителей в атмосфере водорода или инертного газа. Эти соединения подобны аналогичным соединениям некоторых лантаноидов и актиноидов в четырехвалентном состоянии. Этот факт оправдывает размещение элемента № 91 во втором «интерпериодическом узле» менделеевской таблицы.

Двойственность химического поведения протактиния: то он ведет себя как типичный *d*-элемент, подобный ниобию и танталу, то как актиноид — нашла объяснение. Разница энергий у электронов *5f*- и *6d*-уровней в его атомах очень мала — меньше, чем у других актиноидов (исключая торий). Электроны этих слоев могут легко переходить с одного уровня на другой, меняя электронную конфигурацию атома и, следовательно, химические свойства элемента.

По свидетельству Гленна Сиборга, протактиний — «один из самых капризных и неуловимых элементов», и, видимо, под этими словами охотно подписался бы любой химик, имевший когда-либо дело с элементом № 91.

#### Порожденный ураном

По сравнению с возрастом Земли —  $4,5 \cdot 10^9$  лет — время жизни любого изотопа протактиния очень мало. Первичный протактиний, образовавшийся в период формирования нашей планеты, уже давно распался, вымер. Тем не менее протактиний в природе есть. Его очень немного, порядка  $10^{-10}\%$ . Этот протактиний (изотоп  $^{231}\text{Pa}$ ) порожден распадом урана-235. Схема здесь такая:



Этот процесс идет постоянно, поэтому протактивный-231 постоянно присутствует во всех рудах, содержащих уран. Но поскольку продолжительность жизни протактиния-231 в 22 000 раз меньше, чем урана-235, у цифр, отражающих содержание этих изотопов в земной коре, та же пропорция.

А доля порождающего протактиний урана-235 в природной смеси изотопов этого элемента всего 0,7%. Вот почему протактиний принадлежит к числу наименее распространенных на Земле элементов.

В этом расчете, разумеется, не учтен другой природный изотоп протактиния с массовым числом 234 — бывший брейвий. Но на точности расчета это обстоятельство никак не отразилось: слишком уж мало время жизни этого изотопа. Заметим только, что и он — продукт распада ядер урана.

Кроме этих двух изотопов протактиния, сейчас известны еще 17 с массовыми числами от 216 до 238 и периодами полураспада от долей секунды до нескольких дней. Все они образуются искусственным путем в цепочках радиоактивных распадов, идущих при облучении урана-238 и тория-232 протонами, дейтронами или альфа-частицами.

### Об источниках протактиния

Существуют источники протактиния реальные, но бесперспективные, и перспективные, но еще переальные. Отсюда должно быть ясно, почему протактиний до сих пор не нашел практического применения. Исключительная труднодоступность (радия в урановой руде больше, чем протактиния), недостаточная изученность, отсутствие (по сегодняшним критериям) каких-либо выдающихся свойств... И в довершение всего — токсичность, примерно в 250 миллионов раз превышающая токсичность синильной кислоты (последняя цифра выведена из сравнения допустимых концентраций содержания этих веществ в воздухе).

Известно, что в 1955 г. во всех химических лабораториях мира было всего лишь около трех граммов протактиния. Позже его стали получать больше, но не из урановых руд, а из так называемых эфирных шламов, выпадавших при экстракции урана эфиром из азотнокислых растворов. Только на одном из английских урановых заводов (до того,

как он перешел на другую технологию извлечения урана) скопилось около 60 т такого шлама, значительно более богатого протактинием, чем любая урановая руда. Но и этот протактиний был баснословно дорог: его себестоимость составляла примерно 3 тыс. долларов за грамм. А поскольку в урановой промышленности всего мира наблюдается устойчивая тенденция к переработке и использованию бедных руд, природные источники протактиния практически бесперспективны.

Но тут естественно возникает вопрос: стоит ли говорить о перспективности (или бесперспективности) протактиниевого сырья? Чего ради получать этот капризный, токсичный, бесполезный элемент?

Прежде всего ради науки: изучение протактиния продолжается, и это не чья-то прихоть. Несколько лет назад был предложен и развит метод датирования океанических осадков по соотношению в них протактиния-231 и тория-230 (иония); этот метод дал ценные для науки результаты. Уже поэтому протактинием стоит заниматься. И потом... Торий тоже был «безработным» элементом, и германий тоже, и многие другие элементы.

А еще протактиний стоит изучать ради будущего. Известно, что из протактиния-231 сравнительно несложно (при облучении нейтронами) получить искусственный изотоп урана с массовым числом 232. Элемент, порожденный ураном, сам порождает уран. А уран-232 — перспективный альфа-излучатель, способный конкурировать с плутонием-238 и полонием-210, используемыми в земной и космической технике в качестве автономных источников энергии. Подсчитано, что удельное энерговыделение урана-232 примерно в девять раз больше, чем у плутония-238, а периоды полураспада этих изотопов близки. Уже поэтому нельзя считать бесперспективным протактиний, ибо простейший путь к урану-232 лежит через протактиний-231.

Искусственным путем протактиний-231 можно получать в количествах, значительно больших, чем добывалось и добывается его из урана. «Сырье» для этого есть — изотопы тория с массовыми числами 230 и 232. Вероятнее всего, протактиний-231 будут получать в энергетических реакторах с ториевым циклом как побочный продукт при производстве одного из ядерных горючих — урана-233. Полагают, что такие реакторы будут играть важную роль в энергетике близкого будущего.

## УРАН



Элемент № 92 занимает в современной жизни особое место. Главный элемент атомной энергетики и сырье для получения другого главного энергетического элемента — плутония, он причастен ко многим большим открытиям XX в. Уран оказал серьезное влияние и на многие аспекты нашего бытия, далекие от науки, в частности на международную политику. Этот элемент заслуживает особого внимания, и потому мы посвятили ему три рассказа: первый — историко-философского плана, второй — технико-технологического и третий — рассказ участника одного из самых важных открытий, связанных с ураном.

### 1. ЧЕТЫРЕ ЭТАПА ПОЗНАНИЯ

Цепную реакцию можно услышать. В ответственный момент пуска уранового реактора импульсы со счетчиков, регистрирующих нарастание нейтронного потока, попадают на мощный динамик — щелчку. Поначалу щелчки идут не регулярно, с большими интервалами. Потом звучание «щелкуна» начинает напоминать мерную работу метронома. Затем реакция набирает силу — щелчки становятся частыми, как барабанная дробь. А еще через несколько секунд они сливаются в сплошной гул: мощность реакции «выходит на плато» (если судить по форме графика).

Исследования урана развивались, подобно порождаемой им цепной реакции. Вначале сведения о его свойствах, как и первые импульсы цепной реакции, поступали с большими перерывами, от случая к случаю.

Первая важная дата в истории урана — 1789 г., когда немецкий натурфилософ и химик Мартин Генрих Клапрот восстановил извлеченную из саксонской смоляной руды золотисто-желтую «землю» до черного металлоподобного вещества. В честь самой далекой из известных тогда планет (открытой Уильямом Гершелем восемью годами раньше) Клапрот, считая новое вещество элементом, назвал его ураном.

Пятьдесят лет уран Клапрота числился металлом. Только в 1841 г. француз Эжен Пелиго доказал, что, несмотря на характерный металлический блеск, уран Клапрота не элемент, а окисел  $UO_2$ . Пелиго удалось получить настоящий уран — тяжелый металл серо-стального цвета.

Следующий важный шаг в изучении урана сделал в 1874 г. Д. И. Менделеев. Опираясь на разработанную им периодическую систему, он поместил уран в самой дальней клетке своей таблицы. Прежде атомный вес урана считали равным 120. Великий химик удвоил это значение. Через 12 лет предвидение Менделеева было подтверждено опытами немецкого химика Циммермана.

«Для меня лично, — писал позже Менделеев, — уран весьма знаменатель уже потому, что играл выдающуюся роль в утверждении периодического закона, так как перемена его атомного веса вызвана была признанием закона и оправдана действительностью, а для меня (вместе с атомными весами  $Se$  и  $Be$ ) служила пробным камнем общности периодического закона».

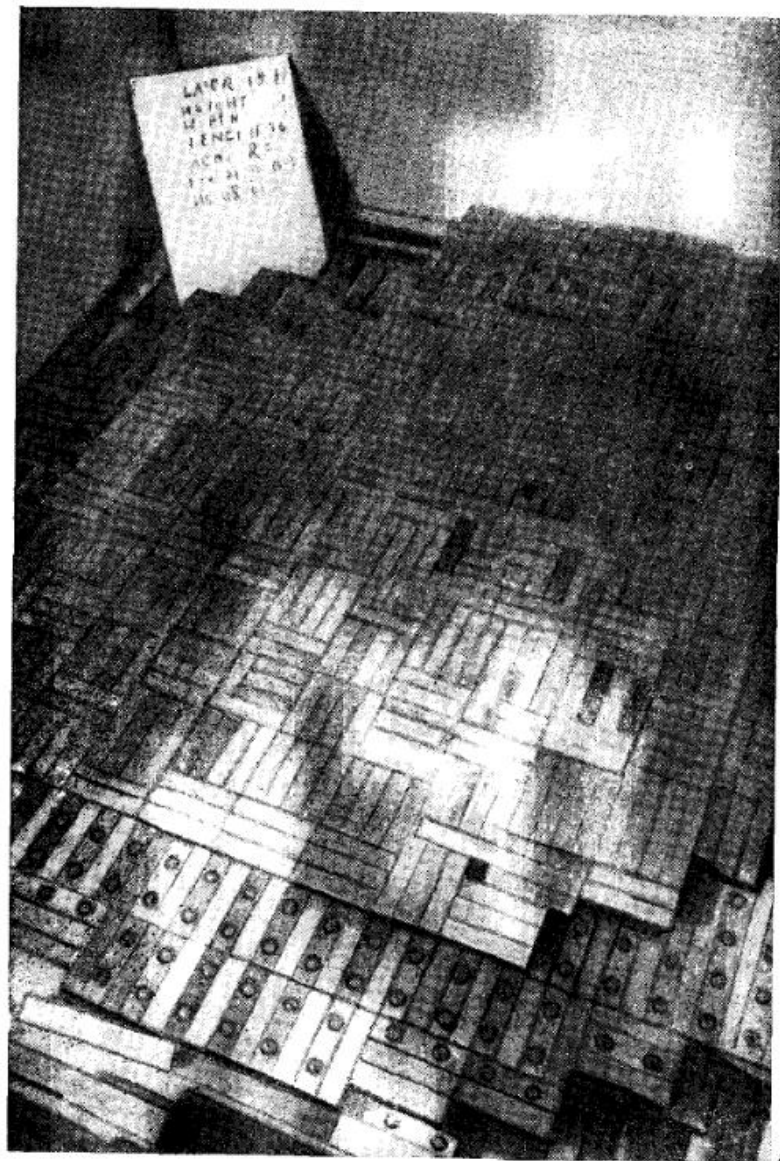
На этом, собственно, заканчивается первый этап истории элемента № 92. Его знали, исследовали, а некоторые его соединения использовали в производстве стекла и фарфора как красители. И только.

Систематические исследования урана начались с 1896 г., после открытия радиоактивности Анри Беккерелем. Напомним коротко эту очень известную историю: без нее рассказ об элементе № 92 будет неполным.

В конце 1895 г. Вильгельм Рентген опубликовал сообщение о проникающем излучении, названном им X-лучами. Открытие сразу же приобрело известность. На заседании Парижской академии наук 20 января 1896 г. всемирно известный математик Анри Пуанкаре зачитал полученное от Рентгена письмо и высказал некоторые соображения по поводу его открытия. Рентгеновские лучи возникали в люминесцирующем пятне стеклянной вакуумной трубки, в том месте, куда падали катодные лучи. Пуанкаре допускал, что X-лучи могут возникать и без помощи катодных, что они сопровождают фосфоресценцию вообще. Однако эта идея требовала экспериментальной проверки. Самой подходящей кандидатурой для такого рода исследований был 43-летний профессор физики Антуан Анри Беккерель.

Изучение фосфоресценции было семейной традицией Беккерелей, ею занимались его дед и отец. Ни у кого





Кладка первого атомного реактора, построенного под руководством Энрико Ферми в Чикаго. Первый в мире атомный реактор на уране был пущен в 1942 г.

в Париже не было такой коллекции фосфоров, как у Беккереля. Были в ней, в частности, кристаллы уранилсульфата калия, которые ярко светились в темноте после выдержки на свету. С ними он и начал экспериментировать.

Беккерель выдерживал на свету тонкие кристаллы, положенные поверх фотопластинки, завернутой в черную бумагу. Между урановым препаратом и защитной бумагой он помещал металлические кольца, считая, что возбуждаемые солнечным светом X-лучи легко пройдут сквозь бумагу, но будут задержаны металлом. В этом случае на пластинке должна появиться кольцевая тень. Опыты оказались успешными: после проявления на пластинке четко просматривались очертания кольца.

Как и Рентген, Беккерель решил прежде всего изучить проникающую способность невидимого излучения. Эта работа требовала многих опытов. Менялись металлические кольца, их расположение, время выдержки на солнце. Но в конце февраля настали ненастные дни, и приготовленные для опытов препараты и пластинки остались в ящике профессорского стола. Первого марта вновь засияло солнце, но пунктуальнейший Беккерель поставил фоновый опыт — «старые» пластинки пошли в проявитель. Силуэты урановых препаратов и металлических колец оказались даже более четкими, чем в прежних экспериментах. Стало ясно, что проникающее излучение никак не связано с фосфоресценцией, что оно существует независимо ни от чего — был бы уран. Или его соединение.

Так свершилось основополагающее открытие ядерной физики — открытие радиоактивности.

Вскоре Беккерель, а затем и другие физики установили, что интенсивность излучения пропорциональна числу атомов урана, содержащихся в препарате, и не зависит от того, в какое химическое соединение они входят. Больше урана — сильнее излучение. Правда, было одно исключение: урановая смоляная руда излучала сильнее, чем чистый уран. Это обстоятельство привело к выдающимся открытиям Пьера и Марии Кюри. Найденные ими новые элементы — радий и полоний оказались продуктами распада урана.

На какое-то время радий затмил уран. Но работа с этим элементом продолжалась.

В 1899 г. Резерфорд обнаружил, что излучение урановых препаратов неоднородно, что есть два вида излуче-

ния — альфа- и бета-лучи. Они несут различный электрический заряд; далеко не одинаковы их пробег в веществе и ионизирующая способность. Чуть позже, в мае 1900 г., Поль Вийар открыл третий вид излучения — гамма-лучи...

Впрочем, бета-частицы — ядерные электроны — и жесткое электромагнитное излучение — гамма-лучи, засвечивающие фотопластинку, вылетают из урановых препаратов лишь потому, что в них, помимо урана, есть другие излучатели — его дочерние продукты. Природным же изотопам урана свойственны лишь два вида распада: альфа-распад, когда от ядра урана отпочковывается ядро гелия, и самопроизвольное (спонтанное) деление. Последнее случается очень редко — примерно с одним ядром из миллиона распавшихся; без какого-либо вмешательства извне ядро разваливается на две примерно равные части.

Однако этот вид распада был обнаружен лишь много лет спустя — в 1939 г., когда в цепной реакции открытий, связанных с ураном, уже явно прослушивалась дробь военных барабанов.

К концу первой трети нашего века казалось, что все свойства элемента № 92 уже изучены вдоль и поперек. Но это только казалось.

В 1934 г. Энрико Ферми начал систематически бомбардировать химические элементы нейтронами — частицами, открытыми Дж. Чедвиком в 1932 г. В результате этой операции в уране появлялись неизвестные прежде радиоактивные вещества. Ферми и его сотрудники считали, что им повезло открыть трансураниевые элементы. Но не все разделяли их оптимизм. Известный немецкий радиохимик Ида Ноддак в статье «Об элементе № 93» писала: «Можно с одинаковыми основаниями считать, что в ядерном взаимодействии, вызываемом нейтронами, протекают реакции, отличные от тех, которые наблюдались прежде при воздействии протонов и альфа-частиц. Возможно, что при бомбардировке нейтронами тяжелые ядра урана делятся на несколько больших осколков — изотопов известных элементов».

Предостережение Иды Ноддак не подействовало. Вера в трансураны все-таки превалировала над верой в возможность деления тяжелых ядер нейтронами. А подорвать одну веру и укрепить другую могли только целенаправленные опыты. В тот год их никто не сделал, и на следующий год, и через год тоже.

Целых четыре года опытные радиохимики пытались найти трансураниевые элементы среди продуктов нейтронного обстрела. Эти тщетные попытки кончились в 1938 г., когда немецкие химики Отто Хан и Фриц Штрассман после долгих и тщательных исследований установили, что в результате нейтронной бомбардировки урана образуются продукты с химическими свойствами бария и лантана, причем это были не радий и не активий. Что это могло означать? Хан и Штрассман не сделали окончательного вывода. Они либо не знали, либо забыли о скептической статье Ноддак.

16 января 1939 г. в английском журнале «Nature» появилось письмо Лизе Мейтнер и Отто Фриша, объяснявших результаты Хана и Штрассмана. В нем говорилось о распаде ядра на две части, впервые были начертаны слова «деление ядер», оценивалась энергия, освобождающаяся в процессе развала атомного ядра.

Статьи Хана и Штрассмана, Мейтнер и Фриша знаменовали новый этап в изучении свойств урана. После их появления цепная реакция познания элемента № 92 набрала силу. Почти во всех физических лабораториях мира ставились опыты по расщеплению уранового ядра. Многие ученые подтвердили правильность выводов Мейтнер и Фриша. Одним из первых был Фредерик Жолио. Французский физик нанес на поверхность фольги тонкий урановый слой и поместил получившуюся мишень в счетчик заряженных частиц. Когда к счетчику подносили источник нейтронов, возникали мощные импульсы: осколки деления ионизовали газ, которым была заполнена камера счетчика. По степени ионизации определили энергию осколков. Она оказалась огромной: при делении одного атома урана высвобождалось примерно 200 млн. эв — столько же энергии освобождается при окислении нескольких миллионов атомов углерода.

Спустя несколько месяцев экспериментально подтвердилось предположение теоретиков о том, что расщепление урана сопровождается испусканием дополнительных нейтронов. Стало ясно: подобно горению, ядерная реакция может поддерживаться сама собой. До открытия деления ученые скептически относились к возможности освоения ядерной энергии в ближайшие 100–200 лет.

Теперь взгляды на перспективы ее практического при-

менения резко изменились. Тысячи ученых занялись исследованиями урана, по поток информации об уране разом иссяк: все было засекречено.

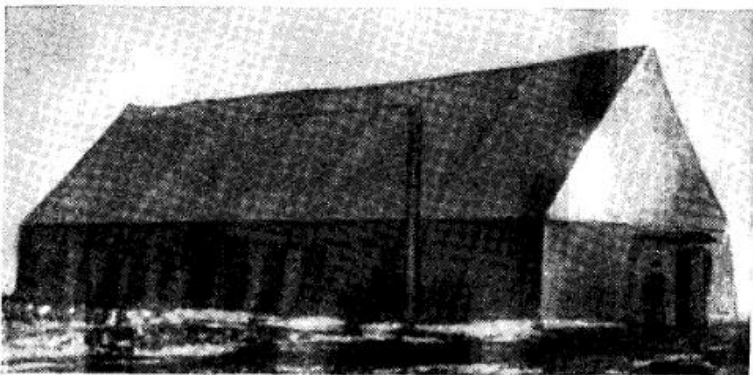
Расщепление уранового ядра и открытие цепной реакции деления не подвели итог каскаду великолепных, ни с чем не сравнимых открытий. «Заключительным аккордом» стало открытие спонтанного деления ядер урана (К. А. Петржак и Г. Н. Флеров, 1939—1940 гг., Ленинград).

Великие открытия 30-х годов легли в основу современной ядерной физики и атомной энергетики. Они позволили глубже понять строение атома. В нейтронных потоках урановых реакторов в наши дни тоннами накапливаются элементы, в десятки раз более ценные, чем золото. В каком-то смысле уран сыграл роль философского камня, о котором грезили поколения алхимиков.

Вместе с тем поток больших открытий, связанных с ураном, практически иссяк. В наши дни исследования урана носят скорее прикладной, чем фундаментальный характер. Оцениваются они не золотыми нобелевскими медалями, а другой, можно сказать, стратегической мерой, где в знаменателе стоят затраченные миллиарды, а в числителе — энергетическая мощь современного мира.

Цепная реакция открытий «вышла на плато». В сплосном гуле частностей даже самое чуткое ухо не улавливает чего-либо из ряда вон выходящего.

Знаменитая курчатовская палатка. В ней шли первые опыты с ядерным горючим



Сегодня естественно взглянуть на уран глазами инженера и, если хотите, потребителя. Но это — тема особого разговора.

## II. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ

После цепи замечательных открытий наступила пора решения сложнейших технических и технологических проблем. Нужно было в невиданных доселе масштабах добывать урановую руду, наладить металлургию нового важнейшего металла, из металла приготовить сплавы, стойкие к радиационным воздействиям и достаточно прочные, чтобы можно было готовить из них реакторные тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ). А еще нужно было научиться разделять изотопы элемента № 92, научиться работать с источниками радиоактивности, превосходящими во много раз естественную радиоактивность всего вещества нашей планеты, очищать облученный уран от осколков деления и вновь пускать его в дело...

Ниже и пойдет речь о решении этих инженерных проблем. Но прежде — о земных запасах элемента № 92, его минералах и рудах.

### Земной уран

До пуска первых ядерных реакторов урановые руды добывали в основном для извлечения из них радия. Мизерные количества урановых соединений использовали в некоторых красителях и катализаторах. Когда из элемента, не имеющего почти никакого промышленного значения, уран превратился в стратегическое сырье № 1, началась настоящая охота за его рудами. Чуть ли не все уголки земного шара были обследованы на уран, благо свойства его соединений — радиоактивность и способность светиться в ультрафиолетовых лучах — сами подсказали принципы конструирования новых чувствительных поисковых приборов, обладающих к тому же достаточно высокой избирательностью.

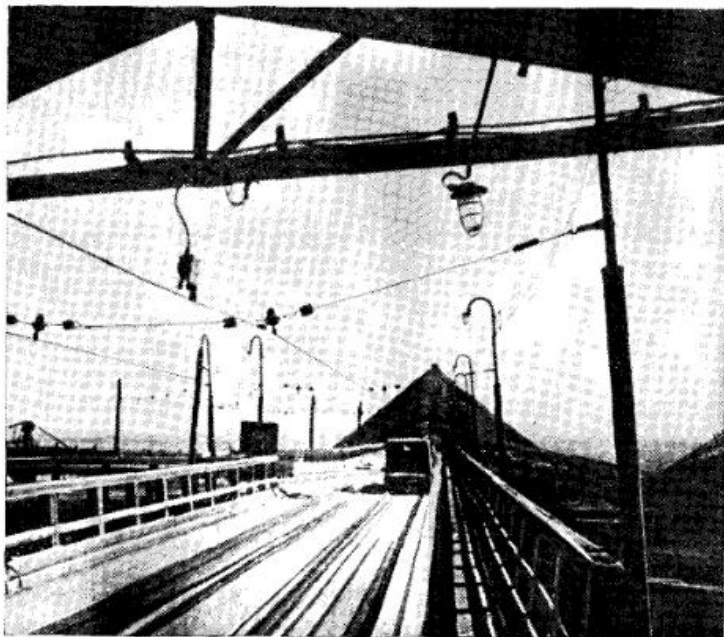
Впрочем, еще до того, как открыли деление ядер урана нейтронами, было определено его содержание во многих горных породах, чтобы выяснить их абсолютный возраст. Оказалось, что средняя концентрация урана в земной коре довольно велика —  $3 \cdot 10^{-4} \%$ . Это значит, что урана на Земле больше, чем серебра, висмута, ртути...



В некоторых распространенных породах и минералах содержание урана значительно выше этой средней величины. Так, в тонне гранита — около 25 г элемента № 92. Полная энергия этих 25 г эквивалентна теплосодержанию 125 т каменного угля. Поэтому (а еще потому, что во всем мире наблюдается устойчивая тенденция к использованию все более бедных урановых руд) можно полагать, что со временем гранит станут считать одним из видов минерального топлива.

Всего в относительно тонком, двадцатикилометровом, верхнем слое Земли заключено около  $10^{14}$  т урана. Количество громадное, способное удовлетворить все энергетические потребности человечества на многие тысячелетия. Энергия этого урана оценивается астрономической цифрой —  $2,36 \cdot 10^{24}$  киловатт-часов. Это в миллионы раз больше, чем могут дать все разведанные и предполагаемые месторождения горючих ископаемых.

Урановая шахта



Подсчитано, что быстрое освобождение энергии урана, заключенного в земной коре, раскалило бы нашу планету до температуры в несколько тысяч градусов. К счастью, урановое тепло в толще Земли выделяется постепенно, по мере того как ядра урана и его дочерних продуктов проходят по длинной цепи радиоактивных превращений. О том, что этот процесс очень медленный, свидетельствуют периоды полураспада природных изотопов урана. Для урана-235 он равен  $7 \cdot 10^8$  лет, для урана-238 —  $4,47 \cdot 10^9$ .

Как ни медленно выделяется урановое тепло, оно все-таки существенно подогревает Землю. Однако если бы в массе планеты концентрация урана была такой же, как в двадцатикилометровом верхнем слое, то температура Земли была бы намного выше существующей. Эти расчеты, подтвержденные прямыми измерениями (на больших глубинах вулканические породы беднее ураном), показывают, что по мере продвижения к центру Земли концентрация урана падает.

#### Минералы и руды

Несколько слов о минералах урана. Их известно много — около 200. Они разные по составу, происхождению и, конечно, далеко не все имеют промышленное значение. Минералы урана делят на первичные, образовавшиеся при формировании земной коры, и вторичные — те, что образовались на более поздних стадиях ее развития под действием тех или иных природных факторов.

Есть минералы урана окислы, есть силикаты, титанаты, тантало-ниобаты и т. д. Из первичных минералов-окислов наиболее известен настуран, он же урановая смолка или смоляная обманка. Обычно этому минералу приписывают формулу  $U_2O_8$ , но в действительности состав настурана переменен, и более точной представляется формула  $UO_{2,25}$ . Обманкой этот минерал называют за переменчивость цвета: темно-серый, черный, зеленовато-черный... А смолкой — за то, что его зерна действительно похожи на капли застывшей смолы.

Из вторичных минералов распространен желто-зеленый отенгит — гидратированный уранилфосфат кальция  $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ .

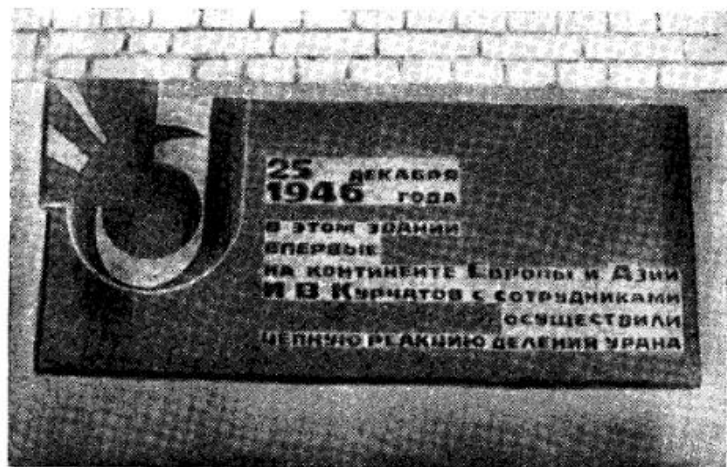
Не всякую породу, содержащую уран, считают рудой. Основной принцип классификации «руда — не руда» — процентное содержание урана в породе. Сегодня проход-

ной балл 0,1%, но иногда и в наши дни бывает выгодно извлекать уран из более бедных руд. Критерий здесь — экономическая целесообразность. В Южной Африке, например, извлекают уран из руд, содержащих всего 0,01% U. Но наряду с ураном эти руды содержат золото.

Часто урану в минералах сопутствуют другие полезные элементы — титан, тантал, редкие земли. Поэтому естественно стремление к комплексной переработке ураносодержащих руд. А поскольку сам уран — элемент рассеянный и основная масса его сосредоточена в породах, содержащих 0,0025% U и меньше, будущее элемента № 92 связывают с бедными рудами.

Способов выделения урана из руд разработано великое множество. Причиной тому, с одной стороны, стратегическая важность элемента № 92, с другой — разнообразие его природных форм. Но каков бы ни был метод, каково бы ни было сырье, любое урановое производство включает три стадии: предварительное концентрирование урановой руды, выщелачивание урана и получение достаточно чистых соединений урана осаждением, экстракцией или ионным обменом. Далее, в зависимости от назначения получаемого урана, следует обогащение продукта изотопом  $^{235}\text{U}$  или сразу же восстановление элементного урана.

Мемориальная доска на здании первого в СССР и в Европе атомного реактора



Обо всех этих стадиях мы расскажем подробнее, но прежде — об основах химии элемента № 92, ибо любая технология основывается на своеобразии свойств элемента № 92 и его соединений.

### Третий из актиноидов

В таблице Менделеева, изданной в 30-х годах, уран занимал место в VI группе, и не без оснований: известно много соединений шестивалентного урана. Сейчас место урана — среди актиноидов, во втором «интерпериодическом узле» менделеевской таблицы, непосредственно под неодимом.

Уран не очень типичный актиноид, известно пять его валентных состояний — от 2+ до 6+. Некоторые соединения урана имеют характерную окраску. Так, растворы трехвалентного урана — красного цвета, четырехвалентного — зеленого, а шестивалентный уран — он существует в форме уранил-иона  $(\text{UO}_2)^{2+}$  — окрашивает растворы в желтый цвет... Тот факт, что шестивалентный уран образует соединения со многими органическими комплексообразователями, оказался очень важным для технологии извлечения элемента № 92.

Характерно, что внешняя электронная оболочка ионов урана всегда заполнена целиком; валентные электроны находятся в предыдущем электронном слое, в подоболочке 5f. Если сравнивать уран с другими элементами, то очевидно, что больше всего на него похож плутоний. Основное различие между ними — большой ионный радиус урана. Кроме того, плутоний наиболее устойчив в четырехвалентном состоянии, а уран — в шестивалентном. Это помогает разделить их, что очень важно: ядерное горючее плутоний-239 получают исключительно из урана, балластного с точки зрения энергетики урана-238. Плутоний образуется в массе урана, и их надо разделить!

Впрочем, раньше пужно получить эту самую массу урана, пройдя длинную технологическую цепочку, начинающуюся с руды. Как правило, многокомпонентной, бедной ураном руды.

### Путь от руды до урана

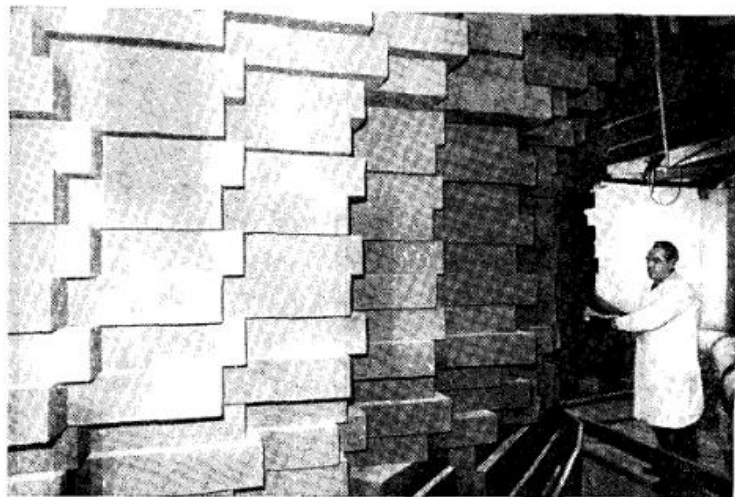
Самая первая стадия уранового производства — концентрирование. Породу дробят и смешивают с водой. Тяжелые компоненты взвеси осаждаются быстрее. Если порода

содержит первичные минералы урана, то они осаждаются быстро: это тяжелые минералы. Вторичные минералы элемента № 92 легче, в этом случае раньше оседает тяжелая пустая порода. (Впрочем, далеко не всегда она действительно пустая; в ней могут быть многие полезные элементы, в том числе и уран.)

Следующая стадия — выщелачивание концентратов, перевод элемента № 92 в раствор. На практике применяют кислотное и щелочное выщелачивание. Первое — дешевле, поскольку для извлечения урана используют серную кислоту. Но если в исходном сырье, как, например, в урановой смолке, уран находится в четырехвалентном состоянии, то этот способ неприменим: четырехвалентный уран в серной кислоте практически не растворяется. И либо нужно прибегнуть к щелочному выщелачиванию, либо предварительно окислять уран до шестивалентного состояния.

Не применяют кислотное выщелачивание и в тех случаях, если урановый концентрат содержит доломит или магнезит. Слишком много кислоты придется тратить на

Графитовая кладка первого советского атомного реактора, сооруженного под руководством академика И. В. Курчатова



их растворение, и в этих случаях лучше воспользоваться едким натром.

Проблему выщелачивания урана из руд быстро и эффективно решает кислородная продувка. В нагретую до  $150^{\circ}\text{C}$  смесь урановой руды с сульфидными минералами подают поток кислорода. При этом из сернистых минералов образуется серная кислота, которая и вымывает уран.

Как видим, проблем и сложностей на этой стадии производства немало, но все они чисто инженерные или экономические, разрешимые и большей частью разрешенные. Химические же сложности только начинаются, и, как говорится, это еще цветочки...

Ягодки начинаются на следующем этапе, когда из полученного раствора нужно избирательно выделить уран. Современные методы — экстракция и ионный обмен — позволили решить и эту проблему. Но сложностей здесь было много.

Раствор содержит не только уран, но и другие катионы. Некоторые из них в определенных условиях ведут себя так же, как уран: экстрагируются теми же органическими растворителями, оседают на тех же ионообменных смолах, выпадают в осадок при тех же условиях. Поэтому для селективного выделения урана приходится использовать многие окислительно-восстановительные реакции, чтобы на каждой стадии избавляться от того или иного нежелательного попутчика. На современных ионообменных смолах уран выделяется весьма селективно.

Методы ионного обмена и экстракции хороши еще и тем, что позволяют достаточно полно извлекать уран из бедных растворов, в литре которых лишь десятые доли грамма элемента № 92.

После этих операций уран переводят в твердое состояние — в один из окислов или в тетрафторид  $\text{UF}_4$ . Но этот уран еще надо очистить от примесей с большим сечением захвата тепловых нейтронов — бора, кадмия, лития, редких земель. Их содержание в конечном продукте не должно превышать сотысячных и миллионных долей процента. Вот и приходится уже полученный технически чистый продукт еще раз растворять — на этот раз в азотной кислоте. Уранилнитрат  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  при экстракции трибутилфосфатом и некоторыми другими веществами дополнительно очищается до нужных кондиций. Затем это вещество кристаллизуют (или осаждают пероксид  $\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )



и начинают осторожно прокалывать. В результате этой операции образуется трехокись урана  $UO_3$ , которую восстанавливают водородом до  $UO_2$ .

Это вещество — предпоследнее на пути от руды к металлу. При температуре от 430 до 600°С оно реагирует с сухим фтористым водородом и превращается в тетрафторид  $UF_4$ . Именно из этого соединения обычно получают металлический уран. Получают с помощью кальция или магния обычным восстановлением.

Таков путь к металлическому урану. Но нам придется еще раз возвратиться к стадии выщелачивания, ибо этой процедуре подвергаются не только концентраты урана, но и главные урановые изделия — отработавшие свое твэлы ядерных реакторов.

Четверть века назад ядерные реакторы обычно называли атомными котлами, подчеркивая тем самым суть происходящих в них процессов: главное — это выделение энергии. Но если в обычных топках горючее полностью (или почти полностью) сгорает, то в ядерном реакторе все обстоит иначе. В рабочем цикле выгорает лишь незначительная доля урана: «протопить» реактор до полного выгорания ядерного горючего технически невозможно. Но в реакторе уран «зашлаковывается» продуктами деления; меньше в нем становится урана-235; цепная реакция неизбежно начинает глхнуть, и поддержать ее можно, только сменив твэлы. А в отработанных твэлах осталась еще большая часть ядерного горючего, и уран из них необходимо вновь пустить в дело.

Поэтому старые твэлы снимают и отправляют на переработку: растворяют их в кислотах и извлекают уран из раствора методом экстракции. Уран легко образует экстрагируемые комплексы и переходит в органическую фазу, а осколки деления, от которых нужно избавиться, остаются в водном растворе. Из органики выделяют уран практически теми же методами, как и при получении его из руды.

Следует отметить, что именно урановая промышленность СССР наметила практические пути к созданию безотходных химических производств.

Проблемы утилизации, очистки, охраны окружающей среды решались одновременно с главными технологическими проблемами.

## Металл

Чем плотнее упаковано ядерное горючее, тем быстрее достигаются критические размеры ядерного реактора, тем быстрее он может начать работать. Самое плотное ураносодержащее вещество, конечно же, металлический уран. Поэтому твэлы современных ядерных реакторов делают из металлического урана. На заре атомного века реакторы загружали окисью урана. Металла не хватало несмотря на предпринятые чрезвычайные меры; не хватало его главным образом потому, что слишком сложной оказалась технология получения урановых слитков.

Металлический уран — материя капризная. Нагретый металл реагирует со всеми применяемыми в обычной металлургии тугоплавкими материалами, урановые порошки вступают в реакции почти со всеми составляющими атмосферы уже при комнатной температуре.

Современный аппарат для восстановления урана — это бесшовная стальная труба, футерованная окисью кальция; иначе материал трубы будет взаимодействовать с ураном. Трубу загружают смесью тетрафторида урана и магния (или кальция) и подогревают до 600°С. Затем включают электрический запал. Быстрая экзотермическая реакция восстановления протекает мгновенно. Реакционная смесь нагревается до высокой температуры и целиком плавится. Тяжелый жидкий уран (его температура плавления 1132°С) стекает на дно аппарата.

Аппарат охлаждается, начинается кристаллизация урана. Его атомы выстраиваются в строгом порядке, образуя кубическую решетку.

Первый фазовый переход происходит при 774°С; кристаллическая решетка остывающего металла становится тетрагональной. Когда температура слитка падает до 668°С, атомы вновь перестраивают свои ряды, располагаясь волнами в параллельных слоях. Плотность достигает максимума — 19,05 г/см<sup>3</sup>. Других изменений при понижении температуры со слитком не происходит.

«Волнистая» урановая структура делает слиток непрочным. Атомы отдельных слоев связаны между собой довольно надежно, зато связь между слоями заметно слабее; поэтому при комнатной температуре уран очень хрупок. Упрочить металл можно, сохранив высокотемпературную кубическую решетку. Такую решетку имеет сплав урана с

молибденом. Именно поэтому молибден стал главным легирующим элементом в производстве металлического урана.

Молибден придает урану и другое полезное качество. Как правило, в мощных реакторах на тепловых нейтронах (а именно такие реакторы распространены в наше время) топливные элементы охлаждаются водой. При малейшем нарушении защитной оболочки блок из чистого урана под угрозой: уран разлагает воду, свободный водород вступает в реакцию — образуется гидрид урана  $H_2U$ . Этот порошок осыпается и уносится водяным потоком — твэл разрушается. Картина совсем иная, если вместо чистого урана применен ураномолибденовый сплав. Такие сплавы устойчивы к действию воды и служат великолепным материалом для главных урановых изделий — твэлов атомных реакторов.

### Легкий изотоп тяжелого элемента

Рассказывая о получении элемента № 92, мы умышленно опустили одну важную стадию. Как известно, не всякий уран способен поддерживать цепную ядерную реакцию. Уран-238, на долю которого в природной смеси изотопов приходится 99,28%, на это не способен. Из-за того и превращают в плутоний уран-238, а природную смесь изотопов урана стремятся либо разделить, либо обогатить изотопом уран-235, способным делиться тепловыми нейтронами.

Способов разделения урана-235 и урана-238 разработано немало. Чаще всего пользуются методом газовой диффузии. Суть его в том, что если через пористую перегородку пропускать смесь двух газов, то легкий будет проходить быстрее. Еще в 1913 г. Ф. Астон таким путем частично разделил изотопы неона.

Большинство соединений урана при нормальных условиях — твердые тела и в газообразное состояние могут быть переведены только при очень высоких температурах, когда ни о каких тонких процессах разделения изотопов не может идти и речи. Однако бесцветное соединение урана с фтором — гексафторид  $UF_6$  возгоняется уже при  $56,5^\circ C$  (при атмосферном давлении).  $UF_6$  — самое летучее соединение урана, и оно лучше всего подходит для разделения его изотопов методом газовой диффузии.

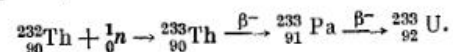
Гексафториду урана свойственна большая химическая активность. Коррозия труб, насосов, емкостей, взаимодействие со смазкой механизмов — небольшой, но внушитель-

ный перечень неприятностей, которые пришлось преодолеть создателям диффузионных заводов. Встретились трудности и посерьезнее.

Гексафторид урана, получаемый фторированием естественной смеси изотопов урана, с «диффузионной» точки зрения можно рассматривать как смесь двух газов с очень близкими молекулярными массами — 349 ( $235+19.6$ ) и 352 ( $238+19.6$ ). Максимальный теоретический коэффициент разделения на одной диффузионной ступени для газов, столь незначительно отличающихся по молекулярной массе, равен всего 1,0043. В реальных условиях эта величина еще меньше. Получается, что повысить концентрацию урана-235 от 0,72 до 99% можно только с помощью нескольких тысяч диффузионных ступеней. Поэтому заводы по разделению изотопов урана занимают территорию в несколько десятков гектаров. Площадь пористых перегородок в разделительных каскадах заводов — величина примерно того же порядка.

### Коротко о других изотопах

В естественный уран, кроме урана-235 и урана-238, входит уран-234. Содержание этого редкого изотопа выражается числом с четырьмя нулями после запятой. Гораздо доступнее искусственный изотоп — уран-233. Его получают, облучая в нейтронном потоке ядерного реактора торий:



По всем правилам ядерной физики уран-233, как изотоп нечетный, делится тепловыми нейтронами. И самое главное, в реакторах с ураном-233 может происходить (и происходит) расширенное воспроизводство ядерного горючего. В обычном реакторе на тепловых нейтронах! Расчеты показывают, что при выгорании в ториевом реакторе килограмма урана-233 в нем же должно накопиться 1,1 кг нового урана-233. Чудо, да и только! Сожгли килограмм горючего, а горючего-то не убавилось.

Впрочем, подобные чудеса возможны лишь с ядерным горючим.

Уран-ториевый цикл в реакторах на тепловых нейтронах — главный конкурент уран-плутониевого цикла воспро-

изводства ядерного горючего в реакторах на быстрых нейтронах... Собственно, только из-за этого отнесли к числу стратегических материалов элемент № 90 — торий.

Другие искусственные изотопы урана не играют заметной роли. Стоит упомянуть еще лишь об уране-239 — первом изотопе в цепи превращений уран-238 → плутоний-239. Его период полураспада всего 23 минуты.

Изотопы урана с массовым числом больше 240 в современных реакторах не успевают образоваться. Слишком мало время жизни урана-240, и он распадается, не успев захватить нейтрон.

В сверхмощных нейтронных потоках термоядерного взрыва ядро урана за миллионную долю секунды успевает захватить до 19 нейтронов. При этом рождаются изотопы урана с массовыми числами от 239 до 257. Об их существовании узнали по появлению в продуктах термоядерного взрыва далеких трансурановых элементов — потомков тяжелых изотопов урана. Самы «основатели рода» слишком неустойчивы к бета-распаду и переходят в высшие элементы задолго до извлечения продуктов ядерных реакций из перемешанной взрывом породы.

В современных тепловых реакторах сгорает уран-235. В уже существующих реакторах на быстрых нейтронах освобождается энергия ядер распространяемого изотопа — урана-238, и если энергия — подлинное богатство, то урановые ядра уже в недалеком будущем облагодетельствуют человечество: энергия элемента № 92 станет основой нашего существования.

Жизненно важно сделать так, чтобы уран и его производные сгорали только в атомных реакторах мирных энергетических установок, сгорали медленно, без дыма и пламени.

### Урановые часы

Еще в 1904 г. Эрнест Резерфорд обратил внимание на то, что возраст Земли и древнейших минералов — величина того же порядка, что и период полураспада урана (тогда еще не существовало понятия «изотопы»). Тогда же он предложил по количеству гелия и урана, содержащихся в плотной породе, определять ее возраст.

Но вскоре выяснилось, что определять возраст минералов точно по рецепту Резерфорда — дело ненадежное: крайне подвижные атомы гелия легко диффундируют даже в

плотных породах. Они проникают в окружающие минералы, а вблизи материнских урановых ядер остается значительно меньше гелия, чем следует по законам радиоактивного распада. Поэтому в наши дни возраст пород вычисляют по соотношению урана и радиогенного свинца — конечного продукта распада урановых ядер.

Обычные часы повторяют свои показания. Возраст измеряется «накопленным» временем. Такое время отсчитывали древние клеписидры, по желобам которых вода текла из сосуда в сосуд. В урановых часах по желобу ядерных превращений перетекают изотопы тяжелых элементов. Здесь в отличие от клеписидры другие масштабы: вместо минут и часов — миллиарды лет.

Урановые часы — весьма универсальный инструмент. Изотопы урана содержатся во многих породах. Концентрация урана в земной коре в среднем равна трем частям на миллион. Этого достаточно, чтобы измерить соотношение урана и свинца, а затем по несложным формулам радиоактивного распада рассчитать время, прошедшее с момента кристаллизации минерала.

Урано-свинцовым способом ученые измерили возраст древнейших минералов, а по возрасту метеоритов определили дату рождения планеты Земля. Известен и возраст лунного грунта. Самые молодые куски лунного вещества прожили срок больше возраста древнейших земных минералов. Уже в течение 3 млрд. лет на Луне не бывает вулканических катастроф и естественный спутник Земли остается пассивным телом. Только метеориты и «солнечный ветер» изменяют его поверхность...

Отсчитывать возраст минералов можно и по спонтанному делению урановых ядер. Сравнительно недавно разработана остроумная методика выявления и подсчета актов спонтанного деления. На ее основе и возник способ датировки твердых тел, содержащих уран. Возраст твердого тела пропорционален числу распавшихся в нем атомов урана, а это число определяется числом следов — треков, оставляемых осколками в веществе. Дело лишь за тем, чтобы подсчитать число треков.

Осколки спонтанного деления с громадной скоростью врезаются в атомные порядки окружающего вещества. Они оставляют за собой следы из смещенных со своих мест атомов. Оказалось, что после определенной химической обработки (травления) следы осколков становятся



видимыми в микроскоп; их можно сосчитать. По отношению концентрации урана в исследуемом образце к «концентрации» треков вычисляют и возраст старинной вазы, и дату образования слюды — величины, отличающиеся в десятки миллионов раз. Это еще раз подтверждает исключительную универсальность урановых часов.

### III. КАК БЫЛО ОТКРЫТО СПОНТАННОЕ ДЕЛЕНИЕ

В 1938 г. был открыт процесс деления атомных ядер урана нейтронами. А год спустя молодые советские физики К. А. Петряк и Г. Н. Флеров, работая под руководством И. В. Курчатова, открыли спонтанное (самопроизвольное) деление ядер урана на два осколка со сравнительно близкими массами. В дипломе на открытие записано, что это «новый вид радиоактивности, при котором первоначальное ядро превращается в два ядра, разлетающихся с кинетической энергией около 160 Мэв».

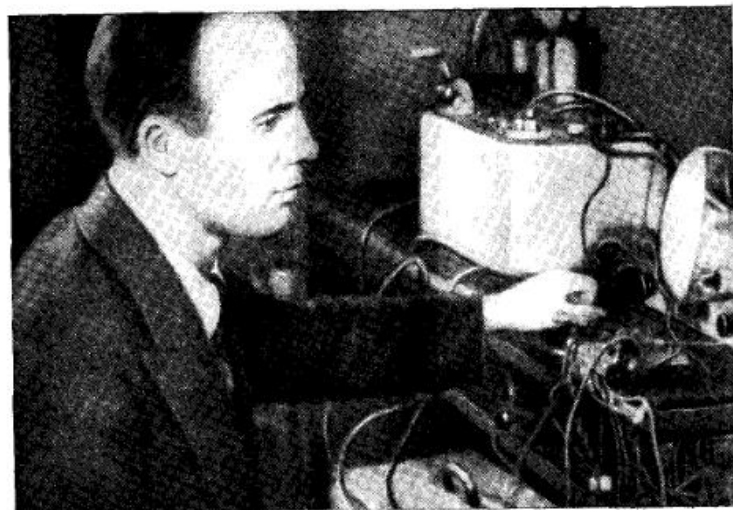
Распространено мнение, что спонтанное деление — процесс редкий. Это не так: спонтанно делятся ядра всех элементов тяжелее тория. Этот процесс лимитирует массу ядра, определяет границу периодической системы и, следовательно, облик Вселенной. Это, пожалуй, наиболее важный из всех процессов ядерного распада.

Спонтанное деление оказалось основным процессом распада для первого изотопа элемента № 104 — курчатовия, синтезированного в 1964 г. в Дубне группой ученых во главе с академиком Г. Н. Флеровым.

О том, как было открыто спонтанное деление, о людях науки конца 30-х годов рассказал в 1969 г. корреспонденту «Химии и жизни» один из авторов открытия, доктор физико-математических наук Константин Антонович Петряк.

«...Спонтанное деление ядер урана было впервые обнаружено в 1939 г. в Ленинграде. Но окончательное подтверждение открытия удалось получить лишь через год под Москвой. «Под» — не в смысле «поблизости от», а в самом прямом смысле этого слова. Можно указать место последних опытов еще более определенно: не просто под Москвой, а под нынешним Ленинградским проспектом Москвы, на станции метро «Динамо»...

В дипломе на открытие, который мы потом получили, стоят лишь две фамилии — Г. Н. Флерова и моя, но их могло бы (а может быть, и должно бы) быть три.



Кинохроника сохранила кадры конца 30-х годов, на которых запечатлены молодые К. А. Петряк (ныне доктор физико-математических наук) и Г. Н. Флеров (ныне академик, лауреат Ленинской премии). Спонтанное деление ядер урана было открыто очень молодыми учеными

Чудом сохранился наш первый отчет об этой работе — обычный отчет, какие во всех лабораториях пишут в конце года. Обратите внимание на последнюю страницу:

«Тот факт, что тяжелые ядра могут самопроизвольно делиться, приводит к крайне существенным следствиям не только в ядерной физике, но и в химии в вопросе о границе периодической системы элементов. Очередная задача исследования заключается, однако, в настоящий момент не столько в анализе этих следствий, сколько в накоплении экспериментальных фактов, начало которому, как мы надеемся, положено этой работой».

Во всяком случае, так мы считали 30 лет назад. Читайте дальше: «Выражаем искреннюю благодарность нашему руководителю проф. И. В. Курчатову, наметившему все основные контрольные опыты и принимавшему самое непосредственное участие в обсуждении результатов».

Не считайте эту фразу просто актом вежливости. Заслуга Игоря Васильевича не меньше нашей. Но руководитель, «наметивший все основные контрольные опыты и принимавший самое непосредственное участие в обсуждении результатов», наотрез отказался стать соавтором работы, сделанной руками его учеников. А мы действительно были его учениками — и я, и Георгий Николаевич — Г. Н., как его зовут теперь физики.

В предвоенные годы ядерной физикой занимались сравнительно немногие. И еще меньше было людей, которые, как Курчатов, верили в прикладные возможности этой науки. Именно этим объясняю я тот, к примеру, факт, что почти все приборы для исследований — счетчики частиц, усилители импульсов — мы делали своими руками. Один из таких приборов стал темой моей дипломной работы, а руководителем ее был Игорь Васильевич. Он в то время разрывался на три фронта — вел лабораторию в Физтехе (главная ядерно-физическая лаборатория тех лет), где всю атомную тематику Абрам Федорович Иоффе отдал «на откуп» Курчатову, заведовал физическим отделом у нас в РИАНе\*, да еще заведовал кафедрой в Педагогическом институте. Бороды он еще не носил.

\* Радиевый институт Академии наук СССР, ныне Радиевый институт им. В. Г. Хлопина; Физтех — Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Академии наук СССР.

Спустя года два — я продолжал заниматься приборостроением — Курчатов прислал ко мне на консультацию студента Флерова, задиристого и самолюбивого. Тема его диплома была близка моей, оба мы были молоды и вскоре стали работать сообща, хотя формально были сотрудниками разных институтов.

А спустя какое-то время, кажется, это было в самом конце тридцати восьмого года, о ядре заговорили всерьез. Умы взбудоражило сообщение, что Галя и Штрассман в Германии открыли деление ядер урана нейтронами. Они пытались получить новый элемент, а натолкнулись на новое явление. Явление, интересное прежде всего своим энергосвободением — огромным количеством энергии, высвобождавшейся при каждом элементарном акте.

Курчатов поручил нам с Флеровым повторить эти опыты, воспроизвести их. Уран был (в виде урановой смолки), радон-бериллиевый источник нейтронов — тоже, а на регистрирующих приборах мы оба к тому времени собаку съели.

Результаты Галя и Штрассмана заинтересовали не только Курчатова, заинтересовали прежде всего энергетической стороной дела. И естественно, многие физики задумались, а не могут ли эти ядра делиться сами по себе, спонтанно. Нильс Бор рассчитал даже время жизни урана по спонтанному делению и получил  $10^{22}$  лет. Либби попробовал обнаружить спонтанное деление экспериментально, но сумел установить лишь нижний предел —  $10^{14}$  лет — и прекратил опыты.

Начиная свои опыты, мы не ставили целью открытие спонтанного деления, а искали энергетический «порог» деления урана, т. е. хотели выяснить, как зависит процесс деления от энергии нейтронов. В нашем распоряжении была обычная ионизационная камера и обычная по тем временам регистрирующая радиоаппаратура, смонтированная собственноручно.

В каждом приличном опыте положено прежде всего смотреть пулевой эффект, т. е. узнать, что дают измерения при отсутствии возбудителя процесса, в нашем случае — источника нейтронов.

И всякий раз, когда измеряли пулевой эффект, он не был равен нулю: камера нет-нет, да щелкнет! Объясняли это чем угодно, но только не спонтанным делением: проезжили трамваями, космическим излучением, несовершенством

усилительной аппаратуры, влиянием посторонних нейтронных источников.

Когда первый раз сообщили об этом Курчатову, реакция его была не слишком положительной: «Это какая-то грязь». От греха подальше, т. е. от ртутных источников нейтронов, перебрались из РИАНа в Физтех. Но и там камера щелкала. Остались трамвай, космика, осталась та же аппаратура, но исключить возможность нового явления — самопроизвольного деления ядер — тоже не было оснований (кроме теоретических расчетов Бора). Идея эта родилась при обсуждении результатов опытов с Курчатовым. Эффект был — слабый, но был! Тут же придумали опыт, в сущности очень простой: решили сделать ионизационную камеру многослойной, как радиоконденсатор. Если «щелчки» от урана, то увеличение количества урана в камере должно привести к более частым щелчкам!

Щелчки стали чаще. Это усиливало версию о новом явлении, но уверенности у нас не было.

Сообщение о последних опытах и дальнейших планах нашей работы Курчатов встретил серьезно и, я бы сказал, сердито: «Если действительно так, если наблюдается у вас новое явление, то это... Это бывает раз в жизни, и то не у всех. И пужно бросить все и заниматься явлением — год, два, десять, сколько понадобится», — и тут же набросал новую программу исследований.

Предстояло доказать, что все другие причины — аппаратура, трамвай, электрическая сеть, космос — несущественны, что эффект не от них.

С радиотехникой и электричеством разделились довольно быстро — за полгода. Оставался космос: жесткая составляющая космического излучения могла дать такие же пики, такие же щелчки.

Сначала думали от космического излучения спрятаться на дне моря — померить нулевой фон, находясь на подводной лодке. От этой идеи пришлось отказаться: Балтика мелка, двадцатиметровый слой воды от космического излучения почти не защищает. Но в то время в Москве уже работало метро.

Абрам Федорович Иоффе, директор Физико-технического института, академик с мировым именем, написал письмо наркому путей сообщения. Он просил разрешить нам поэкспериментировать под землей, на одной из станций метро. Вскоре пришел ответ на красивой зеленой бу-

маге. Ответ положительный. Более того, нарком обязывал своих подчиненных оказывать физикам всемерную помощь. Эта бумага помогла нам быстро, на пассажирских поездах, перевезти в Москву необходимое оборудование, и вскоре мы — Г. Н., я и аппаратура — обосновались в небольшой комнате на станции метро «Динамо». Там мы и работали месяцев шесть — восемь.

Глубина станции — около 60 м, это эквивалентно 180 м воды. В таких условиях космический фон уменьшался на 95%. Работали в основном ночью: тихо, никто не мешает, да и мы никому. Поезда не искрят... На «Динамо» повторили все, что делали на уровне моря. Эффект был! За сороковой год все закончили, и Иоффе телеграфом послал наше сообщение в «Physical Review».

Вот и вся история. Впрочем, еще до поездки в Москву случилась еще одна история, о которой оба мы вспоминаем с улыбкой. Но тогда нам было не до смеха: в один «прекрасный» день многократно наблюдавшийся нами эффект вдруг пропал. Можете представить наше положение и состояние. День, другой, третий... Две недели, и ни одного щелчка!

Перебрали всю аппаратуру, проверили каждый контакт — эффекта нет. Курчатов проявил максимум такта. Придет, поздоровается. «Ну, как?» Никакого шума, никакого давления. Зато мы нервничали, особенно Г. Н. У него же характер — виет. Сам завелся и других дозаводил. Кончилось ссорой, и на правах старшего (по возрасту) я выпроводил его из лаборатории.

Пытаюсь сосредоточиться, мысленно перебираю всю схему — нет, все проверено. Не перебирали лишь самую импульсную камеру. Но что в ней может быть? Конструкция — то простейшая: диски, покрытые урановой смолкой и склеенные между собой шеллаком... Все-таки разобрал ее.

Оказалось, что от долгого употребления, от дорожной тряски или других причин слои расклеились, окись урана осыпалась, и эффект, естественно, не мог не пропасть. За ночь я нанес на все пластины новый урановый слой, собрал камеру, подключил аппаратуру. Щелкала...

Утром пришли Игорь Васильевич и Г. Н. Эффект был, и мы па радостях на два дня уехали в Волхов.

И еще об одном хочу сказать — о стиле работы в лабораториях Курчатова, Иоффе, Хлопина... Нас никто не заставлял приходить к определенному часу. Понятия «та-



бель» не существовало. А работали даже больше, чем сейчас, — мое такое мнение. Когда занимались спонтанным делением, по две недели домой не приходили. Допускаю, впрочем, что просто брюзжу: «Да, были люди в наше время...» Впрочем, с молодежью — и студенческой, и научной — контакт постоянный и сейчас. Очень хорошие есть ребята — думающие, резкие...

Вот и все, что могу вам рассказать про то, как было открыто спонтанное деление...

**ЕЩЕ ОДИН ИСТОЧНИК УРАНА.** В наши дни им стала морская вода. Уже действуют опытно-промышленные установки для извлечения урана из воды специальными сорбентами: окисью титана или акриловым волокном, обработанным определенными реактивами.

**КТО СКОЛЬКО.** В начале 80-х годов производство урана в капиталистических странах составляло около 50 000 т в год (в пересчете на  $U_3O_8$ ). Примерно треть этого количества давала промышленность США. На втором месте — Канада, далее ЮАР, Нигер, Габон, Намибия. Из европейских стран больше всего урана и его соединений производит Франция, однако ее доля была почти в семь раз меньше, чем США.

**НЕТРАДИЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ.** Хотя не лишено оснований утверждение о том, что в наши дни химия урана и плутония изучена лучше, чем химия таких традиционных элементов, как железо, однако и в наши дни химики получают новые урановые соединения. Так, в 1977 г. журнал «Радиохимия» т. XIX, вып. 6 сообщил о двух новых соединениях уранила. Их состав —  $MUO_2(SO_4)_2 \cdot 5H_2O$ , где M — ион двухвалентного марганца или кобальта. О том, что новые соединения — именно двойные соли, а не смесь двух похожих солей, свидетельствовали рентгенограммы.

## НЕПТУНИЙ



4 июня 1934 г. итальянский физик Орсо Марио Корбино произнес речь на сессии академии Линччи\*. Он рассказал о нейтронных бомбардировках урана и поисках 93-го элемента, предпринятых физиками Римского университета во главе с Энрико Ферми. Результаты были столь обнадеживающими, что конец речи звучал так: «По этим успешным экспери-

ментам, за которыми я слежу ежедневно, я полагаю себя вправе заключить, что новый элемент уже получен».

Корбино не преувеличил: новый элемент действительно был получен, однако доказать это не удалось... Тем не менее всемирно известные нейтронные опыты Энрико Ферми навсегда вошли в историю естествознания как первая научно обоснованная попытка синтезировать трансуранный элемент. Попытка, которую, как это ни парадоксально, можно одинаково считать удачной и неудачной.

Вот подробности.

### Нейтронные опыты Ферми

В январе 1934 г. Фредерик Жолио и Ирэн Кюри сообщили об открытии искусственной радиоактивности. Облучив алюминий альфа-частицами, они получили радиоактивный фосфор.

Познакомившись со статьей французских ученых, Энрико Ферми решил вызвать радиоактивность нейтронами. Теоретикам в те годы еще не было ясно, можно ли добиться этого с помощью нейтральных частиц. Ответ на вопрос могли дать только опыты.

Как и Фредерик Жолио, Ферми начал эксперименты с легкими элементами. Методика была проста: после облучения нейтронами исследуемое вещество подносили к тонкому окну счетчика Гейгера. Ни водород, ни гелий, ни литий, ни бор не проявили активности. Тем не менее опыты продолжались. Вскоре дошла очередь до фтора.

\* Так называется старинная итальянская академия «рысьеглазых», членом которой был еще Галилео Галилей.



Фотография 1934 г. На ней — молодые итальянские ученые, первыми в мире получившие трансурановый элемент, но не сумевшие его идентифицировать. Слева направо: Д'Агостино, Сегре, Амальди, Разетти, Ферми

Счетчик заработал полным ходом, когда к его окну поднесли облученную плавиковую кислоту. Сделав вывод, что с помощью нейтронов можно превратить нерадиоактивные ядра в радиоактивные, Ферми не остановился на этом. Он решил подвергнуть нейтронному обстрелу тяжелые элементы. Это было важное решение: в опытах супругов Жюлио-Кюри бомбардировка вольфрама, золота и свинца ничего не дала. Это и понятно: заряд тяжелых ядер велик, и они, разумеется, отталкивают одноименно заряженную альфа-частицу с огромной силой. «Альфа-снаряд» не долетает до ядра-мишени.

На нейтральную частицу электрические силы не действуют. У нейтрона были шансы проникнуть в массивное ядро и что-то там натворить...

В группу Ферми кроме него самого входили талантливые молодые физики Франко Разетти, Эмилио Сегре, Эдвардо Амальди и химик Оскар Д'Агостино. Они и начали систематические исследования. Химические элементы облучались один за другим. Иногда, если паведенная активность исчезала не слишком быстро, удавалось определить атомный номер радиоактивного излучателя по его химическим свойствам...

Так, когда физики облучали нейтронами железо, оно становилось радиоактивным. По-видимому, часть его атомов превращалась в радиоактивный изотоп одного из соседних элементов. Но какого из них? Чтобы выяснить это, к азотнокислому раствору облученного железа добавляли соли хрома, марганца, кобальта. Затем по известным свойствам эти элементы выделяли из растворов. Счетчик Гейгера молчал, когда к нему подносили фракции, содержащие хром или кобальт. Если же у окна гейгеровской трубки помещали извлеченные марганцевые соли, начинался счет. Получалось, что под действием нейтронов железо превратилось в марганец...

Особенно большие надежды физики связывали с облучением элемента № 92, занимавшего тогда в таблице Менделеева последнюю клетку. «Папа» Ферми (прозванный так друзьями за непогрешимость во всех делах, касавшихся физики) ожидал, что естественный уран, захватив нейтрон, перейдет в искусственный изотоп  $^{239}\text{U}$ , а затем уран-239, испустив бета-частицу, превратится в изотоп первого зауранового элемента с атомным номером 93!

На первых порах надежды сбывались. Из облученного нейтронами урана Д'Агостино выделил излучатель с периодом полураспада 13 минут. Во всех химических процедурах неизвестная активность следовала за рением. Напрашивался вывод: химические свойства рения и полученного в нейтронной бомбардировке радиоактивного изотопа близки между собой. Из урана после нейтронного захвата мог получиться только очень тяжелый элемент. Среди тяжелых элементов химическим аналогом рения мог быть только элемент № 93. Во всяком случае, так считалось в 1934 г.

Нашли и дополнительные доказательства. Поставили решающий контрольный опыт — *experimentum crucis*, основанный на простой логически ясной идее: если растворить облученный уран и очистить раствор от всех элементов с атомными номерами от 82 до 92 (свинец — уран), то в этой, уже совсем не мутной, водичке легче всего будет поймать трансурановую рыбку. Только бы осталась в растворе хоть какая-нибудь активность! Ферми и его коллеги (как впрочем, и все физики в те годы) не допускали мысли, что легкий нейтрон может так «переворочить» урановое ядро, чтобы из него получалась «досвинцовая» активность. Ведь для этого нужно вырвать из уранового ядра десяток протонов, — задача непосильная для легкой частицы.

Раствор очистили. Тринадцатиминутный изотоп остался! Казалось, первый трансурановый элемент состоялся... И все же что-то было не так. Настораживали данные, появившиеся в других лабораториях: в облученном уране нашли несколько радиоактивных изотопов, химические свойства которых позволяли считать их трансурановыми элементами с атомными номерами от 93 до 96. Но в то же время в тех же опытах были зарегистрированы излучатели со свойствами тория, протактиния и других доурановых элементов. Возникла невероятная путаница. Вокруг «трансуранов» шли горячие споры. Результаты Ферми и его товарищей то поднимались на щит, то опровергались, подчас в очень резкой форме. Все сходилось на том, что «что-то есть». Но что?! Достоверного ответа на этот вопрос физики не могли получить в течение нескольких лет. Дискуссия то затихала, то возобновлялась с новой силой.

Этот гордиев узел единым ударом разрубили в 1938 г. немецкие химики Отто Ган и Фриц Штрассман, открывшие деление урановых ядер под действием нейтронов. Стали понятны ошибки тридцать четвертого года. Нейтроны расщепляли урановые ядра на десятки радиоактивных изотопов. Излучение, приписываемое «экареннию», в действительности могло быть излучением самого рения. Или даже его более легких аналогов. Изотопы с периодом полураспада от 10 до 17 минут есть и у рения, и у технеция, открытого спустя несколько лет после нейтронных опытов Ферми его коллегой и другом Эмилио Сегре.

*Американский физик Эдвин М. Макмиллан (р. 1907), начав свои эксперименты 1939 г., вовсе не рассчитывал на открытие первого трансуранового элемента. Однако именно в его опытах со стопкой папиросной бумаги был обнаружен элемент № 93, названный нептунием. Название не новое: в XIX столетии его дважды пытались присвоить ложно открытым элементам. Лишь третья попытка оказалась «зачетной»*



#### Стопка папиросной бумаги

Весть об открытии Гана и Штрассмана пришла в США в 1939 г. Не все физики сразу поняли, что стоит за этим открытием, не все обратили внимание на необычайно высокое энерговыделение. Многие из них увидели в этом открытии возможность «поиграть» с урановыми осколками и, если повезет, добыть новые данные об уникальном ядерном превращении.

Американский физик Эдвин Макмиллан задался целью измерить расстояния, пробегаемые осколками деления в веществе. В его распоряжении были мощная по тем временам ядерная машина — циклотрон Калифорнийского университета, немного урана и... пачка тонкой папиросной бумаги.

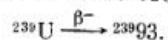
Ускоренный в циклотроне пучок дейтронов падал на бериллиевую пластину. В столкновениях дейтронов с ядрами бериллия рождался поток нейтронов, в миллионы раз более интенсивный, чем поток от нейтронного источника, которым располагал Ферми.

Этот нейтронный поток Макмиллан направлял на «гармошку», сложенную из папиросной бумаги. Первый листок «гармошки» был покрыт окисью урана. Нейтроны дробили урановые ядра, и осколки деления в зависимости от их массы и энергии проникали в гармошку на разную



глубину. По активности отдельных листков Макмиллан мог судить о числе осколков, достигших того или иного листка, и, следовательно, об их энергии. Однако главный результат его опытов заключался в другом. В листочке с ураном были обнаружены радиоактивные изотопы с периодами полураспада 23 минуты и 2,3 суток. В другие листочки эти ядра не проникали. Природа 23-минутной активности была известна. Еще в 1936 г. О. Ган, Л. Мейтнер и Ф. Штрассман выяснили, что с таким периодом полураспада распадается уран-239. Очевидно, он получался после захвата нейтрона ядром урана-238.

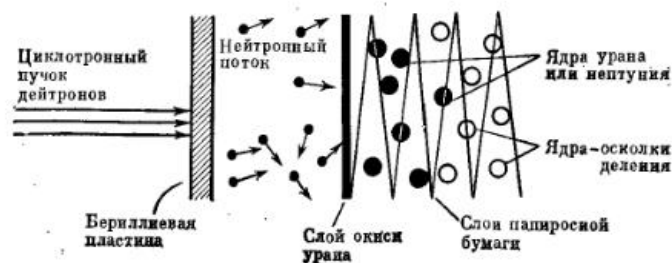
Естественно, что тяжелое ядро урана не могло покинуть слой окиси под ударом легкого нейтрона. По-видимому, и вторая активность принадлежала тяжелому изотопу. Но какому? Макмиллан предположил, что она — дочерный продукт урана-239. «Дочка» могла стать «принцессой», если имел место такой процесс:



Макмиллан решил тщательно изучить химические свойства новой активности. На счастье в Беркли приехал на каникулы его давний друг и коллега Филип Эйбельсон. Каникулы обернулись для него тяжелым трудом: дни и ночи пришлось проводить молодым ученым у циклотрона и в химической лаборатории. Вскоре они убедились, что свойства нового излучателя очень близки свойствам урана, но в четырехвалентном состоянии он устойчивее урана. В то же время поведение двухдневной активности ничем не напоминало рений. Позже это обстоятельство заставило пересмотреть положение тяжелых элементов в таблице Менделеева.

Весьма убедительно выглядела демонстрация постепенного накопления двухдневной активности в процессе

Схема опыта с папиросной бумагой



бета-распада урана-239. Еще одним доказательством открытия нового элемента стал «кадмиевый» опыт: в поток нейтронов помещали уран, обернутый в кадмиевую фольгу. Излучатели с периодами полураспада 23 минуты и 2,3 суток получались, как и при облучении открытого урана. Зато количество ядер-осколков сильно уменьшилось. Объясняется это просто: кадмий поглощает медленные нейтроны, которые делят ядра урана, а основной поток, поток быстрых нейтронов, образующих уран-239, почти не ослабляется.

«Кадмиевый» опыт однозначно подтвердил: излучатель с периодом распада 2,3 суток не может быть продуктом деления. Это ядра нового элемента, элемента № 93, который Макмиллан предложил назвать непунием. В солнечной системе за планетой Уран следует Нептун. Так и в ряду химических элементов за ураном (по-латыни uranium) следует непуний (neptunium).

Между прочим, почти одновременно с Макмилланом и независимо от него двухдневную активность обнаружил один из соратников Ферми — Эмилио Сегре. Однако он приписал новую активность одному из изотопов лантаноидной фракции, поскольку в его опытах редкоземельный элемент-посигель, добавленный к раствору, увлекал за собой новый излучатель... Положительно не везло с трансуранами Энрико Ферми и его соратникам.

### Микро и макро

Как и другие радиохимики, Макмиллан и Эйбельсон применяли в своих исследованиях метод изотопных носителей. С его помощью они разработали окислительно-восстановительный лантанофторидный цикл, служивший долгое время для очистки непуния. Однако химикам этого было мало. Они стремились изучить новый элемент в растворах обычной концентрации, когда носители уже не нужны. «Метод изотопных носителей — единственный, когда приходится работать с микрограммами вещества. Вместе с тем к полученным данным следует относиться с осторожностью, и во многих случаях нельзя сделать вполне определенных выводов». Это мнение Гленна Сиборга, крупнейшего специалиста в области трансуранов. Но как получить раствор высокой концентрации, если в распоряжении экспериментатора считанные микрограммы непуния?



Остальные известные изотопы элемента № 93 не играют сами по себе заметной роли в ядерной технике. Их исследуют физики.

Как-то в середине 60-х годов на мощном дубненском циклотроне У-300 облучили висмутовую мишень ускоренными ядрами неона. В ядерной реакции висмут+неон образовывались ядра изотопа нептуния. Они испытывали К-захват: ядро нептуния «впитывало» в себя один из электронов атомной оболочки и превращалось в уран. В некоторых случаях дочернее ядро урана оказывалось на высоком возбужденном уровне (проще говоря, у ядра оказывался большой избыток энергии), и оно распадалось на осколки. Так был открыт новый вид ядерных превращений — деление ядер после К-захвата.

Хорошо изучены ядерные характеристики тринадцати изотопов нептуния — от 229-го до 241-го. Изотопы с большим массовым числом, вплоть до нептуния-257, образуются при взрыве водородной бомбы. Об этом свидетельствует появление в продуктах термоядерного взрыва атомов фермия. Изучить свойства тяжелых нептуниевых ядер пока невозможно: они слишком неустойчивы и переходят в высшие элементы задолго до извлечения радиоактивных продуктов подземного взрыва.

### Одна триллионная

Как известно, первые сообщения об открытии элемента № 93 появлялись в печати задолго до нейтронных опытов Ферми. Однако проходило время и очередной лжеэлемент благополучно закрывали. Теперь мы знаем: первичный нептуний, родившийся в процессе синтеза элементов солнечной системы, не мог сохраниться: слишком мало время жизни даже самых устойчивых ядер элемента № 93 по сравнению с возрастом Земли.

И все же природный нептуний существует. Он образуется из ядер урана под действием нейтронного потока космического излучения и нейтронов, рождающихся при спонтанном делении урана-238. Поэтому в урановых рудах можно обнаружить нептуний, но в лучшем случае один атом нептуния-237 приходится на триллион атомов урана. Понятно, что химики первой трети XX в., искавшие нептуний в рениевых рудах, не могли рассчитывать на успех. Даже после того, как досконально была изучена химия

элемента № 93, в богатых рудах Африки после переработки многих тонн урановой смоляной обманки были замечены лишь слабые следы нептуния...

Попробуем подвести итог.

Практическая важность первого трансуранового элемента пока невелика, особенно если сравнивать нептуний с его соседями по менделеевской таблице. Однако науке элемент № 93 дал очень многое.

История открытия первого трансурана весьма поучительна. Подтвердилось древнее правило: новое часто входит не в ту дверь, в которой ждешь. И другое правило — о взаимосвязи открытий. Опыты Ферми были продуманы глубоко. По существу Ферми наметил верный путь к новому элементу. Нептуний на самом деле образовывался в облученном уране. Однако более мощное явление — деление ядер — заслонило слабое излучение трансурана. Путанице способствовало неправильное представление о положении тяжелых элементов в периодической системе. Предсказание Нильса Бора, сделанное еще в 1920 г., о том, что где-то в области урана должен начинаться второй редкоземельный ряд, было прочно забыто...

В конечном итоге попытка открыть первый заурановый элемент обернулась великим открытием расщепления атомного ядра. С другой стороны, опыты, целью которых было изучение процессов деления, привели к открытию нептуния, а затем и других трансурановых элементов.

### Нынешний нептуний — третий

Первое предложение назвать нептунием новый химический элемент появилось в 1850 г. Так было предложено именовать элемент, открытый в минерале, привезенном в Европу из-за океана, из штата Коннектикут. Однако открытие не состоялось: было доказано, что тот нептуний идентичен уже открытому ниобию. Нептунием же, находясь под впечатлением открытия «вычисленной» Лаверрье далекой планеты, предполагал назвать новый элемент первооткрыватель германия Клеменс Винклер. Ведь открытый им элемент тоже был «вычислен» Менделеевым за 15 лет до открытия. Но, узнав, что это название уже предлагалось и относилось к лжеэлементу, Винклер передумал и назвал свой элемент германием. Ну, а нынешний нептуний появился, как известно, в 1939 г., а его символ Np был предложен и принят лишь в 1948 г.



## НЕПТУНИЙ И ПЛУТОНИЙ — СЕМИВАЛЕНТНЫЕ

Уже не первый год встречается утверждение, что химия некоторых трансуранов изучена лучше, чем химия железа или углерода. Возможно, это и так. Тем значительнее открытие советских радиохимиков (Институт физической химии АН СССР) Н. Н. Крота, А. Д. Гельман и М. П. Мефодьевой, сделанное в 1967 г. Они установили, что высшая степень окисления нептуния и плутония не (VI), а (VII).

О семивалентных нептунии и плутонии, о том, как и почему произошло это открытие, его авторы, доктора химических наук А. Д. Гельман и Н. Н. Крот рассказали корреспонденту журнала «Химия и жизнь» (интервью взято в 1970 г.).

Вопрос: Насколько мне известно, виднейший американский радиохимик Гленн Сиборг назвал вашу работу исторической. Считаете ли вы справедливо такую оценку?

Н. Н. Крот: Мы ее справедливой не считаем, не думаем, что наши опыты «исторические». В них же не открыты ни новый элемент, ни новое явление. Найдено новое состояние элементов, и только. А интерес теоретиков к этой работе объясняется прежде всего тем, что она затрагивает периодическую систему, конец периодической системы.

Вопрос: Вы говорите об интересе теоретиков, но ведь известно, что процесс отделения плутония или нептуния от других элементов достаточно сложен, а открытие нового валентного состояния — это по существу открытие нового класса соединений того или иного элемента. А где новые соединения, там и новые возможности для технологии.

Н. Н. Крот: Думаю, что о прикладном значении нашей работы говорить преждевременно. А причины интереса теоретиков могу объяснить.

Возьмите любое из последних изданий таблицы Менделеева: в них неизменно лантаноиды и актиноиды вынесены в самостоятельные строки. Аналогия химических свойств этих элементов в трехвалентном состоянии легла в основу актиноидной теории. Эта теория принесла химии большую пользу. Но многие химики не считали и не считают ее всеобъемлющей, основополагающей. Известные экспериментальные факты, такие, например, как существование урана, нептуния, плутония и других элементов в различных валентных состояниях, эта теория объяснить

не может. А ведь для того же плутония и раньше были известны четыре степени окисления: (III), (IV), (V) и (VI)... Поэтому споры о строении конца периодической системы естественны.

Известный французский радиохимик М. Н. Гайсинский считал, например, что за пределы таблицы нужно выносить только элементы более тяжелые, чем уран, и располагать их в ряд двумя сериями: уранидов (от урана до амерция) и кюридов (от кюрия до лоуренсия). А советский ученый В. К. Григорович предлагал размещать все элементы, включая трансурановые, в соответствующих группах периодической системы. Для лантаноидов и актиноидов — элементов, у которых заполняются электронами *f*-оболочки, — он вводил третьи подгруппы, аналогично тому, как побочные подгруппы состоят из элементов с заполняющимися *d*-оболочками\*. Эта точка зрения нам кажется наиболее последовательной и логически обоснованной.

Ведь периодический закон — это не только закон Менделеева, но и закон природы. Следовательно, периодическая система должна быть цельной системой без «посторонних включений» или «исключений, подтверждающих правило». Не следует вообще говорить об актиноидах или уранидах. Нам кажется, правильнее говорить об актиноидном состоянии трансуранового элемента, когда он проявляет валентность 3+, или об уранидном состоянии, если валентность 6+, и так далее...

А. Д. Гельман: Именно размышления о периодической системе навели на мысль о том, что могут существовать соединения, в которых степень окисления нептуния и плутония равна семи. В атоме нептуния на трех удаленных от ядра подоболочках как раз семь электронов, а у плутония — даже восемь... При каких-то условиях *f*-электроны могут превратиться в *d*-электроны, т. е. пе-

\* Напомним, что электроны в атоме или ионе распределяются по оболочкам, обозначаемым заглавными буквами латинского алфавита: *K*, *L*, *M* и т. д., а внутри оболочек — по подоболочкам *s*, *p*, *d*, *f*. В зависимости от того, как электроны заполняют наружную (защитающую) оболочку, элементы подразделяют на *s*-, *p*-, *d*- и *f*-элементы; *s*- и *p*-элементы — это элементы основных подгрупп таблицы Менделеева. У элементов, расположенных в побочных подгруппах, заполняются более глубокие *d*-подоболочки, а у лантаноидов и актиноидов — *f*-подоболочки.

рейти, грубо говоря, из четвертого (если считать снаружи) в третий «слой», и тогда их легче оторвать...

Н. Н. Крот: Логично было предположить, что окисление шестивалентного нептуния до семивалентного произойдет под действием сильного окислителя в щелочной среде.

А. Д. Гельман: Первые опыты Николай Николаевич сделал в апреле 1967 г. Окислителем был озон.

Н. Н. Крот: Сначала я попробовал вести реакцию в карбонатных растворах некоторых соединений шестивалентного нептуния. Пропускаю озон, и — ничего не меняется. Добавил щелочь и получил зеленый раствор, очевидно, коллоидный. Оставил отстояться: может, разложится. День, два, а он все зеленый. На шестой день доложил Анне Дмитриевне. Сняли спектр — ни на что не похож. Поставил такой же опыт с ураном — никакого эффекта. Зато, озонируя в щелочной среде плутоний, получили еще одну новую окраску — иссиня-черную.

А. Д. Гельман: Сделали несколько контрольных опытов. Повторили все и раз, и два, и три. Другие сильные окислители вместо озона брали. А результат везде один: окисляются шестивалентный нептуний и плутоний, хотя раньше казалось, что и так они окислены до предела.

И вот что интересно. Еще до наших опытов темно-зеленые соединения нептуния, образующиеся при окислении, наблюдали западногерманские химики. Но они, видимо, не допускали возможности дальнейшего окисления и объясняли позеленение раствора новой модификацией опять-таки шестивалентного нептуния. Вот и зевнули...

Это очень важно, чтобы идея шла впереди наблюдения. Если бы не наши дискуссии о теориях Сиборга, Гайсинского, Григоровича, если бы не размышления о периодической системе в приложении к тем элементам, которыми мы занимаемся, то вполне вероятно, что и мы, получив неожиданный результат, объяснили бы его новой разновидностью известного...

И еще немного — о контрольных опытах, о подходе к собственным результатам. Я считаю, что любой ученый, а химик в первую очередь, должен сам быть строжайшим критиком своих результатов.

Н. Н. Крот: Это верно. Чтобы выступать с проблемными мнениями, нужно самим быть очень уверенными. Строгость подхода к собственным результатам — необхо-

димое условие настоящего успеха. Через два месяца после первого опыта мы уже держали в руках твердое соединение семивалентного нептуния и только после этого решились выпустить из лаборатории первую публикацию.

Вопрос: А что было дальше?

Н. Н. Крот: Опять опыты, в которых приняли участие многие сотрудники нашей лаборатории. Испытали разные окислители, разные методы окисления, включая электрохимические и радиационные; получали разные соединения. Сейчас изучено уже около десятка твердых веществ, в которых нептуний и плутоний проявляют валентность 7+. И эту валентность нельзя считать необычной для них, особенно для нептуния, который, как оказалось, может быть семивалентным и в кислой среде.

Многие соединения нептуния(VII) весьма устойчивы. Для всех трансурановых элементов характерно образование прочной связи с двумя атомами кислорода. Семивалентные нептуний и плутоний во всех полученных соединениях тоже связаны с кислородом. Единственная форма существования нептуния(VII) и плутония(VII) в щелочных растворах — это анион состава  $MeO_3^{2-}$ .

А. Д. Гельман: Наши опыты потом повторяли в разных лабораториях, в разных странах. Результаты неизменно подтверждались. Академик В. И. Спицын был в Америке на конгрессе и оттуда прислал мне такую открытку: «Дорогая Анна Дмитриевна! Ваша работа с Николаем Николаевичем проверена в Аргоннской национальной лаборатории и получила полное подтверждение. Ее приняли здесь с энтузиазмом...»

Вопрос: А могут ли, по вашему мнению, быть еще и другие, неизвестные пока валентные состояния трансурановых элементов? Могут ли быть, скажем, восьмивалентные нептуний и плутоний?

Н. Н. Крот: Нептуний определенно нет: электронов не хватит. А плутоний, в принципе, может. Но это еще нужно доказать...

А. Д. Гельман: На опыте!

В том же 1970 г. авторы этой работы опубликовали еще одно любопытное сообщение. Одним из окислителей, пригодных для перевода нептуния в семивалентное состояние, оказался... семивалентный плутоний.

## ПЛУТОНИЙ



С элементом № 94 связаны очень большие надежды и очень большие опасения человечества. В наши дни это один из самых важных, стратегически важных, элементов. Это самый дорогой из технически важных металлов — он намного дороже серебра, золота и платины. Он поистине драгоценен.

### Предыстория и история

...Вначале были протоны — галактический водород. В результате его сжатия и последовавших затем ядерных реакций образовались самые невероятные «слитки» нуклонов. Среди них, этих «слитков», были, по-видимому, и содержащие по 94 протона. Оценки теоретиков позволяют считать, что около 100 нуклонных образований, в состав которых входят 94 протона и от 107 до 206 нейтронов, настолько стабильны, что их можно считать ядрами изотопов элемента № 94.

Но все эти изотопы — гипотетические и реальные — не настолько стабильны, чтобы сохраниться до наших дней с момента образования элементов солнечной системы. Период полураспада самого долгоживущего изотопа элемента № 94 — 81 млн. лет. Возраст Галактики измеряется миллиардами лет. Следовательно, у «первородного» плутония не было шансов дожить до наших дней. Если он и образовывался при великом синтезе элементов Вселенной, то те давние его атомы давно «вымерли», подобно тому как вымерли динозавры и мамонты.

В XX в. новой эры, нашей эры, этот элемент был воссоздан. Из 100 возможных изотопов плутония синтезированы 25. У 15 из них изучены ядерные свойства. Четыре нашли практическое применение. А открыли его совсем недавно. В декабре 1940 г. при облучении урана ядрами тяжелого водорода группа американских радиохимиков во главе с Гленном Т. Сиборгом обнаружила неизвестный прежде излучатель альфа-частиц с периодом полураспада 90 лет. Этим излучателем оказался изотоп элемента № 94 с массовым числом 238. В том же году, но

несколькими месяцами раньше Э. М. Макмиллан и Ф. Эйбельсон получили первый элемент, более тяжелый, чем уран, — элемент № 93. Этот элемент назвали нептунием, а 94-й — плутонием. Историк определенно скажет, что названия эти берут начало в римской мифологии, но в сущности происхождение этих названий скорее не мифологическое, а астрономическое.

Элементы № 92 и 93 названы в честь далеких планет солнечной системы — Урана и Нептуна, но и Нептун в солнечной системе — не последний, еще дальше пролегает орбита Плутона — планеты, о которой до сих пор почти ничего не известно... Подобное же построение наблюдаем и на «левом фланге» менделеевской таблицы: uranium — neptunium — plutonium, однако о плутонии человечество знает намного больше, чем о Плуtone. Кстати, Плутон астрономы открыли всего за десять лет до синтеза плутония — почти такой же отрезок времени разделял открытия Урана — планеты и урана — элемента.

### Загадки для шифровальщиков

Первый изотоп элемента № 94 — плутоний-238 в наши дни нашел практическое применение. Но в начале 40-х годов об этом и не думали. Получать плутоний-238 в количествах, представляющих практический интерес, можно, только опираясь на мощную ядерную промышленность. В то время она лишь зарождалась. Но уже было ясно, что, освободив энергию, заключенную в ядрах тяжелых радиоактивных элементов, можно получить оружие невиданной прежде силы. Появился Манхэттенский проект, не имевший ничего, кроме названия, общего с известным районом Нью-Йорка. Это было общее название всех работ, связанных с созданием в США первых атомных бомб. Руководителем Манхэттенского проекта был назначен не ученый, а военный — генерал Гровс, «ласково» величавший своих высокообразованных подопечных «битыми горшками».

Руководителей «проекта» плутоний-238 не интересовал. Его ядра, как, впрочем, ядра всех изотопов плутония с четными массовыми числами, нейтронами низких энергий\* не делятся, поэтому он не мог служить ядер-

\* Нейтронами низких энергий мы называем нейтроны, энергия которых не превышает 10 кэВ.



пой взрывчаткой. Тем не менее первые не очень внятные сообщения об элементах № 93 и 94 попали в печать лишь весной 1942 г.

Чем это объяснить? Физики понимали: синтез изотопов плутония с нечетными массовыми числами — дело времени, и недалекого. От нечетных изотопов ждали, что, подобно урану-235, они смогут поддерживать цепную ядерную реакцию. В них, еще не полученных, кое-кому виделась потенциальная ядерная взрывчатка. И эти надежды плутоний, к сожалению, оправдывал.

В шифровках того времени элемент № 94 именовался не иначе, как... медью. А когда возникла необходимость в самой меди (как конструкционном материале для каких-то деталей), то в шифровках наряду с «медью» появилась «подлинная медь».

#### «Древо познания добра и зла»

В 1941 г. был открыт важнейший изотоп плутония — изотоп с массовым числом 239. И почти сразу же подтвердилось предсказание теоретиков: ядра плутония-239 делились тепловыми \* нейтронами. Более того, в процессе их деления рождалось не меньшее число нейтронов, чем при делении урана-235. Тотчас же были намечены пути получения этого изотопа в больших количествах...

Прошли годы. Геперь уже ни для кого не секрет, что ядерные бомбы, хранящиеся в арсеналах, начинены плутонием-239 и что их, этих бомб, достаточно, чтобы нанести непоправимый ущерб всему живому на Земле.

Распространено мнение, что с открытием цепной ядерной реакции (неизбежным следствием которого стало создание ядерной бомбы) человечество явно поторопилось. Можно думать по-другому или делать вид, что думаешь по-другому, — приятнее быть оптимистом. Но и перед оптимистами неизбежно встает вопрос об ответственности ученых. Мы помним триумфальный июньский день 1954 г., день, когда дала ток первая атомная электростанция в Обнинске. Но мы не можем забыть и августовское утро 1945 г. — «утро Хиросимы», «черный день Альберта

\* Тепловыми называются нейтроны, энергия которых измеряется долями электронвольта. Самые медленные нейтроны — с энергией меньше 0,005 эв — называют холодными.

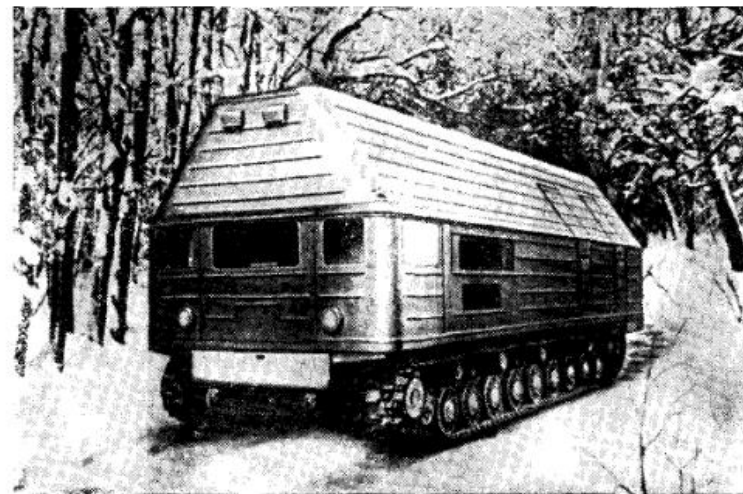
Эйнштейна»... Помним первые послевоенные годы и безудержный атомный шантаж — основу американской политики тех лет. А разве мало тревог пережило человечество в последующие годы? Причем эти тревоги многократно усиливались сознанием, что, если вспыхнет новая мировая война, ядерное оружие будет пущено в ход.

Здесь можно попробовать доказать, что открытие плутония не прибавило человечеству опасений, что, напротив, оно было только полезно.

Допустим, случилось так, что по какой-то причине или, как сказали бы в старину, по воле божьей, плутоний оказался недоступен ученым. Разве уменьшились бы тогда наши страхи и опасения? Ничуть не бывало. Ядерные бомбы делали бы из урана-235 (и в не меньшем количестве, чем из плутония), и эти бомбы «съедали» бы еще большие, чем сейчас, части бюджетов.

Зато без плутония не существовало бы перспективы мирного использования ядерной энергии в больших масштабах. Для «мирного атома» просто не хватило бы урана-235. Зло, нанесенное человечеству открытием ядерной энергии, не уравновешивалось бы, пусть даже частично, достижениями «добротого атома».

Самоходная атомная электростанция ТЭС-3



## Как измерить, с чем сравнить

Когда ядро плутония-239 делится нейтронами на два осколка примерно равной массы, выделяется около 200 Мэв энергии. Это в 50 млн. раз больше энергии, освобождающейся в самой известной экзотермической реакции  $C+O_2=CO_2$ . «Сгораая» в ядерном реакторе, грамм плутония дает  $2 \cdot 10^7$  ккал. Чтобы не нарушать традиции (а в популярных статьях энергию ядерного горючего принято измерять внесистемными единицами — тоннами угля, бензина, тринитротолуола и т. д.), заметим и мы: это энергия, заключенная в 4 т угля. А в обычный наперсток помещается количество плутония, энергетически эквивалентное сорока вагонам хороших березовых дров.

Такая же энергия выделяется и при делении нейтроном ядер урана-235. Но основную массу природного урана (99,3%) составляет изотоп  $^{238}U$ , который можно использовать, только превратив уран в плутоний...

## Энергия камней

Оценим энергетические ресурсы, заключенные в природных запасах урана.

Уран — рассеянный элемент, и практически он есть всюду. Каждому, кто побывал, к примеру, в Карелии, наверняка запомнились гранитные валуны и прибрежные скалы. Но мало кто знает, что в тонне гранита до 25 г урана. Граниты составляют почти 20% веса земной коры. Если считать только уран-235, то в тонне гранита заключено  $3,5 \cdot 10^6$  ккал энергии. Это очень много, по...

На переработку гранита и извлечение из него урана пужно затратить еще большее количество энергии — порядка  $10^6$ – $10^7$  ккал/т. Вот если бы удалось в качестве источника энергии использовать не только уран-235, а и уран-238, тогда гранит можно было бы рассматривать хотя бы как потенциальное энергетическое сырье. Тогда энергия, полученная из тонны камня, составила бы уже от  $8 \cdot 10^7$  до  $5 \cdot 10^8$  ккал. Это равноценно 16–100 т угля. И в этом случае гранит мог бы дать людям почти в миллион раз больше энергии, чем все запасы химического топлива на Земле.

Но ядра урана-238 нейтронами не делятся. Для атомной энергетики этот изотоп бесполезен. Точнее, был бы

бесполезен, если бы его не удалось превратить в плутоний-239. И что особенно важно: на это ядерное превращение практически не нужно тратить энергию — напротив, в этом процессе энергия производится!

Попробуем разобраться, как это происходит, но вначале несколько слов о природном плутонии.

## В 400 тысяч раз меньше, чем радия

Уже говорилось, что изотопы плутония не сохранились со времени синтеза элементов при образовании нашей планеты. Но это не означает, что плутония в Земле нет.

Он все время образуется в урановых рудах. Захватывая нейтроны космического излучения и нейтроны, образующиеся при самопроизвольном (спонтанном) делении ядер урана-238, некоторые — очень немногие — атомы этого изотопа превращаются в атомы урана-239. Эти ядра очень нестабильны, они испускают электроны и тем самым повышают свой заряд. Образуется нептуний — первый трансурановый элемент. Нептуний-239 тоже весьма неустойчив, и его ядра испускают электроны. Всего за 56 часов половина нептуния-239 превращается в плутоний-239, период полураспада которого уже достаточно велик — 24 тыс. лет.

Почему не добывают плутоний из урановых руд? Мала, слишком мала концентрация. «В грамм добыча — в год труды» — это о радии, а плутония в рудах содержится в 400 тыс. раз меньше, чем радия. Поэтому не только добыть — даже обнаружить «земной» плутоний необыкновенно трудно. Сделать это удалось только после того, как были изучены физические и химические свойства плутония, полученного в атомных реакторах.

## Когда $2,70 \gg 2,23$ \*

Накапливают плутоний в ядерных реакторах. В мощных потоках нейтронов происходит та же реакция, что и в урановых рудах, но скорость образования и накопления плутония в реакторе намного выше — в миллиард миллиардов раз. Для реакции превращения балластного урана-238 в

\* Напомним, что в математике знак  $\gg$  означает «много больше».

энергетический плутоний-239 создаются оптимальные (в пределах допустимого) условия.

Если реактор работает на тепловых нейтронах (напомним, что их скорость — порядка 2000 м в секунду, а энергия — доли электронвольта), то из естественной смеси изотопов урана получают количество плутония, немногим меньшее, чем количество «выгоревшего» урана-235. Немногим, но меньшее, плюс неизбежные потери плутония при химическом выделении его из облученного урана. К тому же цепная ядерная реакция поддерживается в природной смеси изотопов урана только до тех пор, пока не израсходована незначительная доля урана-235. Отсюда закономерен вывод: «тепловой» реактор на естественном уране — основной тип ныне действующих реакторов — не может обеспечить расширенного воспроизводства ядерного горючего. Но что же тогда перспективно? Для ответа на этот вопрос сравним ход цепной ядерной реакции в уране-235 и плутонии-239 и введем в наши рассуждения еще одно физическое понятие.

Важнейшая характеристика любого ядерного горючего — среднее число нейтронов, испускаемых после того, как ядро захватило один нейтрон. Физики называют его эта-числом и обозначают греческой буквой  $\eta$ . В «тепловых» реакторах на уране наблюдается такая закономерность: каждый нейтрон порождает в среднем 2,08 нейтрона ( $\eta=2,08$ ). Помещенный в такой реактор плутоний под действием тепловых нейтронов дает  $\eta=2,03$ . Но есть еще реакторы, работающие на быстрых нейтронах. Естественную смесь изотопов урана в такой реактор загружать бесполезно: цепная реакция не пойдет. Но если обогатить «сырье» ураном-235, она сможет развиваться и в «быстром» реакторе. При этом  $\eta$  будет равно уже 2,23. А плутоний, помещенный под обстрел быстрыми нейтронами, даст  $\eta$ , равное 2,70. В наше распоряжение поступит «лишних полнейтрона». И это совсем не мало.

Проследим, на что тратятся полученные нейтроны. В любом реакторе один нейтрон нужен для поддержания цепной ядерной реакции. 0,1 нейтрона поглощается конструктивными материалами установки. «Избыток» идет на накопление плутония-239. В одном случае «избыток» равен 1,13, в другом — 1,60. После «сгорания» килограмма плутония в «быстром» реакторе выделяется колоссальная энергия и накапливается 1,6 кг плутония. А уран и в «бы-

стром» реакторе даст ту же энергию и 1,1 кг нового ядерного горючего. И в том и в другом случае налицо расширенное воспроизводство. Но нельзя забывать об экономике.

В силу ряда технических причин цикл воспроизводства плутония занимает несколько лет. Допустим, что пять лет. Значит, в год количество плутония увеличится только на 2%, если  $\eta=2,23$ , и на 12%, если  $\eta=2,7$ ! Ядерное горючее — капитал, а всякий капитал должен давать, скажем, 5% годовых. В первом случае налицо большие убытки, а во втором — большая прибыль. Этот примитивный пример иллюстрирует «вес» каждой десятой числа  $\eta$  в ядерной энергетике.

Важно и другое. Ядерная энергетика должна поспевать за ростом потребности в энергии. Расчеты показывают: его условие выполнимо в будущем только тогда, когда  $\eta$  приближается к трем. Если же развитие ядерных энергетических источников будет отставать от потребностей общества в энергии, то останется два пути: либо «затормозить прогресс», либо брать энергию из каких-то других источников. Они известны: термоядерный синтез, энергия аннигиляции вещества и антивещества, но пока еще технически недоступны. И не известно, когда они будут реальными источниками энергии для человечества. А энергия тяжелых ядер уже давно стала для нас реальностью, и сегодня у плутония как главного «поставщика» энергии атома нет серьезных конкурентов, кроме, может быть, урана-233, о котором рассказано в статьях «Торий» и «Уран».

### Сумма многих технологий

Когда в результате ядерных реакций в уране накопится необходимое количество плутония, его необходимо отделить не только от самого урана, но и от осколков деления — как урана, так и плутония, выгоревших в цепной ядерной реакции. Кроме того, в урано-плутониевой массе есть и некоторое количество нептуния. Сложнее всего отделить плутоний от нептуния и редкоземельных элементов (лантаноидов). Плутонию как химическому элементу в какой-то мере не повезло. С точки зрения химика, главный элемент ядерной энергетике — всего лишь один из четырнадцати актиноидов. Подобно редкоземельным элементам, все элементы актиноидового ряда очень близки между собой



по химическим свойствам, строение внешних электронных оболочек атомов всех элементов от актиния до 103-го одинаково. Еще неприятнее, что химические свойства актиноидов подобны свойствам редкоземельных элементов, а среди осколков деления урана и плутония лантаноидов хоть отбавляй. Но зато 94-й элемент может находиться в пяти валентных состояниях, и это «подслащивает пиллюлю» — помогает отделить плутоний и от урана, и от осколков деления.

Валентность плутония меняется от трех до семи. Химически наиболее стабильны (а следовательно, наиболее распространены и наиболее изучены) соединения четырехвалентного плутония.

Разделение близких по химическим свойствам актиноидов — урана, нептуния и плутония — может быть основано на разнице в свойствах их четырех- и шестивалентных соединений.

Нет нужды подробно описывать все стадии химического разделения плутония и урана. Обычно разделение их начинают с растворения урановых брусков в азотной кислоте, после чего содержащиеся в растворе уран, нептуний, плутоний и осколочные элементы «разлучают», применяя для этого уже традиционные радиохимические методы — осаждение, экстракцию, ионный обмен и другие. Конечные плутонийсодержащие продукты этой многостадийной технологии — его двуокись  $PuO_2$  или фториды —  $PuF_3$  или  $PuF_4$ . Их восстанавливают до металла парами бария, кальция или лития. Однако полученный в этих процессах плутоний не годится на роль конструкционного материала — тепловыделяющих элементов энергетических ядерных реакторов из него не сделать, заряда атомной бомбы не отлить. Почему? Температура плавления плутония — всего  $640^\circ C$  — вполне достижима.

При каких бы «ультращадящих» режимах ни отливали детали из чистого плутония, в отливках при затвердевании всегда появляются трещины. При  $640^\circ C$  твердеющий плутоний образует кубическую кристаллическую решетку. По мере уменьшения температуры плотность металла постепенно растет. Но вот температура достигла  $480^\circ C$ , и тут неожиданно плотность плутония резко падает. До причин этой аномалии докопались довольно быстро: при этой температуре атомы плутония перестраиваются в кристаллической решетке. Она становится тетрагональной и очень

«рыхлой». Такой плутоний может плавать в собственном расплаве, как лед на воде.

Температура продолжает падать, вот она достигла  $451^\circ C$ , и атомы снова образовали кубическую решетку, но расположились на большем, чем в первом случае, расстоянии друг от друга. При дальнейшем охлаждении решетка становится сначала орторомбической, затем моноклинной. Всего плутоний образует шесть различных кристаллических форм! Две из них отличаются замечательным свойством — отрицательным коэффициентом температурного расширения: с ростом температуры металл не расширяется, а сжимается.

Когда температура достигает  $122^\circ C$  и атомы плутония в шестой раз перестраивают свои ряды, плотность меняется особенно сильно — от  $17,77$  до  $19,82$  г/см<sup>3</sup>. Больше, чем на 10%! Соответственно уменьшается объем слитка. Если против напряжений, возникающих на других переходах, металл еще мог устоять, то в этот момент разрушение неизбежно.

Как же тогда изготовить детали из этого удивительного металла? Металлурги легируют плутоний (добавляют в него незначительные количества нужных элементов) и получают отливки без единой трещины. Из них и делают плутониевые заряды ядерных бомб. Вес заряда (он определяется прежде всего критической массой изотопа) 5–6 кг. Он без труда поместился бы в кубике с размером ребра 10 см.

### Тяжелые изотопы

В плутонии-239 в незначительном количестве содержатся и высшие изотопы этого элемента — с массовыми числами 240 и 241. Изотоп  $^{240}Pu$  практически бесполезен — это балласт в плутонии. Из 241-го получают америций — элемент № 95. В чистом виде, без примеси других изотопов, плутоний-240 и плутоний-241 можно получить при электромагнитном разделении плутония, накопленного в реакторе. Перед этим плутоний дополнительно облучают нейтронными потоками со строго определенными характеристиками. Конечно, все это очень сложно, тем более что плутоний не только радиоактивен, но и весьма токсичен. Работа с ним требует исключительной осторожности.

Один из самых интересных изотопов плутония —  $^{242}\text{Pu}$  можно получить, облучая длительное время  $^{239}\text{Pu}$  в потоках нейтронов.  $^{242}\text{Pu}$  очень редко захватывает нейтроны и потому «выгорает» в реакторе медленнее остальных изотопов; он сохраняется и после того, как остальные изотопы плутония почти полностью перешли в осколки или превратились в плутоний-242.

Плутоний-242 важен как «сырье» для сравнительно быстрого накопления высших трансурановых элементов в ядерных реакторах. Если в обычном реакторе облучать плутоний-239, то на накопление из граммов плутония микрограммовых количеств, к примеру, калифорния-252 потребуется около 20 лет.

Можно сократить время накопления высших изотопов, увеличив интенсивность потока нейтронов в реакторе. Так и делают, но тогда нельзя облучать большое количество плутония-239. Ведь этот изотоп делится нейтронами, и в интенсивных потоках выделяется слишком много энергии. Возникают дополнительные сложности с охлаждением реактора. Чтобы избежать этих сложностей, пришлось бы уменьшить количество облучаемого плутония. Следовательно, выход калифорния стал бы снова мизерным. Замкнутый круг!

Плутоний-242 тепловыми нейтронами не делится, его и в больших количествах можно облучать в интенсивных нейтронных потоках... Поэтому в реакторах из этого изотопа «делают» и накапливают в весовых количествах все элементы от америция до фермия.

### Не самый тяжелый, но самый долгоживущий

Всякий раз, когда ученым удавалось получить новый изотоп плутония, измеряли период полураспада его ядер. Периоды полураспада изотопов тяжелых радиоактивных ядер с четными массовыми числами меняются закономерно. (Этого нельзя сказать о нечетных изотопах.)

Посмотрите на график (с. 403), где отражена зависимость периода полураспада четных изотопов плутония от массового числа. С увеличением массы растет и «время жизни» изотопа. Несколько лет назад высшей точкой этого графика был плутоний-242. А дальше как пойдет эта кривая — с дальнейшим ростом массового числа? В точку 1, которая соответствует времени жизни 30 млн. лет, или

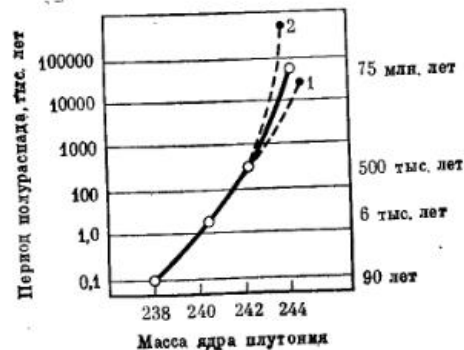
в точку 2, которая отвечает уже 300 млн. лет? Ответ на этот вопрос был очень важен для наук о Земле. В первом случае, если бы 5 млрд. лет назад Земля целиком состояла из  $^{244}\text{Pu}$ , сейчас во всей массе Земли остался бы только один атом плутония-244. Если же верно второе предположение, то плутоний-244 может быть в Земле в таких концентрациях, которые уже можно было бы обнаружить. Если бы посчастливилось найти в Земле этот изотоп, наука получила бы ценнейшую информацию о процессах, происходивших при формировании нашей планеты.

Несколько лет назад перед учеными встал вопрос: стоит ли пытаться найти тяжелый плутоний в Земле? Для ответа на него нужно было прежде всего определить период полураспада плутония-244. Теоретики не могли рассчитать эту величину с нужной точностью. Вся надежда была только на эксперимент.

Плутоний-244 накопили в ядерном реакторе. Облучали элемент № 95 — америций (изотоп  $^{243}\text{Am}$ ). Захватив нейтрон, этот изотоп переходил в америций-244; америций-244 в одном из 10 тыс. случаев переходил в плутоний-244.

Из смеси америция с кюрием выделили препарат плутония-244. Образец весил всего несколько миллионных долей грамма. Но их хватило для того чтобы определить период полураспада этого интереснейшего изотопа. Он оказался равным 75 млн. лет. Позже другие исследователи уточнили период полураспада плутония-244, но ненамного — 81 млн. лет. В 1971 г. следы этого изотопа нашли в редкоземельном минерале бастнезите.

Много попыток предпринимали ученые, чтобы найти изотоп трансуранового элемента, живущий дольше, чем



Периоды полураспада некоторых изотопов плутония

$^{244}\text{Pu}$ . Но все попытки остались тщетными. Одно время возлагали надежды на кюрий-247, но после того, как этот изотоп был накоплен в реакторе, выяснилось, что его период полураспада всего 16 млн. лет. Побить рекорд плутония-244 не удалось, — это самый долгоживущий из всех изотопов трансурановых элементов.

Еще более тяжелые изотопы плутония подвержены бета-распаду, и их время жизни лежит в интервале от нескольких дней до нескольких десятых секунды. Мы знаем наверное, что в термоядерных взрывах образуются все изотопы плутония, вплоть до  $^{257}\text{Pu}$ . Но их время жизни — десятые доли секунды, и изучить многие короткоживущие изотопы плутония пока не удалось.

### Возможности первого изотопа

И напоследок — о плутонии-238 — самом первом из «руководных» изотопов плутония, изотопе, который вначале казался бесперспективным. В действительности это очень интересный изотоп. Он подвержен альфа-распаду, т. е. его ядра самопроизвольно испускают альфа-частицы — ядра гелия. Альфа-частицы, порожденные ядрами плутония-238, несут большую энергию; рассеявшись в веществе, эта энергия превращается в тепло. Как велика эта энергия? Шесть миллионов электронвольт освобождается при распаде одного атомного ядра плутония-238. В химической реакции та же энергия выделяется при окислении нескольких миллионов атомов. В источнике электричества, содержащем один килограмм плутония-238, развивается тепловая мощность 560 ватт. Максимальная мощность такого же по массе химического источника тока — 5 ватт.

Существует немало излучателей с подобными энергетическими характеристиками, но одна особенность плутония-238 делает этот изотоп незаменимым. Обычно альфа-распад сопровождается сильным гамма-излучением, проникающим через большие толщи вещества.  $^{238}\text{Pu}$  — исключение. Энергия гамма-квантов, сопровождающих распад его ядер, невелика, защититься от нее несложно: излучение поглощается тонкостенным контейнером. Мала и вероятность самопроизвольного деления ядер этого изотопа. Поэтому он нашел применение не только в источниках тока, но и в медицине. Батарейки с плутонием-238 служат источником энергии в специальных стимуляторах сердечной деятельности.

Но  $^{238}\text{Pu}$  не самый легкий из известных изотопов элемента № 94, получены изотопы плутония с массовыми числами от 232 до 237. Период полураспада самого легкого изотопа — 36 минут.

Плутоний — большая тема. Здесь рассказано главное из самого главного. Ведь уже стала стандартной фраза, что химия плутония изучена гораздо лучше, чем химия таких «старых» элементов, как железо. О ядерных свойствах плутония написаны целые книги. Металлургия плутония — еще один удивительный раздел человеческих знаний... Поэтому не нужно думать, что, прочитав этот рассказ, вы по-настоящему узнали плутоний — важнейший металл XX в.

**КАК ВОЗЯТ ПЛУТОНИЙ.** Радиоактивный и токсичный плутоний требует особой осторожности при перевозке. Сконструирован контейнер специально для его транспортировки — контейнер, который не разрушается даже при авиационных катастрофах. Сделан он довольно просто: это толстостенный сосуд из нержавеющей стали, окруженный оболочкой из красного дерева. Очевидно, плутоний того стоит, но прикиньте, какой толщины должны быть стенки, если известно, что контейнер для перевозки всего двух килограммов плутония весит 225 кг!

**ЯД И ПРОТИВОЯДИЕ.** 20 октября 1977 г. агентство «Франс Пресс» сообщило: найдено химическое соединение, способное выводить из организма человека плутоний. Через несколько лет об этом соединении стало известно довольно многое. Это комплексное соединение — линейный катехинамид карбоксилазы, вещество класса хелатов (от греческого — «хела» — клешня). В эту химическую клешню и захватывается атом плутония, свободный или связанный. У лабораторных мышей с помощью этого вещества из организма выводили до 70% поглощенного плутония. Полагают, что в дальнейшем это соединение поможет извлекать плутоний и из отходов производства, и из ядерного горючего.



## АМЕРИЦИЙ



Вначале — несколько слов об одном из самых приятных парадоксов науки.

Так бывает довольно часто: попытки исследователя преодолеть экспериментальные трудности приводят к результатам, намного более важным, чем решение первоначальной задачи.

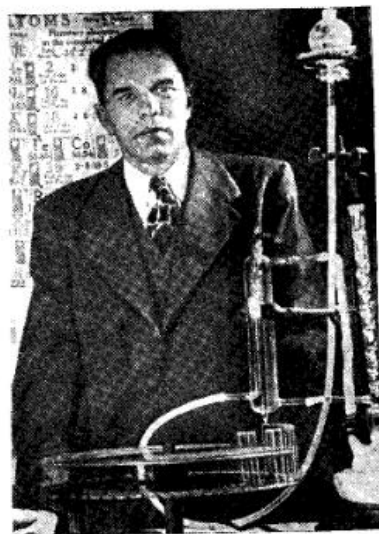
### Рождение актиноидной теории

1944 год. Работа, связанная с получением и химическим выделением элемента № 94 — плутония, завершена. Группа ученых Металлургической лаборатории Чикагского университета\* во главе с Гленном Т. Сиборгом (в нее входили также А. Гиорсо, Р. Джеймс и Л. Морган) перешла на поиски следующих — трансплутониевых элементов.

Чтобы получить их, образцы плутония бомбардировали нейтронами и дейтронами, а затем, исследуя облученные мишени, пытались обнаружить характерное для нового элемента альфа-излучение. Новые элементы могли и должны были образоваться и при непосредственном взаимодействии ядер плутония с бомбардирующим дейтроном (заряд увеличивается на единицу), и при бета-распаде «перегруженных» нейтронами новых изотопов. Серия последовательных бета-превращений могла «сдвинуть вправо» номер элемента на несколько единиц. Таким образом, бомбардируя плутоний нейтронами, физики уповали на бета-распад как на средство достижения цели. А на альфа-распад — как на своего рода индикатор, ибо для надежной ядерно-физической идентификации нового изотопа нужно знать не только период полураспада его атомных ядер, но и энергию испускаемых альфа-частиц. Для радиоактивного изотопа это почти такая же индивидуальная характеристика, как для элемента линии рентгеновского спектра.

\* Сейчас это Аргоннская национальная лаборатория — один из ведущих исследовательских центров США в области ядерной физики.

Крупнейший американский радиохимик Гленн Т. Сиборг (р. 1912) был участником открытий многих трансураниевых элементов: плутония, америция, кюрия, берклия, калифорния, эйнштейния, фермия, менделеевия. Элемент № 95 — америций — сыграл особую роль в становлении актиноидной гипотезы (позже — теории), разработанной Сиборгом



Ориентация прежде всего на физическую идентификацию новых элементов объяснялась главным образом аномальными химическими свойствами первых трансуранов. Вопреки ожиданиям нептуний и плутоний оказались больше похожи на уран, чем на рений и осмий. А ведь по логике периодической системы (как представлялось в то время) элементы № 93 и 94 должны были занять места в VII и VIII группах.

Впрочем, еще в 20-х годах великий датчанин Нильс Бор высказал предположение, что и в седьмом периоде таблицы Менделеева должна быть группа очень близких по свойствам элементов, подобная группе лантаноидов в шестом периоде. Но где, с какого элемента начнется второй «интерпериодический узел» периодической системы, — этого не знали ни Бор, ни Сиборг — никто.

Судя по свойствам нептуния и плутония, полагали, что, видимо, эта группа начинается с урана. Для ее членов — уранидов — самая характерная валентность 6+. Именно эту валентность обычно проявляли элементы № 93 и 94. А раз так, то и новый элемент № 95 должен быть шестивалентным. Следовательно, выделить его из массы плутония химическими способами окажется в высшей степени сложно и надежд на химическую идентификацию нет.

Надо искать новый альфа-излучатель в плутониевой фракции и довольствоваться физической идентификацией, по крайней мере на первых порах.

Эксперименты, основанные на таких или примерно таких рассуждениях, продолжались уже несколько месяцев, но никаких новых альфа-излучателей в плутониевой фракции зафиксировано не было. В июле 1944 г. решено было использовать другую ядерную реакцию — бомбардировать плутоний ядрами гелия, чтобы «перешагнуть» через получаемый элемент № 95: может, 96-й окажется более доступным. Так впоследствии и оказалось. Кюри действительно обнаружили немного раньше америция, но открыть оба новых элемента помог не новый физический подход, а новая радиохимическая концепция, сформулированная Сиборгом и вначале казавшаяся противоречащей здравому смыслу.

Размышляя о втором интерпериодическом узле таблицы Менделеева, Сиборг не мог не проанализировать логику построения первого. В шестом периоде этот узел начинается с лантана — отсюда идет застройка предпоследней, 4f-электронной подоболочки. В седьмом периоде аналог лантана — элемент № 89, актиний. Если и у элементов, следующих за актинием, «добавочные» электроны пойдут в предпоследнюю оболочку f (5f), то эти элементы образуют ряд актиноидов и для них всех, как и для редких земель и для актиния, характернейшая валентность будет 3+.

Однако чуть ли не все известные экспериментальные факты противоречили такому построению, а факты — вещь упрямая, хотя с ними можно спорить, интерпретируя их иначе, чем это делали прежде.

Первый из предполагаемых актиноидов — торий — типично четырехвалентный элемент. Но и первый лананоид — церий чаще проявляет валентность 4+, нежели 3+. Для следующего элемента — протактиния — наиболее типичны соединения, в которых он пятивалентен. Уран, нептуний, плутоний чаще всего проявляют валентность 6+, но и для них известны другие валентные состояния — 5+, 4+, 3+! Эта «тройка» не всегда бросается в глаза, но пренебречь ею тоже нельзя.

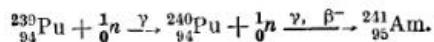
За очевидным «лесом» экспериментальных фактов Сиборг сумел разглядеть «деревья», незаметно выстроившиеся в новую теоретическую концепцию, и неудачные по-

пытки открыть элемент № 95 привели к созданию актиноидной гипотезы (впоследствии теории), сыгравшей важную роль в науке о трансуранах.

Спустя много лет в популярной книге «Элементы Вселенной» Сиборг так опишет финал этой истории и подведет итог:

«В пересмотренной периодической таблице наиболее тяжелые элементы составляют второй ряд «редких земель», и эти тяжелейшие элементы — для них было предложено название «актиноиды» — были вынесены в особую строку, как и уже известный ряд редкоземельных лантаноидов... С точки зрения новой концепции, 95-й и 96-й элементы должны иметь ряд свойств, общих для актиноидов, и некоторые свойства, роднящие их с редкоземельными «братьями» — европием и гадолинием. Как только были поставлены эксперименты, основанные на этой новой концепции, элементы № 95 и 96 были тотчас открыты, то есть химически идентифицированы. Америций, элемент № 95, был назван так в честь Америки, подобно тому как его редкоземельный «брат» европий получил свое название в честь Европы...»

К этому следует добавить, что оба новых элемента были извлечены из раствора плутония редкоземельными носителями, что оба эти элемента проявляли валентность 3+ и что классическая схема получения америция выглядит так:



#### «Ад» и «бред»

При облучении америция-241 нейтронами образуется изотоп кюриум-242 (в результате бета-распада америция-242). Дозировать нейтроны таким образом, чтобы образовывался только один новый элемент — № 95, практически невозможно. Отсюда неизбежность проблемы разделения элементов № 95 и 96. Они, в полном соответствии с актиноидной концепцией Сиборга, оказались очень похожими по химическим свойствам. А с редкими землями сходство было настолько велико, что долгое время разделение носителей и новых элементов представлялось неразрешимой задачей.

Более полугодом ушло на безуспешные попытки разделить америций и кюриум. Естественно, все это время уже открытые элементы оставались безымянными — приведен-

ные выше названия появились позже. Кто-то из сотрудников Сиборга (определенно химик, а не физик) предложил назвать их пандемонизмом и делириумом, что в переводе с латыни означает «ад» и «бред».

Но рано или поздно бред и ад должны были кончиться. В начале 1945 г. в лаборатории был освоен метод ионообменной хроматографии, и на катионите «Дауэкс-50» новые элементы удалось разделить. В качестве элюента — жидкости, последовательно смывающей комплексы сходных элементов, был применен альфа-оксиизобутират аммония, который обладал наибольшей избирательной способностью для данной системы.

Тогда же был впервые определен период полураспада америция-241. Установили, что половина его ядер распадается за 498 лет. Более поздними измерениями эта характеристика была уточнена — 433 года.

Изучению химических свойств элемента № 95 мешала высокая удельная активность америция-241. В растворе шел радиолиз, одни соединения превращались в другие; вопреки желанию экспериментаторов менялись скорости и даже направления реакций... Для современной радиохимии это дело достаточно обычное, так же как и работа с микроколичествами веществ. Но в те времена это было довольно серьезной проблемой.

Первый препарат чистого америция, полученный Б. Каннигемом и Л. Эспири в сентябре 1945 г., весил 20 мкг. Для того чтобы получить их, пришлось проделать 29 разделительных операций. Спустя полгода были переработаны 200 л сбросных растворов плутониевого производства, и из них выделили первую крупную порцию радиохимически чистого америция-241 — 10 мг. Этого оказалось достаточно, чтобы провести полный цикл физико-химических исследований нового элемента.

Что же знают радиохимики об элементе № 95 сегодня? Прежде всего на его примере ясно, что общие закономерности не всегда абсолютны. Этот закон науки особенно справедлив, когда имеешь дело с радиоактивными химическими объектами.

#### В разных состояниях

Уже упоминалось, что, как правило, америций проявляет валентность 3+. Впрочем, правильнее будет говорить не о валентности, а о степени окисления, и, не касаясь со-

става и заряда иона, обозначать ее римскими цифрами. Воспользуемся этой возможностью: она поможет избежать повторений, а практически эти понятия очень близки.

В степени окисления (III) америций образует довольно многочисленные соединения — и обычные, и комплексные. Однако в окислительной среде америций (III) довольно легко отдает еще один, два или три электрона — три легче, чем один или два. Чтобы получить америций (VI) из америция (III), достаточно слегка нагреть исходное соединение с персульфатом аммония в слабокислой среде. Переход  $\text{Am(III)} \rightarrow \text{Am(VI)}$  происходит сразу же, минуя промежуточные стадии окисления. Окислительный потенциал этого перехода намного меньше, чем перехода  $\text{Am(III)} \rightarrow \text{Am(IV)}$  или  $\text{Am(III)} \rightarrow \text{Am(V)}$ . Поэтому окислить трехвалентный америций до шестивалентного состояния проще, чем до пяти- и тем более четырехвалентного. Последний удалось получить лишь в растворах сильнейших комплексообразователей. А пятивалентный америций сравнительно легко получается лишь в тех случаях, когда образующее соединение америция (V) сразу же выводится из реагирующей системы, например выпадает в осадок. Так, если процесс окисления происходит в среде карбоната калия, образуется малорастворимая двойная соль пятивалентного америция  $\text{KAmO}_2\text{CO}_3$ .

Обратите внимание, что в высших степенях окисления (V) и (VI) америций входит в состав катиона в той же форме кислородсодержащего «ил»-иона, как уран, нептуний и плутоний. У америция два «ил»-иона:  $(\text{AmO}_2)^+$ , если америций пятивалентен, и  $(\text{AmO}_2)^{2+}$ , когда его валентность равна шести.

У пятивалентного америция обнаружено одно очень интересное свойство — способность к диспропорционированию. Оказалось, что для изменения валентного состояния в кислых растворах ему не нужны партнеры. Окислительно-восстановительная реакция протекает между ионами самого пятивалентного америция: окисление одного происходит за счет восстановления другого: два иона  $\text{Am(V)}$  дают  $\text{Am(IV)}$  и  $\text{Am(VI)}$ , однако неустойчивый  $\text{Am(IV)}$  практически не появляется. В зависимости от условий он мгновенно реагирует с другими америциевыми же ионами (в степени окисления V) или сам диспропорционирует. В результате, как правило, каждые три прореагировавшие иона  $\text{Am(V)}$  превращаются в два иона  $\text{Am(VI)}$  и



ион Am(III). Причина этого — все та же аномалия в окислительных потенциалах ионов америция.

Подобным же образом в водных растворах ведет себя и четырехвалентный америций, только при его диспропорционировании отношение Am(III) к Am(VI) равно 2:1, а не 1:2. Удержать нестойкий америций (IV) в растворе чрезвычайно трудно. Впервые это удалось сделать радиохимикам из Лос-Аламоса — Л. Эспири и Р. Пеннеману. Они установили, что в присутствии большого количества ионов фтора америций (IV) образует прочный комплекс, и получили его в концентрированном (13 M) растворе фтористого аммония. Окислить Am(III) до четырехвалентного состояния удалось лишь в концентрированных растворах фосфорной кислоты и фосфорвольфрамата калия, элементный состав которого передается такой формулой:  $K_{10}P_2W_{17}O_{61}$ . В последнем случае Am(IV) оказался настолько устойчивым, что появилась возможность изучить окислительно-восстановительные переходы с участием Am(III), Am(IV), Am(V) и Am(VI).

В 1972 г. были синтезированы первые соединения двухвалентного америция, а в 1974 г. в результате окисления озоном в щелочной среде америция (VI) был впервые получен семивалентный америций. Его получили радиохимики Института физической химии АН СССР.

Очень важно, что каждый из америциевых ионов дает ярко выраженный и характерный только для него спектр поглощения. Это позволяет очень эффективно использовать спектрофотометрический метод для исследования окислительно-восстановительных процессов, происходящих с ионами америция в растворах. А это важно не только для химии трансураниевых элементов, но и для понимания механизма окислительно-восстановительных реакций вообще.

### Применение

Сейчас уже точно известно, что америций — металл серебристо-белого цвета, тягучий и ковкий. Больше всего он похож на металлы редкоземельного семейства, но вряд ли когда-нибудь удастся использовать на практике металлические свойства америция. Поэтому, говоря о применении элемента № 95, следует иметь в виду конкретные случаи использования конкретных изотопов.

Самый долгоживущий изотоп америция —  $^{243}\text{Am}$ , и из долгоживущих он, пожалуй, самый неинтересный. Он живет почти 8000 лет (точнее, 7930) и используется пока главным образом для радиохимических исследований и для накопления более отдаленных трансуранов, вплоть до фермия. Мишени из америция-243 применяли в Дубне при синтезе некоторых изотопов элементов № 102, 103 и 105.

Значительно многообразнее применение самого первого изотопа америция —  $^{241}\text{Am}$ . Этот изотоп, распадаясь, испускает альфа-частицы и мягкие моноэнергетические гамма-кванты. Их энергия — всего 60 кэВ. А энергия жестких гамма-квантов, например, испускаемых кобальтом-60, измеряется миллионами электронвольт.

Защита от мягкого излучения америция-241 сравнительно проста и немассивна: вполне достаточно сантиметрового слоя свинца. В этом одна из причин появления многочисленных приборов с америцием-241. В частности, предложена конструкция просвечивающего аппарата размером чуть больше спичечного коробка для медицинских целей. Америциевый источник гамма-излучения — шарик диаметром 3–4 см — основа такого аппарата, которому, кстати, в отличие от рентгеновской установки не нужна громоздкая высоковольтная аппаратура — трансформаторы, выпрямители, усилители и т. д.

Доктор П. Хофер (США, Аргоннский национальный госпиталь) использовал источник мягкого гамма-излучения с америцием-241 для изучения болезней щитовидной железы. Стабильный иод, присутствующий в щитовидной железе, под действием гамма-лучей начинает испускать слабое рентгеновское излучение. Его интенсивность пропорциональна концентрации иода в исследуемой точке. Такая установка позволяет получить сведения о распределении иода в железе, не вводя радиоактивный изотоп внутрь организма. Суммарная доза облучения пациента намного ниже, чем при радиоодном обследовании.

Промышленность нескольких стран мира уже освоила выпуск различных контрольно-измерительных и исследовательских приборов с америцием-241. В частности, такими приборами пользуются для непрерывного измерения толщины стальной (от 0,5 до 3 мм) и алюминиевой (до 50 мм) ленты, а также листового стекла. Аппаратуру с америцием-241 используют также для снятия электроста-

тических зарядов в промышленности пластмасс, синтетических пленок и бумаги.

Полагают, что найдет применение и более короткоживущий (152 года) изотоп —  $^{242}\text{Am}$ , которому свойственно очень высокое сечение захвата тепловых нейтронов — около 6000 барн.

### От прошлого к будущему

Было время, когда приходилось проявлять массу изобретательности для того, чтобы найти Америцию хоть какое-то применение. Предлагалось, например, использовать его в светящихся палочках уличных регулировщиков... Сейчас положение иное: на изотопически чистый Америций спрос, пожалуй, даже превышает предложение. В виде индивидуальных изотопов Америций очень дорог, во много раз дороже золота. По прейскуранту Комиссии по атомной энергии США грамм Америция-241 оценивался в 150 долларов, а ведь это самый доступный из изотопов элемента № 95.

Подсчитано, что в твэлах энергетического реактора на тепловых нейтронах с электрической мощностью 1000 МВт ежегодно будет накапливаться около семи килограммов Америция-241 и Америция-243. Следовательно, по мере развития атомной энергетики (а к концу 1980 г. в мире работало уже 240 атомных электростанций!) Америций может превратиться в побочный продукт, получаемый тоннами. Тогда стоимость его непременно намного снизится.

Мы так подробно рассказали о практической пользе Америция — одного из искусственных трансурановых элементов — для того, чтобы показать, что и трансурановые исследования, которые обычно кажутся наукой для науки, могут и должны иметь, говоря словами Л. А. Чугаева, свой практический эквивалент.

## КЮРИЙ



Часто можно услышать такие выражения, как «два сапога — пара», «без четырех углов изба не строится» и т. п. и т. д. У многих из нас есть свое «счастлиное число». Предрассудки? Возможно. Но и в математике, физике, химии — науках, которым мистика абсолютно чужда, существуют свои «магические числа». В ядерной физике эти числа выражают энергетически наиболее устойчивые комбинации протонов и нейтронов в ядре, а в химии — аналогичные сочетания электронов в оболочке.

Для рассказа об основах химии элемента № 96 — Кюрия вполне применимо название известного вестерна — «Великолепная семерка». Но, пожалуй, более точным будет иной заголовок, которым мы и воспользуемся.

### Самый актиноидный из актиноидов

Согласно теории Слборга в семействе актиноидов, к которому относится и элемент № 96, по мере увеличения атомного номера новые электроны появляются не на внешней и даже не на предпоследней электронной оболочке, а еще ближе к ядру, в оболочке 5f. Находясь как бы в тылу, они не участвуют «в боях на передовой» за образование химических связей. Отсюда — химическое сходство актиноидов с родоначальником семейства актинием. Но на деле, как мы знаем, не все актиноиды так уж актиноидоподобны. Для тория, протактиния, урана трехвалентное состояние вовсе не характерно. Для них типичны иные, высшие валентности.

Это противоречие объяснимо. Комбинация из одного, двух, трех электронов на пятой от ядра оболочке энергетически неустойчива. Но по мере насыщения электронами эта оболочка становится все крепче. Одновременно более устойчивым (и более характерным) становится трехвалентное состояние элемента. И вот у Кюрия число 5f-электронов достигает семи: оболочка наполовину застроена (все-го она «вмещает» 14 электронов). Эта комбинация электронов чрезвычайно устойчива, именно поэтому можно

говорить о кюрии как о самом типичном представителе семейства актиноидов.

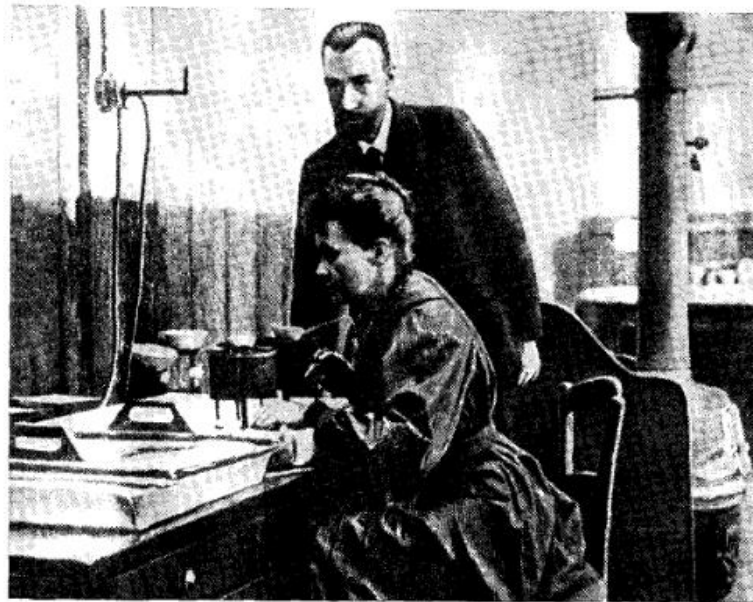
Правда, справедливости ради следует указать, что известны твердые соединения четырехвалентного кюрия (двуокись и тетрафторид), отличающиеся крайней химической неустойчивостью. В 1961 г. Т. Кинан в результате растворения  $\text{SmF}_4$  в 15-молярном растворе фтористого цезия впервые получил четырехвалентный кюрий в водном растворе и снял оптический спектр поглощения. Но даже при такой высокой концентрации фтор-иона (сильнейший комплексообразователь) и пониженной температуре четырехвалентный кюрий оказался настолько неустойчивым, что всего за час полностью восстановился до трехвалентного.

Позже окислить кюрий до четырехвалентного состояния удалось и в среде сильнейшего стабилизатора четырехвалентных ионов — фосфорвольфрамата калия. А о получении кюрия в более высоких валентных состояниях долгое время никто и не помышлял. Тем не менее, это удалось сделать группе советских радиохимиков, которые использовали для «сверхокисления» кюрия сам ядерный распад.

Что такое бета-распад? Испускание ядерного электрона, что приводит к увеличению заряда ядра на единицу. Бета-распад америция-242, находившегося в пятивалентном состоянии, приводил к образованию шестивалентного кюрия! Такой вот остроумный, физический и химический одновременно, прием позволил доказать, что кюрий может существовать и в виде шестивалентного иона, аналогичного известному уранил-иону...

Комбинация из семи электронов на 5f-оболочке заманчива и для других атомов. Так, например, атом америция, у которого общее число электронов на один меньше, чем у кюрия, тоже располагает семью 5f-электронами. На этот уровень переходит один из электронов с близлежащей 6f-оболочки. С другой стороны, берклий, у которого восемь 5f-электронов, легко расстается с одним избыточным, окисляясь до четырехвалентного состояния.

Электронные перемещения отлично объясняют противостественные, казалось бы, валентности многих элементов, и мы не случайно начали рассказ о кюрии именно с валентностей. Трансурановые элементы разделять очень трудно, и «игра» на валентностях — основа большинства методов разделения.



*Элемент № 96 — кюрий — своеобразный памятник великим и бескорытным труженикам науки Пьеру Кюри и Марии Склодовской-Кюри. Здесь воспроизведена фотография первых лет XX в., на которой супруги Кюри запечатлены за работой в их сарае-лаборатории. В качестве подписи к этому снимку приводим отрывок из воспоминаний М. Склодовской-Кюри: «...Особенно серьезным был вопрос о помещении: мы не знали, где проводить химическую обработку. Ее удалось организовать в заброшенном сарае, отделанном двором от мастерской, где находились наши электрометрические установки. Это был дощатый сарай с асфальтированным полом и со стеклянной крышей, плохо защищавшей от дождя, и лишенный какого бы то ни было оборудования; все имущество состояло лишь из грубо сколоченных деревянных столов, чугунной печки, согревавшей совсем недостаточно, и классной доски, которой так любил пользоваться Пьер Кюри. Там не было выгяжных шкафов для работ, при которых выделялись вредные газы: такие обработки приходилось проводить во дворе, если это допускала погода, а если нет, то вкатури сарая, при открытых окнах. В этой импровизированной лаборатории мы работали почти без помощников в течение двух лет, занимаясь сообща как химической обработкой, так и измерением излучения все более и более активных продуктов, которые мы получали»*



Приведем только один пример. Ионные радиусы  $\text{Cm}^{3+}$  и  $\text{Am}^{3+}$  почти не отличаются (разница — тысячные доли ангстрема), и химические свойства этих ионов так близки, что разделение элементов № 95 и 96 было бы весьма трудной задачей, если бы нельзя было перевести америций в высшие валентные состояния. Разница в поведении ионов  $\text{Cm}^{3+}$  и  $(\text{AmO}_2)^{2+}$  уже достаточно ощутима.

Но для отделения кюрия от трехвалентных лантаноидов (тоже имеющих очень близкие ионные радиусы) этот путь заказан. Именно поэтому чистую гидроокись кюрия (а это было первое чистое соединение элемента № 96) удалось получить лишь спустя три года после того, как этот элемент был открыт. История его открытия рассказана в статье об америции, поэтому здесь ее не будет.

Лишь несколько слов о названии этого элемента.

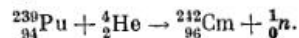
С одной стороны, первооткрыватели элемента № 96 Г. Сиборг, А. Гиорсо, Р. Джеймс и Л. Морган хотели увековечить и в таблице элементов память о Пьере и Марии Кюри, а с другой — подчеркнуть аналогию актиноидов и лантаноидов. Загляните в таблицу Менделеева. Там над кюрием — клетка гадолиния, названного так в честь Юхана Гадолина — видного исследователя редких земель.

Известный французский радиохимик М. Гайсинский скептически относился к актиноидной теории Сиборга, полагая, что только с кюрия (и по элемент № 103) начинается группа элементов («кюридов»), которые следует считать истинными аналогами лантаноидов. Спор этот, к сожалению, так и остался незавершенным: при жизни Гайсинского не было никаких доказательств существования кюрия в окислительных состояниях выше четырех.

Между прочим, у последнего кюрида — элемента № 103 — на 5f-оболочке 14 электронов. Дважды семь!

### Двойной генератор

Из 15 известных ныне изотопов кюрия первым был синтезирован изотоп с массой 242 по реакции



Он же получается и при облучении в реакторе плутония-239: захватив два нейтрона, ядро плутония-239 превращается сначала в плутоний-241, который испускает бета-частицу и становится америцием-241. Это ядро также

способно захватить нейтрон. Но образующееся ядро  ${}^{242}\text{Am}$  тоже бета-активно: испустив электрон, оно превращается в ядро  ${}^{242}\text{Cm}$ .

Сейчас в столь долгой цепочке превращений уже нет нужды: исходным сырьем для получения кюрия служит изотоп  ${}^{241}\text{Am}$ , выделяемый в довольно больших количествах из отработавших свое твэлов атомных электростанций. Этот америций облучают в реакторе большим потоком нейтронов: больше кюрия получается при максимальном потоке нейтронов и минимальной продолжительности облучения.

Потребителей кюрия-242 пока немного, да и получают его немного — граммы в год. Однако с ростом потребностей производство этого изотопа может быть увеличено. Производство кюрия-242 зависит от масштабов производства америция-241 и, по имеющимся оценкам, может легко быть доведено до сотен граммов в год. Тогда цена этого изотопа будет составлять несколько сот долларов за грамм. Пока он стоит гораздо дороже.

Естественно, возникает вопрос: кто же потребляет столь дорогой продукт? Но прежде чем ответить на него, посмотрим, что он, этот продукт, собой представляет.

Мы уже успели привыкнуть к тому, что при делении тяжелых ядер нейтронами выделяется колоссальная энергия, не сравнимая ни с какими химическими реакциями. Пока не столь популярна энергия, выделяемая при радиоактивном распаде ядра, а она тоже более чем заметна. Если каждый акт деления урана-235 сопровождается выделением примерно 200 Мэв, то энергия альфа-частиц, испускаемых, например, кюрием-242 при радиоактивном распаде, составляет 6,1 Мэв. Это всего лишь в 35 раз меньше, но такой распад происходит самопроизвольно, со строго постоянной скоростью, не подверженной влиянию каких-либо физических или химических факторов. Для использования этой энергии нет пужды в сложных и громоздких устройствах; более того, кюри-242 — практически чистый альфа-излучатель, а это значит, что для работы с ним не требуется тяжелая радиационная защита. Альфа-частицы поглощаются даже листом бумаги, полностью отдавая ей свою энергию (превратившуюся в тепло). Грамм кюрия-242 каждую секунду испускает  $1,2 \cdot 10^{12}$  альфа-частиц, выделяя при этом 120 ватт тепловой энергии. Поэтому кюри-242 практически всегда раскален;

чтобы работать с ним, от него нужно непрерывно отводить тепло.

Если проинтегрировать энергию альфа-распада грамма кюрия за год (что составит около 80% полной энергии), получится внушительная цифра — 480 киловатт-часов. Чтобы получить эквивалентное количество энергии от реакции горения, нужно сжечь примерно 38 кг бутана в 138 кг кислорода. Даже если считать по весу, получится, что это почти в 200 тыс. раз больше, а объемы вообще несравнимы: грамм кюрия в виде окисла  $\text{Cm}_2\text{O}_3$  занимает объем лишь в 0,1 кубического сантиметра.

Очевидно, потребителей кюрия-242 следует искать там, где особенно ценится малый вес и компактность источника энергии. Это, например, космические исследования. Радиоизотопные источники на основе  $^{242}\text{Cm}$  (в комбинации с термоэлектрическими или другими преобразователями энергии) способны развивать мощность до нескольких киловатт. Они приемлемы для космических станций, как автоматических, так и с человеком на борту. Правда, из-за сравнительно короткого периода полураспада (163 дня) продолжительность стабильной работы такого источника составляет всего несколько месяцев. Однако для многих исследований околоземного пространства, а также Луны этого вполне достаточно. В США были разработаны кюриевые генераторы электрического тока для питания бортовой аппаратуры автоматических станций «Сервейор».

Как интенсивный альфа-излучатель кюрий-242 может применяться в нейтронных источниках (в смеси с бериллием), а также для создания внешних пучков альфа-частиц. Последние используют как средство возбуждения атомов в новых методах химического анализа, основанных на рассеянии альфа-частиц и возбуждении характеристического рентгеновского излучения. Такая установка была, в частности, на борту космической станции «Сервейор-V». С ее помощью был проведен непосредственный химический анализ поверхности Луны методом рассеяния альфа-частиц.

Интересно, что в результате радиоактивного распада кюрия-242 образуется другой альфа-излучатель — плутоний-238, который может быть затем отделен химическим путем и получен в радиохимически чистом виде. А плутоний-238 применяют не только в космических генераторах тока, но и в сердечных стимуляторах. Таким образом,

отслужившие свой срок кюриевые генераторы могут служить дополнительным источником для получения изотопически чистого плутония-238. Удачное решение проблемы отходов!

### Другой изотоп — тяжелый и перспективный

Читая литературу по кюрию, нетрудно заметить, что в последние годы все большее внимание исследователей привлекает другой, более тяжелый изотоп с массой 244. Он тоже альфа-излучатель, но имеет больший период полураспада — 18,1 года. Его энерговыделение соответственно меньше — 2,83 ватта на грамм. Поэтому с ним проще работать: при изучении химических и физических свойств в меньшей степени сказываются радиационные эффекты. Кюрий-244 можно даже подержать в руках, правда, если работать в перчатках в абсолютно герметичном боксе. И еще одно важное обстоятельство: этот изотоп можно получать в больших количествах, если в качестве исходного «сырья» использовать не чистый уран, а уран-плутониевое ядерное горючее. Тогда кюрий-244 будет получаться топнами как побочный продукт ядерной энергетики.

Для чего нужны такие количества тяжелого изотопа кюрия? Полагают, что в радиоизотопных генераторах для космических и океанических исследований кюрий-244 сможет заменить плутоний-238. Генераторы на основе  $^{244}\text{Cm}$  менее долговечны, чем плутониевые, но их удельное энерговыделение примерно в пять раз больше... Правда, кюрий-244 испускает примерно в 50 раз больше нейтронов (идет спонтанное деление), чем  $^{238}\text{Pu}$ . Поэтому кюриевые генераторы в качестве стимуляторов сердечной деятельности вряд ли применимы. Но в других автономных источниках энергии кюрий-244 вполне может заменить плутоний. К тому же кюрий не так токсичен, как плутоний. А предельная мощность кюриевых генераторов (определяемая критической массой) примерно в 9 раз больше, чем плутониевых: 162 и 18 киловатт соответственно.

### Замкнутый круг

Но, пожалуй, самый большой интерес для практики может представить еще более тяжелый и гораздо более долгоживущий изотоп — кюрий-245. Его период полураспада 8500 лет. И этот изотоп тоже альфа-излучатель, но здесь

перспективность определяется совсем другим свойством его ядра — способностью делиться под действием нейтронов подобно делящимся изотопам урана и плутония. Способность ядер кюрия-245 к делению тепловыми нейтронами в три с лишним раза больше, чем у любого из применяемых сейчас делящихся изотопов. Это значит, что для поддержания цепной реакции потребуется во много раз меньше кюрия-245, нежели урана-235 или плутония-239. Такое ядерное горючее позволит создать компактные реакторы с высоким удельным энерговыделением. Пока таких реакторов нет — ведутся тщательные исследования, разрабатываются методы получения кюрия-245 в достаточных количествах, но тут ученые попали в замкнутый круг.

При облучении плутония-242 и америция-243 в реакторах с большой плотностью нейтронных потоков одновременно с кюрием-244 всегда образуются и более тяжелые изотопы. В том числе и кюрий-245.

Однако то полезное свойство кюрия-245, ради которого его стремятся получать, — большое сечение деления тепловыми нейтронами — здесь оказывается вредным. Ядра кюрия-244, захватив нейтроны, превращаются в кюрий-245, но под действием тех же нейтронов эти ядра делятся на осколки. Нейтроны — инструмент синтеза — сами же оказываются орудием разрушения. В результате в смеси изотопов элемента № 96 кюрия-245 обычно оказывается лишь несколько процентов. А если учесть, что эти изотопы еще обязательно надо разделить, станет понятно, почему кюрий-245 пока не может быть использован в качестве делящегося материала.

### Самый долгоживущий

В заключение — несколько слов о самом долгоживущем изотопе, кюри-247. Период его полураспада оценивается в 16 млн. лет. Недавно его следы были обнаружены в земной коре, в некоторых радиоактивных минералах. Массовое число этого изотопа выражается формулой  $(4n+3)$ , поэтому вполне логично предположить, что он является родоначальником известного актиноуранового семейства (семейства урана-235).

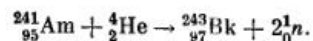
Вот, пожалуй, и все самое важное, что можно рассказать в короткой статье об элементе № 96 и его изотопах.

## БЕРКЛИЙ



Берклий синтезирован в Беркли — небольшом городке, отделенном от шумного Сан-Франциско широким заливом, через который перекинут Оклэндский мост. Можно указать место синтеза точнее — Радиационная лаборатория Калифорнийского университета, еще точнее — 60-дюймовый циклотрон, и совсем точно — мишень из америция-241, которую бомбардировали потоком ускоренных альфа-частиц.

Синтез был целенаправленным:



К 97-му элементу стремились, его и получили. Все шло на редкость гладко и точно. Он мог бы появиться и раньше, но не хватало исходного материала — америция-241.

Для химической идентификации нового элемента использовали хорошо отработанный к тому времени метод ионообменной хроматографии, описанный в статье «Америций». Первые же химические исследования показали, что новый элемент ведет себя так, как и полагается актиноиду, но об этом позже.

Авторы открытия — американские физики Гленн Сиборг, Стэнли Томпсон и Альберт Гиорсо решили назвать новый элемент в честь Беркли — города студентов и ученых; при этом они имели в виду еще и то обстоятельство, что аналог берклия по группе лантаноидов — тербий тоже был назван по имени небольшого городка (Иттербю в Швеции).

Позже было получено еще восемь изотопов берклия, более тяжелых, чем самый первый, с массами от 244 до 251. Среди них есть и сравнительно долгоживущие, например берклий-247 с периодом полураспада 1380 лет и берклий-249; прочие же «живут» лишь часы. Все они образуются в ядерных реакциях в совершенно ничтожных количествах. Лишь берклий-249 (бета-излучатель с периодом полураспада 314 дней) удастся получить в заметных — весовых, как говорят радиохимики, — количествах при облучении в реакторах урана, плутония, америция, а еще лучше кюрия.



## Бесценный элемент

Со дня открытия берклия прошло больше четверти века. Через 25 лет после открытия искусственного трансурана плутония его стали производить тоннами... Неясно, к счастью или к несчастью, но с берклием ничего подобного не случилось. Если поскрести по всем лабораториям мира, то в общей сложности едва ли наберется десятая доля грамма элемента № 97.

Такова действительность. А причины? Во-первых, берклий не нашел такого стратегически важного применения, как плутоний, а во-вторых, берклий значительно менее доступен. Чтобы получить берклий из урана, нужно суметь присоединить к его ядру 5—11 нейтронов. Это очень длинный и трудный путь, на котором нужно перескочить через несколько «пропастей деления» (в которые безвозвратно скатывается большинство образующихся атомных ядер) и протиснуться сквозь узкие «бутылочные горлышки» — изотопы, которые никак не желают присоединять нейтрон или, выражаясь на языке физиков, имеют малое сечение захвата нейтрона.

В результате в элемент № 97 даже в оптимальных условиях превращается меньше 1% ядер элемента № 92. Уже поэтому берклий не может быть не дорог. К этому следует добавить, что и само облучение в реакторе, да не в обычном, а в специальном, с большими потоками нейтронов, и несколько промежуточных химических переработок высокоактивных облученных мишеней обходятся очень дорого.

Вот почему берклию просто цены нет. В прямом смысле этого слова.

И все же приблизительно оценку сделать можно.

Берклий-249 получается в качестве побочного продукта при производстве калифорния-252, а официальная продажная цена калифорния уже определилась: 10 долларов за микрограмм, или 10 млн. долларов за грамм! Вот и подсчитайте, сколько стоит берклий, если известно, что его выход примерно в десять раз меньше выхода калифорния, а других способов получения элемента № 97 в ощутимых количествах пока не существует...

100 млн. долларов за грамм. По самым примерным, многого не учитывающим подсчетам. А стоит ли он таких денег? Сам берклий, наверное, нет. Изотопу  $^{249}\text{Bk}$ , равно

как и другим изотопам элемента № 97, пока не нашли особо важных применений. Но продуктом распада берклия-249 оказался изотоп калифорний-249. Способность его ядер к делению тепловыми нейтронами в несколько раз выше, чем у ядер урана-235 и плутония-239, обычно используемых в качестве делящихся материалов. Может быть, и даже ради этого не стоило затрачивать немалые суммы на получение берклия, но поскольку он все равно образуется в процессе получения калифорния-252, пренебрегать элементом № 97 нет оснований.

Конечно, время калифорниевой ядерной энергетики если и наступит, то очень не скоро. Но изучать этот элемент необходимо. А калифорний-249 интересен не только как изотоп, способный поддерживать ценную реакцию, но и как один из самых долгоживущих изотопов этого элемента. Он лучше всего подходит для исследований по химии калифорния. И берклий-249 уже потому заслуживает самого внимательного к себе отношения, что он служит своеобразным сырьем для получения долгоживущего калифорния.

## Видимый и невидимый

Хотя мировые запасы берклия исчисляются долями грамма, наука знает об этом элементе довольно многое. Известны его основные физико-химические константы, изучено несколько соединений сверхэкзотического металла. Конечно, для этого потребовалось создание особых «инструментов», а иногда и особых методов исследования. О том, что работа с берклием потребовала тончайшего экспериментаторского мастерства, рассказывать, наверное, излишне.

Берклием занимались и занимаются многие исследователи, однако первым среди них, безусловно, следует назвать американского радиохимика Б. Каннингема. Он разработал и использовал тончайшие микрохимические методы, создав в Беркли целую школу микрохимии.

В 1958 г. Б. Каннингем и С. Томпсон впервые выделили из долго облучавшегося в реакторе плутония-239 первые доли микрограмма берклия-249. Спустя четыре года, вместе со своим учеником Дж. Уолменом Каннингем получил первое соединение берклия — его двуокись  $\text{BkO}_2$  — и определил ее молекулярную структуру.

Все, чем располагали тогда экспериментаторы, — это 0,02 мкг берклия. На каждый опыт расходовали десятую часть этого количества, т. е. две миллиардные доли грамма! Тем не менее, работая с такими ультракрохами, исследователи сумели не только получить некоторые соединения элемента № 97, но и изучить их кристаллическую структуру. Делалось все сравнительно просто, и в то же время очень тонко и остроумно.

Берклий из раствора сорбировали на крохотном шарике ионообменной смолы, который затем прокачивали. Смола сгорала, а берклий (крупинку двуокиси, не видимую невооруженным глазом) переносили в тончайший капилляр. Пропуская через него различные газообразные реагенты, получали разные соединения берклия и, зажав капилляр, исследовали препараты методами рентгеноструктурного анализа.

Позже, когда удалось получить значительно большие количества (микрограммы и десятки микрограммов!), сумели, наконец, выделить и металлический берклий. Первый «слиток» весил 5 мкг. Получили его, восстановив литием трехфтористый берклий.

Тогда же была определена температура плавления этого металла —  $986^{\circ}\text{C}$  — и обнаружено, что металлический берклий может существовать в виде двух модификаций, отличающихся кристаллической структурой.

Заметно проще изучать химию берклия в растворе. Здесь достаточно вовсе невесомых, «индикаторных», количеств благодаря высокой удельной бета-активности объекта. Исследованиями такого рода установлено, что наиболее устойчивое валентное состояние берклия в водных растворах —  $3+$ , однако его несложно окислить и до четырехвалентного состояния.

Существование четырехвалентного берклия позволяет отделять этот элемент от других актиноидов и лантаноидов (продуктов деления), которые либо не имеют такой валентной формы, либо труднее в нее переводятся.

Конечно, далеко не все в химии берклия уже известно. Продолжается изучение различных его свойств, в частности способности к образованию комплексных соединений, поведения берклия в ионообменных и экстракционных процессах и т. д. Результаты этих исследований в свою очередь позволяют разрабатывать еще более эффективные методы его выделения.

## КАЛИФОРНИЙ



В древних китайских летописях сохранилась запись о чудесной необычайно яркой звезде, неожиданно возникшей на небосводе, которая затем постепенно угасала, и через два года от нее не осталось следа... Современные астрономы считают, что их давним предшественникам посчастливилось наблюдать редчайшее событие — рождение сверхновой звезды (supernovae, как ее нынче именуют в звездных каталогах).

В нашей галактике сверхновая вспыхивает примерно раз в несколько столетий. Астрономов XX в. выручают мощные телескопы, с их помощью ученые наблюдают рождение ярких звезд на расстоянии в сотни световых лет, в отдаленных мирах.

Из анализа летописей и современных наблюдений получалось, что сравнительно медленное убывание блеска сверхновой можно объяснить только энергией какого-то радиоактивного изотопа с периодом полураспада, близким к постоянной времени ее затухания.

### Изотоп для сверхновой?

Долгое время не находили подходящего изотопа. Наконец, в 1952 г. среди новых ядер, извлеченных из продуктов термоядерного взрыва «Майк», был обнаружен удивительный изотоп калифорний-254. Удивительный потому, что главным видом его распада оказалось спонтанное деление. Прежде подобные ядра в таблицах изотопов не числились.

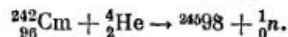
Удивительной оказалась и энергетика этого изотопа. Удельную мощность калифорниевого источника трудно назвать иначе, как гигантской, —  $10\,000$  квт/кг! Вполне подходящим для объяснения затухания сверхновой звезды оказался и 60-дневный период полураспада калифорния-254.

Возникла любопытная гипотеза: рождение сверхновой звезды объяснялось космическим термоядерным взрывом, в котором из стабильных ядер, наглотавшихся нейтронов, образовывалось значительное количество калифорния-254; длительное послесвечение звездной материи объяснялось энергией распадающегося калифорния.

## Первые атомы

С элементом № 98 ученые познакомились за два года до открытия «звездного» изотопа. В 1950 г. известные американские ученые Стэнли Томпсон, Генри Стрит, Альберт Гиорсо и Гленн Сиборг поместили в поток быстрых гелиевых ядер микрограммовую мишень из кюрия-242, пожалуй, самого неподходящего для этой цели изотопа элемента № 96. У кюрия-242 очень высокая удельная активность, и работать даже с микрограммовыми количествами подобного вещества весьма неприятно. Да и выход 98-го элемента в реакции кюриев + альфа-частица ожидался мизерным. Слишком мало нейтронов в ядре  $^{242}\text{Cm}$ , а это, как хорошо известно физикам-ядерщикам, всегда ведет к уменьшению к. п. д. реакции: при недостатке ядерных нейтронов шансы на образование новых элементов заметно уменьшаются. Но другого пути не было. В 1950 г. увеличить атомный номер облучаемого элемента больше чем на два еще не могли: самыми тяжелыми ядерными снарядами тогда были ядра гелия, альфа-частицы. Поэтому мишенью мог быть только кюрий, а других изотопов кюрия, кроме 242-го, еще не получили.

Новый элемент родился в ядерной реакции



Получили всего несколько тысяч атомов. Их нужно было отделить от кюрия-242, активность которого достигала  $10^{11}$  распадов в минуту; столько же альфа-частиц рождается в куске урана весом в несколько десятков килограммов.

По предварительным оценкам (основанным на систематике свойств изотопов трансурановых элементов) ожидали, что период полураспада нового изотопа будет около одного часа. Так что надо было спешить. Кюриевую мишень быстро растворили, раствор пустили в хроматографическую колонку с катионообменной смолой Дауэкс-50 и стали промывать смолу элюентом — альфа-оксиизобутиратом аммония.

Адсорбированные смолой атомы переходили в элюент и вместе с ним просачивались сквозь смолу. Капли элюента падали на платиновые пластинки, расположенные на краю круглого вращающегося столика. Ожидаемый порядок выхода актиноидов определили заранее, в опытах с лантаноидами. Элемент № 98 — аналог диспрозия — вы-

шел из колонки вовремя. Его исследовали: период полураспада  $^{246}_{98}$  оказался равным 44 минутам.

Новый элемент был назван калифорнием — в честь университета и штата, где были добыты его первые атомы. Авторы писали: «Известно, что название „диспрозий“ происходит от греческого слова «труднодоступный». Назвав открытый элемент калифорнием, мы хотели отметить, что первооткрывателям элемента пришлось столь же трудно, как век назад пионерам Америки трудно было достигнуть Калифорнии».

## Изотоп в тупике

Получить весовые количества калифорния в ядерных реакциях с заряженными частицами — задача практически невыполнимая: слишком мал выход этого элемента при слиянии двух атомных ядер. Так, ядра кюрия, бомбардируемые альфа-частицами, как правило, делятся ими на ядра-осколки — 98-й появляется только в исключительных случаях. Поэтому весовые количества калифорния сегодня получают, облучая тяжелые изотопы плутония и кюрия в нейтронных потоках мощных ядерных реакторов, построенных специально для производства трансуранов. Иначе, в обычном реакторе, накопление калифорния будет протекать слишком медленно. Потребуются десятки лет, чтобы плутоний или кюрий превратились в элемент № 98.

На пути плутоний — калифорний в осколки превращаются 9999 ядер из 10000. В конечном итоге на грамм калифорния затрачиваются 10 кг плутония-239. И все же потери в реакторе в тысячи раз меньше потерь при синтезе калифорния в пучке ускоренных ядер. Изотоп  $^{252}\text{Cf}$  по существу замыкает цепочку плутоний — калифорний. Это ядро слабо взаимодействует с нейтронами, его очень трудно превратить в еще более тяжелые изотопы. Калифорний-252 становится как бы естественным «тупиком» в реакторной цепи превращений плутония. Поэтому в тупике и скапливаются в основном ядра изотопа  $^{252}\text{Cf}$ . А более легкие изотопы —  $^{249}\text{Cf}$ ,  $^{250}\text{Cf}$ ,  $^{251}\text{Cf}$  — получаются в гораздо меньших количествах, хотя и стоят в предыдущих звеньях цепи превращений.

Первые микрограммовые количества калифорния-249 были накоплены в 1959 г. на американском реакторе для испытания материалов. Тогда же синтезированы и первые



чистые соединения калифорния — окись  $\text{Cf}_2\text{O}_3$  и оксихлорид  $\text{CfOCl}$ .

Для элемента № 98 характерна валентность 3+. Нитрат, сульфат, галогениды и перхлорат трехвалентного калифорния растворимы в воде. В другие валентные состояния калифорний переводится очень трудно. Лишь недавно радиохимикам Института физической химии АН СССР во главе с академиком В. И. Спициным и доктором химических наук Н. Б. Михеевым удалось получить двухвалентный калифорний, а американским радиохимикам — четырехвалентный (в виде твердого тетрафторида).

В 1977 г. группе сотрудников Института атомной энергии имени И. В. Курчатова и ВНИИ атомных реакторов удалось, используя в качестве стабилизатора фосфорвольфрамат калия, окислить в водном растворе калифорний(III) в калифорний(IV). Удалось снять спектр поглощения и оценить устойчивость этого экзотического катиона. Устойчивостью он, естественно, не отличался.

### Калифорниевые осколки

Калифорний-252 оказался незаменимо полезен для многих физических исследований. Хотя основной вид распада калифорния-252 — альфа-распад, интенсивность протекающего параллельно спонтанного деления достаточно велика. Микрограмм калифорния-252 в единицу времени без воздействия извне дает столько же ядер-осколков, сколько микрограмм урана при интенсивном облучении нейтронами в ядерном реакторе. Нет надобности объяснять, насколько проще изучать ядра-осколки, когда препарат находится «в руках» исследователя, а не запрятан за многометровую бетонную защиту атомного реактора.

Среди осколков калифорния были обнаружены уникальные ядра тяжелых изотопов гелия  $^6\text{He}$  и  $^8\text{He}$ . Несколько микрограммов калифорния помещали в поток обычного гелия, который и увлекал за собой все ядра-осколки летучих элементов и, конечно,  $^6\text{He}$  и  $^8\text{He}$ . Гелий пропускали через змеевик, охлаждаемый жидким водородом. Атомы всех газов, кроме гелия, вымораживались и оседали на стенках. Только гелиевые атомы (и среди них радиоактивные изотопы элемента № 2) проходили змеевик без задержки и достигали детекторов ядерных излучений, где и регистрировался распад гелия-6 и гелия-8.

Калифорниевые препараты дали возможность с высокой точностью измерить число вторичных нейтронов — число  $\eta$ , — возникающих при спонтанном делении. Оно оказалось очень большим: в среднем на акт спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$  приходится 3,82 нейтрона. В ценной реакции на уране или плутонии нейтроны выделяются заметно меньше.

### Калифорниевая пуля

Известно, что даже незначительная прибавка к величине  $\eta$  сильно влияет на критическую массу делящегося материала, уменьшает ее. Поэтому после изучения ядерных свойств калифорния считалось, что можно изготовить калифорниевую минибомбу весом всего в несколько десятков граммов. В американских журналах печатались статьи с описанием храбрых снайперов, которые выстрелами из винтовок, заряженных калифорниевыми патронами, преграждают путь целым армиям. Но, судя по научным публикациям, дальше сенсации дело не пошло: пока атомную взрывчатку выгоднее делать из плутония. Выше проводился расчет, что на десяток граммов калифорния необходимо израсходовать сотню килограммов плутония. А сто килограммов плутония — это много...

### Нейтронные консервы

Главное применение калифорния — изготовление мощных и чрезвычайно компактных источников нейтронов. Грамм калифорния-252 испускает около  $3 \cdot 10^{12}$  нейтронов в секунду. В острие самой тонкой иглы свободно размещается микроскопическая крупинка калифорния весом в один микрограмм. А эта крупинка порождает миллион нейтронов в секунду, и вместе с иглой ее можно везти, скажем, в злокачественную опухоль. Нейтроны будут разрушать область опухоли, прилегающую к острию иглы, а вокруг острия (поскольку пробег их мал) здоровые ткани останутся невредимыми.

Нейтронный источник микроскопических размеров полезен и для изучения внутреннего строения мягких тканей. Рентгеновские лучи хорошо выявляют структуру скелета и чужеродные тела, но изменения мышц с помощью рентгеновского аппарата выявить сложно. Нейтроны в отличие от рентгеновских квантов сильно рассеиваются ядра-

ми легких элементов, и по характеру рассеяния нейтронного потока можно судить о строении мягких тканей или любого вещества, состоящего в основном из легких элементов.

Калифорниевые нейтроны подходит и для разведки нефтяных пластов — нейтронного каротажа. Нефть состоит из водородсодержащих молекул, хорошо замедляющих нейтроны. Кроме того, нефть, как правило, не загрязнена примесями, поглощающими нейтроны. Благодаря этим обстоятельствам нефтяной пласт — великолепный нейтронный отражатель. Поэтому, когда счетчик и связанный с ним калифорниевый источник достигают нефтяного пласта, стрелка индикатора отмечает усиление нейтронного потока.

В наши дни калифорний-242 стал важным изотопом для нейтронного активационного анализа.

### Калифорниевая программа

Значение калифорния подчеркивается уже тем, что программа накопления трансурановых элементов в современных ядерных реакторах ориентирована в основном на получение калифорния-252. В США этот изотоп уже производят в граммовых количествах.

В реакторах накапливают и другие изотопы калифорния с массовыми числами 249, 250, 251. Нечетные изотопы делятся тепловыми нейтронами и по своим ядерным характеристикам намного превосходят уран-235 и плутоний-239. В цепи реакторных превращений нечетные изотопы калифорния не образуются в больших количествах именно благодаря их отличным ядерным характеристикам: такие изотопы сильно поглощают тепловые нейтроны и в конечном счете превращаются в изотоп калифорний-252.

Время работает на трансурановые элементы. В ядерных реакторах так или иначе накапливаются тяжелые изотопы плутония и кюрия. Пройдут десятилетия, и этих веществ накопится достаточно много, чтобы развить производство относительно дешевого калифорния, снабдить им ученых, геологов, инженеров... И тогда его преимущества как источника нейтронов, а может быть, и как источника энергии окажут существенное влияние на человеческое бытие.

## ЭЙНШТЕЙНИЙ



Есть термин, пришедший в науку из сказки. «Серендипностью» называют дар находить то, чего не ищешь. Этот дар был у героев древней сказки о трех привах Серендипа. «Серендипно» были сделаны многие выдающиеся открытия. Не стоит, впрочем, забывать о мудром замечании Луи Пастера, что «случай помогает подготовленному уму»...

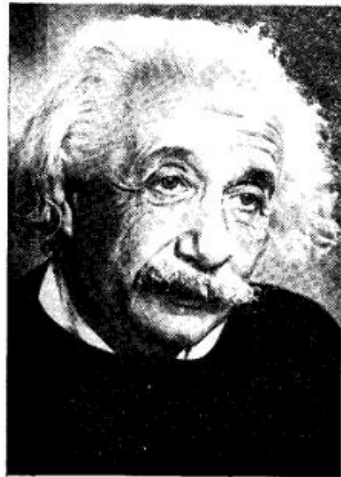
Открытие элементов № 99 и 100 — эйнштейния и фермия — тоже можно считать примером серендипности.

В 1949 г. в Советском Союзе были проведены успешные испытания атомной бомбы; США лишились монополии на атомное оружие. А еще через несколько лет Америка оказалась в роли догоняющего: первая водородная бомба была сделана в нашей стране.

«К июню 1951 г. наша программа создания водородной бомбы переживала тяжелый кризис». Это слова американского журналиста У. Лоуренса, волею судеб ставшего официальным историографом американского атомного оружия. Стремясь во что бы то ни стало первыми создать «сверхбомбу», американцы бросили на решение этой проблемы все силы и средства. Самое большое, что удалось им сделать, — это взорвать термоядерное устройство, получившее кодовое название «Майк». Именно устройство, а не бомбу: «Майк», оснащенный сложными рефрижераторными установками, был настолько тяжел, что его не мог поднять ни один самолет.

«Майк» был взорван 1 ноября 1952 г. на коралловом островке Элугелаб, входящем в атолл Энвиееток в Тихом океане. При взрыве Элугелаб исчез. На морском дне образовался полутораклометровый кратер глубиной более 50 м. На много километров поднялось радиоактивное облако, которое, расползаясь, достигло в диаметре более 100 км. В долю секунды выделилась энергия в сотни раз большая той, что испепелила Хиросиму. Но первый термоядерный взрыв дал и другие результаты.

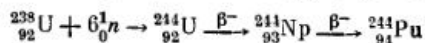
В частности, уран, входивший во взрывное устройство, подвергся интенсивному нейтронному облучению. Вычислили, что через каждый квадратный сантиметр его поверх-



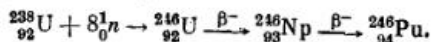
Элемент № 99 свое название получил в честь великого физика, отца теории относительности Альберта Эйнштейна (1879—1955). Новые химические элементы в наши дни открывают (а до этого — получают) физики. Эйнштейний — не единственный элемент, названный в честь физика

ности прошло около 8 г нейтронов. Это очень много. Чтобы облучить какое-либо вещество такой же «дозой» нейтронов в мирном ядерном реакторе, пришлось бы продержать его в реакторе около 100 лет. Эти колоссальные нейтронные потоки имеют прямое отношение к открытию элемента № 99.

В программу исследования эффектов, связанных с термоядерным взрывом, входило химическое исследование радиоактивных продуктов. Через грибовидное облако пронеслись беспилотные самолеты, они взяли пробы распыленных и газообразных веществ. В трех крупнейших лабораториях подвергли химической переработке сотни килограммов почвы с островов, окружавших исчезнувший Элугелаб. И в ней неожиданно обнаружили неизвестные раньше тяжелые изотопы плутония, которые могли образоваться в результате следующих процессов:



и



Но если так, то почему не могло случиться, что из нейтронных потоков невиданной плотности некоторые ядра урана захватили не 6—8, а, допустим, 15 нейтронов и после нескольких бета-распадов превратились в ядра эле-

ментов с порядковыми номерами больше 94, а может быть, и 98? (К тому времени было известно 98 элементов.)

Открыть новые элементы было весьма заманчиво. С этой целью началась интенсивная химическая переработка почвы, привезенной с островов, окружавших исчезнувший Элугелаб.

После многостадийной химической переработки была выделена фракция актиноидов, которые потом разделяли на ионообменной колонке. Для этих целей радиохимии Калифорнийского университета во главе с Г. Сиборгом использовали катионит Дауэкс-50 — сополимер стирола и дивинилбензола, в который введены еще функциональные группы сульфоновой кислоты.

Сначала крупицы этого полимера попросту насыпали в раствор, содержащий смесь актиноидов. Ионы элементов с порядковым номером от 89 и больше переходили из раствора на катионит. Тогда остаток раствора сливали, а мокрые крупицы катионита засыпали в верхнюю часть колонки, наполненной тем же самым полимером. Теперь нужно было отделить катионы от смолы и, отделяя, разделить.

Для этого применяют различные жидкости и растворы (их называют элюентами). В опытах было установлено, что для разделения лантаноидов пригодны в качестве элюентов соляная кислота и цитрат аммония. Эти же вещества решили использовать при разделении актиноидов: ведь актиноиды и лантаноиды — химические аналоги.

Расчеты оправдались. Благодаря неодинаковой прочности сцепления различных ионов с катионитом, в первых каплях элюента, выходящего из колонки, содержался только самый тяжелый элемент смеси, в последующих — второй, чуть более легкий, и так до последнего, самого легкого. Чтобы элементы снова не смешались, каждую каплю раствора принимали на отдельный платиновый диск и тут же отправляли в другое помещение, где с помощью специальных приборов определяли радиоактивные свойства элемента, принесенного в этой капле. Если по химическим свойствам актиноиды — почти двойники, то по радиоактивным они вполне индивидуальны.

19 декабря 1952 г. группа Сиборга ставила очередной опыт. Методика уже была отработана, химии точно знали, в какой по счету капле должен появиться самый тяжелый из открытых к тому времени элементов — кали-



форний. Однако еще раньше, в каплях, которые можно было бы назвать «докалифорниевыми», приборы зарегистрировали альфа-частицы с энергией 6,6 Мэв. Их порождали атомы неизвестного элемента. Но какого? Стали считать капли, в которых новый элемент давал о себе знать. Налцо была аналогия с десятым лантаном — гольмием. Значит, гольмий — ближайший аналог нового элемента и этот элемент — десятый актиноид; следовательно, его номер 99.

В первых опытах удалось выделить лишь несколько сот новых атомов — количество невидимое и невесомое. Обнаружить их удалось только благодаря высокой радиоактивности этого элемента. А спустя примерно месяц таким же путем и в том же «источнике» был найден еще один новый элемент — элемент № 100, впоследствии названный фермием.

Итак, впервые элемент № 99 был получен в термоядерном взрыве. Ядра урана, захватившие по 15 нейтронов, семь раз испустили по электрону и превратились в ядра эйнштейния-253. Не следует, однако, думать, что этот элемент нельзя получить другими путями, не отравляя атмосферу радиоактивными осадками.

Эйнштейний «делают» и в ядерных реакторах. Уран-238 облучают нейтронами, и происходит последовательный захват нейтронов. Конечно, в реакторах этот процесс идет значительно медленнее и занимает не доли секунды, а годы. Но зато полученная «продукция» не разбрасывается по площади в тысячи квадратных километров, как было при взрыве термоядерного «Майка». В реакторах удается накапливать элемент № 99 в намного больших количествах — миллиарды атомов.

Но самым перспективным способом синтеза этого элемента (как, впрочем, и других актиноидов с порядковым номером больше 99) сейчас считается метод тяжелых ионов — более быстрый, более эффективный. «Сырьем» служат достаточно стабильные уран и плутоний, а «снарядами» для бомбардировки — ускоренные ионы азота, кислорода, углерода и других сравнительно легких элементов — их-то и называют тяжелыми ионами. При синтезе этим методом порядковый номер элемента увеличивается сразу на несколько единиц по сравнению с элементом, из которого сделана мишень. Характерно, что восемь из двенадцати известных сейчас изотопов элемента

№ 99 впервые получены с помощью тяжелых ионов, альфа-частиц и дейтронов, а не нейтронов.

Так, при облучении урана-238 ионами азота в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне были получены изотопы эйнштейния с массовыми числами 245, 246 и 247 и уточнены радиоактивные свойства этих изотопов. Эйнштейний-247 в этих опытах получен впервые в мире\*.

Почему эйнштейний — эйнштейний, или какие бывают памятники — так можно было бы озаглавить эту часть нашей статьи. «Я памятник себе воздвиг нерукотворный...» Точно так же великие научные открытия — несравненно более величественные (и, наверное, более долговечные) памятники великим ученым, чем изваяния из бронзы, мрамора или гранита. Школьник, пропнося слова «закон Ньютона», не отдает себе отчета, что этим самым он несет живую эстафету памяти о гениальном физике.

Одним из величайших ученых всех времен и народов по праву считается Альберт Эйнштейн. Его знаменитую формулу  $E=mc^2$ , выражающую зависимость между массой и энергией, знают люди, очень далекие от физики. И очень символично, что имя автора этого закона, лежащего в основе всей ядерной энергетики, было увековечено в названии нового элемента — элемента № 99.

Что известно о свойствах эйнштейния? О радиоактивных почти все; чтобы точно определить эти свойства, много «материала» не нужно. Вряд ли есть смысл в популярной статье приводить все эти характеристики, они интересны лишь узкому кругу специалистов-физиков. Отметим только, что  $^{243}\text{Es}$  не только самый легкий, но и самый короткоживущий изотоп элемента № 99. Его период полураспада — 21 секунда. А дольше всех «живет» изотоп  $^{252}\text{Es}$  — его период полураспада 472 дня. Это тоже не очень много.

Известно не только, за сколько времени, но и каким путем распадаются ядра всех изотопов эйнштейния.

Намного хуже изучены химические и физико-механические свойства этого элемента. Можно только предполагать, что эйнштейний — металл примерно такой же

\* За эту работу автор статьи В. Л. Михеев и два других физика из Дубны — В. И. Илющенко и М. Б. Миллер в 1967 г. были удостоены премии Ленинского комсомола. — *Ред.*

тяжелый, как плутоний. Довольно отрывочны и сведения по химии эйнштейния. Известно, что в водных растворах он образует трехвалентные ионы, соосаждается с гидроокисями и фторидами редких земель, а из азотной кислоты экстрагируется трибутилфосфатом. Известно несколько комплексных соединений эйнштейния. Наиболее тщательно изучено поведение эйнштейния в ионообменных колонках.

Чем полезен эйнштейний? Если бы кто-то из прочитавших эту статью приехал к нам в Дубну и попросил показать, как выглядит эйнштейний, то просьба эта осталась бы неудовлетворенной. Всего несколько микрограммов весит самая большая из полученных пока в мире «партий» этого металла. Существуют программы получения эйнштейния в ядерных реакторах в значительно больших количествах — около миллиграмма, но пока эти программы остаются программами. Главное препятствие для получения весомых количеств эйнштейния — малое время жизни его изотопов.

Несмотря на это эйнштейний уже получил практическое применение — в качестве мишеней для синтеза еще более далеких трансурановых элементов. Из эйнштейния-253 впервые получен элемент № 101, названный в честь Дмитрия Ивановича Менделеева.

Но, главное, ради чего изучают свойства эйнштейния и других трансурановых элементов (кроме плутония), — это систематизация знаний о сверхтяжелых ядрах, выяснение закономерностей, на основе которых можно будет синтезировать сверхтяжелые элементы гипотетической пока области относительной стабильности.

## ФЕРМИЙ



Элемент № 100 назван в честь одного из крупнейших физиков нашего столетия — Энрико Ферми.

Академик Бруно Понтекорво, ныне работающий в Дубне, а в молодости имевший счастье сотрудничать с Ферми, пишет в своих воспоминаниях: «Награждение Нобелевской премией считается признаком достижения вершин в науке. Невольно

спрашиваешь: если бы исследования Ферми публиковались различными авторами, скольких Нобелевских премий они могли быть удостоены? Мне кажется, что не менее шести, а именно: за статистику, теорию бета-распада, исследования по свойствам нейтронов, совокупность теоретических работ о структуре атомов и молекул, создание первого атомного реактора, работы по физике высоких энергий».

Напомним, что за работы в одной области науки (физике, химии, биологии и т. д.), согласно положению о Нобелевских премиях, один человек лишь один раз в жизни может быть удостоен этой награды\*. Ферми стал лауреатом Нобелевской премии в 1938 г., в возрасте 37 лет, за исследования процессов с нейтронами. В ходе этих исследований в 1934 г. Ферми первым высказал идею о возможности создания элементов с атомными номерами, большими, чем у урана, путем облучения ядер урана нейтронами. Присоединившись к ядру урана, один или несколько нейтронов делают его способным испустить одну или несколько бета-частиц. При этом заряд ядра увеличивается ровно на столько единиц, сколько было испущено бета-частиц. А именно зарядом ядра определяется, как известно, порядковый номер элемента. Самому Ферми не удалось доказать, что в его опытах происходил синтез трансурановых элементов. Но предложенный им способ широко использовался для синтеза новых эле-

\* Сделано лишь одно исключение из этого правила. Американский ученый Дж. Бардин дважды — в 1957 и 1972 гг. — входил в группы ученых, удостоенных Нобелевской премии по физике. Кроме него дважды лауреатами (за работы в разных областях науки) стали Мария Склодовская-Кюри и Лайнус Полинг.



*Великому итальянскому физiku Энрико Ферми (1901—1954) так и не удалось доказать, что в его опытах 30-х годов были впервые получены трансурановые элементы. Тем не менее его вклад в науку вообще и в учение о радиоактивности в частности настолько велик, что в память о нем был назван искусственный радиоактивный элемент, замыкающий первую сотню элементов периодической системы*

ментов и изотопов. Элемент № 100, носящий имя Ферми, впервые получен именно при многократном захвате нейтронов ураном-238 с последующей цепочкой бета-распадов.

Элемент — понятие прежде всего химическое, но на нынешнем этапе все науки, даже гуманитарные, так или иначе используют достижения физики и математики. Особенно тесно физика и химия переплелись в открытии и исследовании свойств трансурановых элементов. Поэтому совершенно справедливо, что имя Ферми, многократно увековеченное физиками в таких понятиях, как ферми (единица длины —  $10^{-13}$  см; в таких единицах измеряются размеры ядер и элементарных частиц), фермион, уровень Ферми и т. д., заняло почетное место и в таблице Менделеева.

### Открытие

Если большинство трансурановых элементов было открыто в результате тщательно спланированных экспериментов, то элемент № 100 — фермий, так же как и предыдущий элемент — эйнштейний, был открыт совершенно неожиданно в продуктах термоядерного взрыва в ноябре 1952 г. Три группы химиков и физиков из разных лабо-

раторий США переработали сотни килограммов пород с места взрыва и выделили первые в мире сотни атомов 99-го и 100-го элементов. Некоторые ядра урана-238, входившего во взрывное устройство, захватили при взрыве по 17 нейтронов. Образовавшийся нейтроноизбыточный изотоп уран-255, пройдя цепочку из восьми бета-распадов, превратился в фермий-255, который и был зарегистрирован по испускавшимся его ядрами альфа-частицам. Период полураспада фермия-255 — около 20 часов. Методика выделения фермия и эйнштейния из продуктов термоядерного взрыва описана в статье об эйнштейнии, поэтому не станем повторяться. Напомним лишь, что в течение трех лет открытие новых элементов было засекречено, как и все связанное с созданием самого мощного за всю историю человечества оружия.

Еще до того, как данные по элементам № 99 и 100 были рассекречены, эти элементы были получены и в мощном ядерном реакторе, работавшем в штате Айдахо в США. Процессы, приводящие к образованию новых элементов в реакторе и термоядерном взрыве, в принципе одни и те же. Разница во времени. Захват нейтронов при термоядерном взрыве происходит за миллионную долю секунды, в реакторе же насыщение исходного плутония нейтронами потребовало более двух лет.

Лишь в 1955 г. в журнале «Physical Review» в статье шестнадцати ученых, в том числе лауреата Нобелевской премии Г. Сиборга, были опубликованы результаты выполненных в 1952—1953 гг. опытов по выделению 99-го и 100-го элементов. Авторы статьи предложили назвать эти элементы в честь Альберта Эйнштейна и Энрико Ферми, скончавшихся за несколько месяцев до публикации. Предложенные названия были приняты.

Из более поздних публикаций стал известен и день рождения 100-го элемента — 16 января 1953 г., когда на понообменной колонке были выделены его первые 200 атомов.

### Радиоактивные свойства фермия

Синтезировано 18 изотопов фермия с массовыми числами от 242 до 259. Самый долгоживущий из них — фермий-257 с периодом полураспада 100 дней, он испускает альфа-частицы с энергией 6,5 Мэв. А самый короткоживущий изотоп — фермий-258, испытывающий спонтанное



деление с периодом полураспада 380 микросекунд. Спонтанное деление оказалось основным видом распада еще для нескольких изотопов элемента № 100:  $^{242}\text{Fm}$ ,  $^{244}\text{Fm}$ ,  $^{250}\text{Fm}$  и  $^{259}\text{Fm}$ . Напомним, что для изотопов урана вероятность спонтанного деления по отношению к вероятности альфа-распада составляет меньше 1 : 1 000 000.

Пока наибольшее когда-либо полученное человеком «в один присест» количество фермия составляет 5 млрд. атомов, т. е. около двух миллионов долей миллионной доли грамма. Это атомы изотопа фермий-257, выделенные из 10 кг породы с места взрыва термоядерного устройства под кодовым названием «Хатч» на подземном полигоне в штате Невада в июле 1969 г.

Весь этот фермий исследователи Радиационной лаборатории имени Лоуренса (город Беркли) поместили в кружок диаметром 2 мм на бериллиевой фольге толщиной 0,01 мм и облучили мощным потоком дейтронов. Нейтроны из дейтронов захватывались фермием-257, образуя фермий-258.

В ходе этих опытов и было установлено, что фермий-258 почти моментально распадается путем спонтанного деления. Стала очевидна причина, по которой в продуктах термоядерных взрывов не смогли найти изотопов тяжелее фермия-257. После захвата нейтронов цепочка бета-распадов доходила до фермия-258, а тот вместо превращения в 101-й элемент распадался на осколки. «Тупиковый» изотоп перечеркнул надежды физиков открыть элементы второй сотни в термоядерных взрывах. И в нейтронных потоках ядерных реакторов — тоже. Однако «тупиковый» изотоп оказался все же полезен науке: именно на его ядрах было впервые обнаружено симметрич-

ное деление. Кривая распределения осколков при спонтанном делении обычно напоминает очертание спины двугорбого верблюда. Здесь же — симметричный пик, один «горб»...

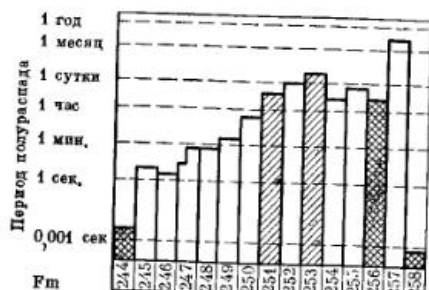
После детального исследования свойств фермия-258 стало ясно: единственным реальным путем к еще более тяжелым трансурановым элементам остаются ядерные реакции с участием относительно тяжелых ионов.

Между прочим, большинство известных сейчас изотопов фермия получено именно этим методом: при бомбардировке урана, плутония, калифорния ионами кислорода, углерода и альфа-частицами. В частности, в опытах, выполненных при участии автора этой статьи в Дубне, в Лаборатории ядерных реакций, был впервые получен фермий-247. Удалось установить, что этот альфа-активный изотоп существует в двух состояниях с периодами полураспада 35 и 9 секунд.

### Химия фермия

По химическим свойствам фермий сходен с другими актиноидами. Его основное валентное состояние  $3+$ . Лучше всего изучено поведение фермия в ионообменных колонках. Все опыты по химии фермия выполнены на невидимых и невидимых глазу количествах, обнаруживаемых лишь по радиоактивности.

Типичный для работы с ультрамалыми количествами веществ опыт по химии фермия был выполнен в 1971 г. В нем участвовали сотрудники Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне и сотрудники Института физической химии АН СССР под руководством доктора химических наук Н. Б. Михеева. Несколько десятков миллиграммов оксидной урана-238 в течение пяти часов облучали на циклотроне ионами кислорода-18. Пучок ионов был настолько мощен (около 100 тыс. миллиардов частиц в секунду), что, не будь непрерывной циркуляции воды через массивную медную подложку мишени, последняя расплавилась и испарилась бы в считанные минуты. Ядра кислорода, сталкиваясь с ядрами урана, в небольшой доле случаев полностью сливались с ними, сбрасывая избыточную энергию испусканием четырех нейтронов. В результате получался фермий-252, излучавший альфа-частицы с периодом полураспада 25 часов.



Радиоактивные свойства изотопов фермия. Высота полоски соответствует периоду полураспада в логарифмическом масштабе. Двойная штриховка означает, что основной для этого изотопа вид распада — спонтанное деление, а одинарная — электронный захват. Не заштрихованы колонки альфа-активных изотопов

Прежде всего считанные атомы фермия надо было отделить от массы атомов урана. В боксе с толстыми стенками из стали и стекла облученный уран со всеми образовавшимися продуктами смывался с подложки азотной кислотой. При химических манипуляциях немногочисленные атомы фермия могли быть потеряны из-за адсорбции на стенках сосудов, осадках, коллоидных частицах. Чтобы этого не произошло, в полученный раствор добавили редкоземельный элемент самарий, по химическим свойствам близкий к фермию. Умышленно создавали большую концентрацию самария, чтобы всякого рода центры адсорбции «насыщались» именно самарием. А при химических превращениях атомы самария играли роль носителя, увлекая за собой считанные атомы родственного фермия.

Далее в полученную смесь элементов добавляли плавиковую кислоту. Образующиеся при этом фториды актиноидов начиная с плутония и самарий выпадали в осадок, а уран оставался в растворе. В ходе дальнейших химических процедур было установлено, что хлориды самария и фермия в водно-спиртовых растворах восстанавливаются магнием до двухвалентного состояния и фермий сокристаллизуется с самарием в кристаллах  $\text{SmCl}_2$ . Это было первое в мире доказательство существования у фермия еще одной валентности — 2+. Разделить самарий и фермий для дальнейших исследований помогли процессы экстракции и реэкстракции. В конечном счете на платиновом диске был осажден фермий с очень небольшим количеством примесей.

#### Стоит ли изучать?

Мы уже упоминали о самой большой из когда-либо полученных порции элементного фермия. За три года, к июлю 1972 г., она уменьшилась более чем в 3 тыс. раз в результате радиоактивного распада. Очевидно, делать из фермия что-либо, рассчитанное даже на годичный срок службы, вряд ли целесообразно. Так зачем он вообще нужен?

Казалось бы, фермий — элемент бесполезный. Но, как мы уже знаем, определение радиоактивных свойств фермия-258 позволило сделать вывод о неперспективности термоядерных взрывов для синтеза новых элементов. Разве это не практический выход?

В науке вообще опасно отмахиваться от возможности глубокого изучения чего-либо, будь это объекты физические, биологические или какие-либо другие. Даже самые талантливые и самые прозорливые ученые не всегда могут предвидеть последствия той или иной работы, того или иного открытия. Известно, что всего за пять лет до пуска первого ядерного реактора Эрнест Резерфорд (сам Резерфорд!) в своей лекции заявил: «Перспектива получения полезной энергии при искусственных процессах превращения не выглядит обещающей». А изобретатель циклотрона Э. Лоуренс еще в 1938 г. считал, что, «хотя мы знаем, что материя может быть превращена в энергию, мы ясно осознаем, что разрушение ядерного вещества для получения энергии не сулит больших перспектив, чем охлаждение океана и использование его тепла для производства полезной работы...» Открытие фермия было необходимым шагом для науки, а даст ли практический выход дальнейшее изучение этого элемента, покажет будущее.

## МЕНДЕЛЕВИЙ



Право дать имя новому элементу принадлежит тем, кто его открыл. Девять первых трансурановых элементов впервые получены американскими физиками. Получены, исследованы, распознаны или, как принято писать, идентифицированы.

Элемент № 101 был впервые получен в начале 1955 г. в Радиационной лаборатории Калифорнийского университета. Этот элемент знаменателен не только тем, что с него начинается счет второй сотни химических элементов.

Почти десять лет синтез и идентификация первого элемента второй сотни заслуженно считались вершиной экспериментального мастерства и в физике, и в химии.

«Для нового элемента было предложено наименование «менделевий»... в знак признания заслуг великого русского химика Д. И. Менделеева, который первый использовал для предсказания химических свойств неоткрытых элементов периодическую систему элементов, принципы которой явились ключом для открытия большинства трансурановых элементов». Это слова из книги Э. Хайда, И. Перлмана, Г. Сиборга «Трансурановые элементы».

### На подступах к менделевию

Их было пятеро — деловитых и ироничных, самолюбивых и не чуждых саморекламы, разных по взглядам и убеждениям, но в равной степени увлеченных трансуранами и преданных науке.

Вот имена первооткрывателей менделевия: Гленн Сиборг, Альфред Гиорсо, Бернард Гарвей, Грегори Чоппин, Стенли Томпсон.

Как известно, в химических реакциях можно получить новые вещества, но не новые элементы. Чтобы получить элементы, недостаточно умело распорядиться электронными оболочками атомов — нужно лезть в ядро. Для многих химических реакций требуется сложнейшее оборудование, но техника, необходимая для ядерных превращений, еще сложнее.

Легче всего вогнать в ядро нейтрон — частицу, не несущую электрического заряда. Конечно, не просто попасть в эту микроскопическую цель и таким «снарядом»: размеры атомов измеряются миллионными долями миллиметра, а диаметр ядра примерно в 100 тыс. раз меньше диаметра атома. Но когда снарядом служит нейтрон, не приходится преодолевать сил отторжения, отталкивания. Помните? «Разноименные полюса притягиваются, одноименные полюса отталкиваются». Это правило одинаково справедливо и для электричества, и для магнетизма. Оно действует и в мире ядерных частиц.

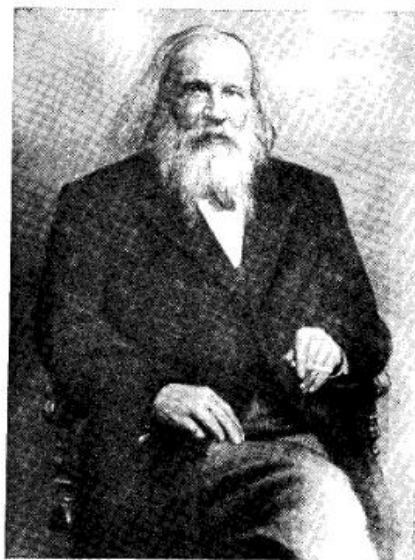
«Внедряя» в ядро нейтрон или нейтроны, получают не только новые изотопы, но и новые элементы. Добавочный нейтрон делает ядро неустойчивым к радиоактивному распаду. Известно несколько видов распада. В одном случае ядро может поделиться на два осколка примерно равной массы — спонтанное деление, и тяжелый элемент превращается в два намного более легких. В другом случае ядро испускает альфа-частицу (ядро гелия), и тогда элемент с порядковым номером  $Z$  становится элементом номер  $Z - 2$ .

В нейтронных потоках обычно стремятся получить ядра, распадающиеся третьим способом — испуская электрон (бета-распад). В этом случае один из нейтронов ядра превращается в протон, и элемент номер  $Z$  становится элементом номер  $Z + 1$ . Строгая закономерность взаимопревращений элементов при альфа- и бета-распаде — одно из ярчайших физических проявлений периодического закона.

В потоках нейтронов были получены все трансурановые элементы вплоть до фермия, в том числе и плутоний — металл, во много раз более дорогой и нужней, чем золото. Но для синтеза элемента № 101 нейтронный метод был неприменим. Этим методом элемент № 101 можно было бы получать из фермия, но в 1955 г. о мишени, сделанной из элемента № 100, можно было только мечтать. Даже более доступного и легкого эйнштейния (изотоп  $^{253}\text{Es}$ ) удалось наскрести только несколько миллиардов атомов — количество невидимое и почти невесомое. Пополнения «сырьевых запасов» ждать было неоткуда; в ядерных реакторах эйнштейний-253 накапливается очень медленно.

Тем не менее решили «делать» элемент № 101 именно из эйнштейния. И не только потому, что фермий был совсем недоступен: уже существовали достаточно мощные





*Первый химический элемент этой серии назван в честь величайшего русского химика создателя периодического закона Дмитрия Ивановича Менделеева (1834—1907)*

ускорители, в которых заряженные частицы приобретали такую энергию, такую скорость, что могли ворваться в ядро, преодолев невидимый, но мощный барьер электрических сил отторжения.

Конечно, чем тяжелее «снаряд», тем сложнее придать ему необходимую энергию, но ускорять альфа-частицы (ядра атомов гелия) уже умели.

У альфа-частиц по сравнению с нейтронами и протонами есть одно бесспорное преимущество: вклиниваясь в ядра, эти «снаряды» увеличивают их заряд не на одну, а сразу на две единицы.

Важным событием, предшествовавшим синтезу мendelevия, была разработка метода, который в литературе чаще всего называют методом отдачи, а реже, но правильное — методикой сбора выбитых атомов.

Прежде было так: обстреляли мишень частицами — некоторые ее атомы претерпели алхимические изменения, но... это еще надо доказать. А чтобы сделать это, мишень растворяли: раствор делили на десятки фракций, чтобы выделить соединения нового элемента. Все остальное шло в канализацию, вернее — в хранилища радиоактивных отходов. Если бы так поступили с мишенью из эйнштей-

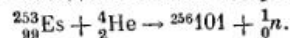
ния, а первый опыт оказался неудачным, то открытие элемента № 101 отодвинулось бы минимум на два года.

Но этого никто не собирался делать именно потому, что метод отдачи был уже разработан и опробован. Коротко об этом методе.

В циклотрон помещали два листка тончайшей золотой фольги. Их устанавливали на пути альфа-частиц, летящих со скоростью, соизмеримой со скоростью света (всего в 10 раз меньше). Внешне листки были одинаковыми, но им предназначались разные роли. Поэтому до опытов в циклотроне листок, которому предстояло быть установленным на 5,5 мм дальше от источника «снарядов», был всего лишь кусочком золота. Зато второй листок был во много раз ценнее. На одну из его сторон в электролитической микрованночке осадил несколько миллиардов атомов эйнштейния — собственно, весь эйнштейний-253, которым в то время располагали Соединенные Штаты. Эту мишень установили в циклотроне таким образом, чтобы «эйнштейнированная» сторона была обращена ко второму золотому листку. Оба листка находились в вакуумированной съемной обойме.

Ядра гелия должны были пройти сквозь золотую «подложку» первого листка, встретиться с ядрами некоторых атомов эйнштейния и слиться с ними. Энергия, принесенная ядром-снарядом, настолько велика, что образовавшееся составное ядро уже не могло удержаться на золотой подложке. Оно срывалось с места и летело вперед. Но через 5,5 мм на его пути оказывалось непреодолимое препятствие — второй золотой листок. И, растолкав атомы золота, новое ядро должно было застрять среди них. Так должно было случиться хотя бы с несколькими атомами.

Иными словами, исследователи надеялись, что будет происходить такая ядерная реакция:



По окончании обстрела предполагалось снять второй листок — сборник выбитых атомов — и отправить его на химическое исследование. Там с ним можно делать что угодно. Важно, что сохраняется другой листок — эйнштейниевая мишень, которую можно использовать еще не раз.

Но не только возможностью сохранять уникальные мишени привлекателен этот метод. В какой-то мере он еще облегчает работу химиков. Ведь по химическим свойствам

все трансураниевые элементы очень похожи; в процессе бомбардировки образуются не только атомы нового элемента, но и «старые» трансураны. На второй золотой листок переносятся далеко не все «посторонние» атомы. Отделить новый элемент от прочих в этом случае легче.

В первой серии экспериментов на циклотроне Сиборг и его группа зарегистрировали 17 атомов элемента № 101. Как это было, лучше всех знают сами авторы открытия. Поэтому следующая глава нашего рассказа о менделевии — фрагмент статьи Гиорсо, Гарвей, Чоппина и Томпсона, написанной для книги Сиборга и Вэленса «Элементы Вселенной».

В сносках — наш минимально необходимый физико-химический комментарий.

### «Химия на бегу»

«...Во время бомбардировки мишени все помещение, где расположен циклотрон, было наглухо закрыто. Гарвей и Гиорсо находились снаружи, за «водяной дверью» — большим баком на роликовых катках, наполненным водой.

Оставалось лишь ожидать стартового выстрела, чтобы начать эту необычную скачку с препятствиями. Мы рассчитывали в нашем первом опыте получить всего только один или, может быть, два атома 101-го элемента. И эти один или два атома нужно было выделить... и идентифицировать менее чем за полчаса.

Как только был подан сигнал отбоя, Гарвей и Гиорсо немедленно отодвинули «водяную дверь» и ринулись внутрь. Гиорсо быстро вынул мишень из обоймы. Гарвей снял двумя пинцетами вторую золотую фольгу и зачихнул ее в пробирку.

Затем он помчался по коридорам и вверх по лестницам в комнату, предназначенную для временной лаборатории. В этой, с позволения сказать, лаборатории Гарвей передал фольгу Грегори Чоппину, который стал нагревать ее в растворе, с тем чтобы золото растворилось.

В итоге мы получили жидкость, содержащую золото, смесь некоторых других элементов и, возможно, несколько атомов менделевия, как мы назвали его позднее.

Остальные необходимые химические операции надо было производить за милю от циклотрона, на вершине холма, в Радиационной лаборатории.

Гиорсо уже сидел за рулем автомашины возле здания циклотрона, готовый сорваться с места и с бешеной скоростью мчаться на холм.

У нас имелось — мы надеялись, что это так, — несколько атомов элемента № 101, и наша задача заключалась в том, чтобы выделить и идентифицировать их раньше, чем они успеют распасться.

Менделевий является настолько короткоживущим элементом, что половина любого количества его распадается приблизительно за полчаса, превращаясь в изотоп фермия, который в свою очередь распадается путем самопроизвольного (спонтанного) деления.

Драгоценные капли раствора были привезены на холм Беркли в корпус ядерной химии. Чоппин и Гарвей бросились в лабораторию, где их ожидал Стенли Томпсон с аппаратурой, предназначенной для отделения 101-го элемента от эйнштейния, золота и всех других элементов, которые могут присутствовать в растворе.

Вначале жидкость была пропущена через ионообменную колонку, чтобы избавиться от золота\*. Золото задерживается в колонке, в то время как раствор, содержащий менделевий, капает со дна ее.

Эти капли были высушены и вновь растворены, после чего Томпсон пропустил их через вторую колонку для отделения менделевия от любых других элементов, которые все еще могли оставаться в растворе\*\*.

Эти капли, падающие со дна колонки, последовательно принимались на небольшие платиновые пластинки, которые затем подставлялись под нагревательную лампу и высушивались.

Далее пластинки были перенесены в «счетную комнату», где Гиорсо поместил их в специальные счетчики — каждую пластинку в свой счетчик.

Если какое-то количество менделевия присутствовало в одной из исследуемых капель, то его можно было бы выявить по характеру радиоактивного распада. Когда атом нового элемента распадается, то образовавшиеся при этом осколки создают в счетчике «вспышку» сильной ионизации.

\* Часть золота предварительно удалялась путем экстракции из раствора этилацетатом.

\*\* Из этой колонки радиоактивные атомы вымывались эфиром  $\alpha$ -оксисизомасляной кислоты, который образует с ними комплексные соединения.

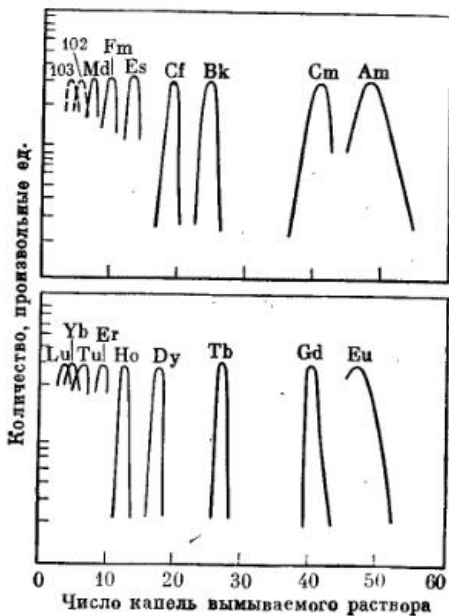
ции. Этот импульс тока вызывает скачок пера на регистрационной карточке записывающего прибора.

Характерным для этих неуловимых тяжелых элементов является то, что мы не можем положительно идентифицировать атом до тех пор, пока он не перестанет быть именно этим элементом и не распадется в какой-то другой атом. Это несколько напоминает человека, который считает деньги только тогда, когда расстается с ними.

Во время первого эксперимента нам пришлось ждать больше часа, прежде чем перо подскочило до середины шкалы и упало обратно, нарисовав линию, что означало распад впервые открытого атома менделевия.

Поскольку произошло чрезвычайное событие в жизни Радиационной лаборатории, мы подключили к счетчикам пожарный звонок, находящийся в коридоре, так что каждый раз, когда распадался атом элемента № 101, раздавался сигнал тревоги.

Это был наиболее эффективный способ оповещения о важном событии в мире атомного ядра, но вскоре он был заменен более совершенным средством, не противоречившим предписаниям пожарников.



Кривые вымывания для лантаноидов и актиноидов выглядят почти одинаково. Ближайший аналог менделевия — 12-й лантаноид тулий

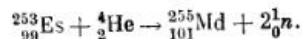
Мы обнаружили примерно по одному атому менделевия в каждом из наших первых экспериментов. Было поставлено около дюжины опытов, и наш общий итог составил 17 атомов нового элемента».

Остается добавить только, что менделевий — двенадцатый элемент серии актиноидов. Наиболее характерная валентность менделевия равна 3+.

### Что было потом

Было установлено, что ядра менделевия-256 распадаются, захватывая электрон с ближайшей орбиты. Период полураспада — около 30 минут. При этом менделевий-256 превращался в фермий-256 — спонтанно делящийся изотоп с периодом полураспада 3,5 часа.

В 1958 г. были опубликованы результаты работ другой группы американских ученых — во главе с Л. Филлипсом. Они получили несколько сот атомов менделевия-256 и убедились, что группа Сиборга определила период полураспада этого изотопа неправильно: он равен не 30 минутам, а полутора часам. А за полчаса распадается половина ядер другого изотопа менделевия — изотопа с массовым числом 255. Этот изотоп образуется по реакции



Видимо, эта реакция и шла в экспериментах 1955 г.

В 1964 г., обстреливая мишень из калифорния ионами углерода-12, А. Гиорсо с сотрудниками получил еще один изотоп менделевия —  ${}^{257}\text{Md}$ .

Разговоры о менделевии как вершине экспериментаторского мастерства к этому времени уже прекратились, восторги умерились. Произошло это не только потому, что каждое блюдо (и каждая сенсация) хорошо только свежеприготовленным. В том же 1964 г. были получены первые атомы курчатовия; метод, которым получили элемент № 104, оказался еще остроумнее и филиграннее, чем метод отдачи.

И вдруг в конце 1967 г. название элемента № 101 вновь замелькало на страницах газет.

### Долгоживущий менделевий

Начало новой сенсации положил все тот же Гленн Сиборг, ставший к этому времени председателем Комиссии США по атомной энергии. В одном из своих выступлений



он сообщил, что его бывшие коллеги по Радиационной лаборатории А. Гиорсо и К. Хьюлет получили изотоп  $^{258}\text{Md}$ .

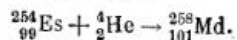
Казалось бы, что здесь особенного? За три десятилетия, прошедших с тех пор, как начались работы по синтезу искусственных элементов, в мире было получено больше сотни изотопов этих элементов. Почему же о новом изотопе Сиборг говорил как о чем-то исключительном?

И у далеких трансурановых элементов могут быть сравнительно долгоживущие изотопы — с периодами полураспада порядка месяцев, а не часов или секунд. Только эти изотопы должны быть нейтронно-избыточными.

Что это значит? Для ядер легких элементов естественно соотношение между нейтронами и протонами 1 : 1. Именно в этом случае ядра наиболее стабильны. Для тяжелых элементов шестого периода в течение многих лет оптимальным считалось соотношение 3 : 2 «в пользу нейтронов». Если это правило распространить и на все актиноиды, то самым долгоживущим изотопом менделевия должен быть тот, в атомах которого 101 протон и 151 или 152 нейтрона, т. е. изотоп  $^{252}\text{Md}$  или  $^{253}\text{Md}$ . Но для элементов с порядковыми номерами от 90 до 110 самые стабильные изотопы те, где «счет в пользу нейтронов» еще больше.

Синтез и свойства менделевия-258 еще раз подтвердили это правило.

Этот изотоп был получен на линейном ускорителе в Беркли по реакции



Вопреки прогнозам теоретиков период его полураспада оказался равным не 10 часам, а почти двум месяцам!

Уже в первой серии экспериментов было накоплено около 30 тыс. атомов нового изотопа. Теперь химию менделевия стало не обязательно изучать «на бегу».

### Еще о химии менделевия

Выше упоминалось уже, что менделевию, как и другим актиноидам, свойственна валентность 3+. Это установили сразу же после первого синтеза. Лишь через двенадцать лет американский химик Хьюлет с сотрудниками выяснили, что  $\text{Md}^{3+}$  сравнительно легко восстановить до  $\text{Md}^{2+}$ . Это не вызвало сенсации: у тяжелых лантаноидов, и в част-

ности у тулия — редкоземельного аналога менделевия, известна такая же валентность.

Теоретики предсказывали и возможность существования одновалентных менделевия и тулия. Переход двух электронов на  $f$ -уровень означал бы для них образование устойчивой четырнадцатизлектронной подоболочки. Однако одновалентный тулий неизвестен до сих пор, а одновалентный менделевий был впервые получен радиохимиками Института физической химии АН СССР во главе с академиком В. И. Спичковым лишь в 1972 г.

Одновалентный менделевий зарегистрирован в спиртовых солянокислых растворах. Оказалось, что в такой среде одновалентное состояние менделевия очень устойчиво. Из этих растворов менделевий соосаждался вместе с труднорастворимыми соединениями щелочных металлов, — это было прямым доказательством общности их свойств. Аналогия, конечно, не абсолютная, но все же любопытно: первый элемент второй сотни в чем-то схож с типичными элементами первой группы.

Менделевий стал первым трансурановым элементом, для которого известно валентное состояние 1+.

Вот, пожалуй, в общих чертах все, что известно сейчас об элементе № 101 — элементе, носящем имя величайшего русского химика... Синтез всех без исключения искусственных элементов стал возможен не только благодаря современной технике, успехам ядерной физики и талантливости тех или иных исследователей. Главной теоретической основой прошлых и будущих синтезов был и остается периодический закон, закон Менделеева.

## НОБЕЛИЙ



В 1955 г. была заполнена 101-я клетка таблицы Менделеева. Следующим, естественно, должен был стать синтез 102-го элемента. Создатели новых химических элементов стремились быть последовательными: шаг за шагом, ступень за ступенью. Но каждый последующий шаг за уран давался все труднее.

В 1956 г. к этой работе почти одновременно приступили исследователи из Нобелевского института физики в Стокгольме (в группе работали английские, шведские и американские ученые) и из Института атомной энергии в Москве. Вслед за ними в работу по синтезу 102-го элемента включились ученые Радиационной лаборатории Калифорнийского университета (Беркли).

Не прошло и года, как в научных журналах появились статьи, из которых следовало, что элемент № 102 синтезирован.

Эти сообщения подхватили газеты, о новом элементе узнал весь мир. Но ясности, необходимой для окончательного утверждения нового элемента в периодической системе, не было еще долгие годы. Объясняется это не только трудностями, возрастающими с каждым новым шагом в трансурановую область, но и в какой-то мере поспешностью заключений.

В итоге для окончательного ответа на вопрос: «Что же такое элемент № 102?» — понадобилось десять лет. Десять лет работы исследователей разных лабораторий и разных стран.

Исторически все работы по получению и исследованию 102-го элемента можно разделить на два периода: к первому относятся работы 1956—1959 гг., выполненные в лабораториях Стокгольма, Москвы и Беркли, ко второму — работы в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне (1963—1966 гг.).

Общее, что объединяет все эти работы, — метод синтеза. Получить изотопы 102-го элемента можно было только в ядерных реакциях с участием тяжелых ионов, бомбардируя такими ионами мишени из урана и некоторых трансурановых элементов,

*Ученые социалистических стран, работающие в Дубне, доказали, что все ранние работы по синтезу элемента № 102 были ошибочны. Пользуясь своим правом первооткрывателей они предлагают переименовать этот элемент и назвать его жолотцем — в честь Фредерика Жолио-Кюри (1900—1958) — выдающегося физика, открывшего искусственную радиоактивность, и борца за мир*



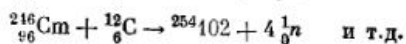
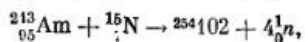
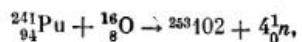
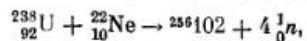
### Разными путями

Вообще говоря, существует несколько способов получения новых элементов. В одном из них используется облучение урана или плутония мощными нейтронными потоками в стационарных или импульсных (взрыв ядерного устройства) условиях. При этом образуются переобогащенные нейтронами изотопы, подверженные бета-распаду. В результате серии таких распадов они превращаются в элементы с большими порядковыми номерами.

Другой метод основан на облучении ближайших тяжелых трансурановых мишеней заряженными частицами. При обстреле ядра протонами его заряд (а следовательно, и номер элемента) может увеличиться на единицу, при бомбардировке ускоренными альфа-частицами — на две. В частности, этим методом был впервые получен менделевий.

И наконец, третий метод заключается в использовании не очень тяжелых мишеней (уран, плутоний, кюрий и др.) и тяжелых бомбардирующих частиц (ионы азота, углерода, неона и других элементов вплоть до ксенона сейчас и до урана в будущем). Реакции с участием тяжелых ионов позволяют увеличить заряд ядра на несколько единиц.

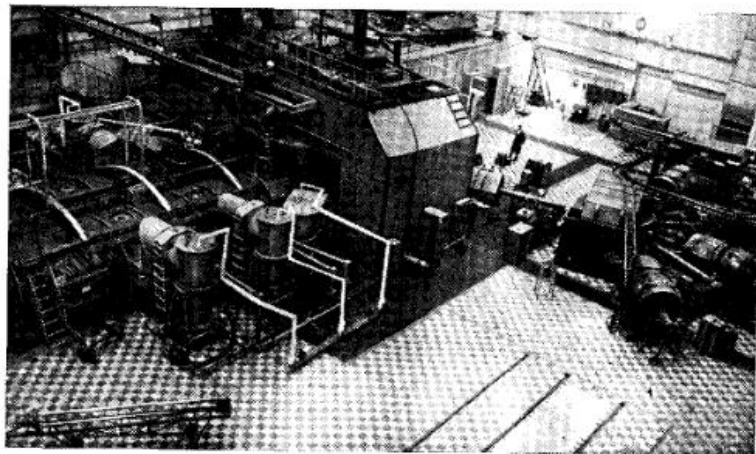
Для синтеза 102-го элемента первый и второй способы непригодны, единственно приемлемым был метод тяжелых ионов. Изотопы 102-го элемента могут образовываться в нескольких реакциях, в таких например:



Проведение подобных реакций, улавливание и регистрация их продуктов связаны с огромными экспериментальными трудностями. Силы электростатического отталкивания между ядрами заставляют увеличивать энергию бомбардирующих частиц до десятков мегаэлектронвольт — иначе ядра не смогут слиться.

Образованные ядра оказываются очень сильно «нагретыми» (энергия их возбуждения достигает нескольких десятков мегаэлектронвольт) и стремятся «остыть», выбрасывая различные частицы. Но новый элемент будет образован лишь в том случае, когда ядро выбросит только нейтроны. Если оно выбросит хоть один протон, новый элемент не удастся зарегистрировать никакими способами: его

Большой дубненский циклотрон У-300, на котором впервые в мире получены химические элементы № 102, 103, 104, 105, 106 и 107



попросту не будет, ведь номер элемента определяется числом протонов в ядре. Этим объясняются исключительные требования, предъявляемые и к мишени, и к пучкам тяжелых ионов. Все это, конечно, крайне усложняет эксперименты, однако много пути синтеза 102-го элемента у физиков не было.

### Два подхода к атому

Трудно получить атомы новых трансуранов, но когда имеешь дело с элементами второй сотни, не легче бывает доказать, что тебе действительно удалось получить их изотопы и какие именно.

Ожидалось, что время жизни изотопов 102-го элемента будет очень малым: в лучшем случае минуты, чаще секунды и доли секунд. Поэтому исследователям не приходилось рассчитывать на традиционный метод химической идентификации этого элемента. Нужны были новые методы — очень быстрые (экспрессные, как говорят исследователи), чувствительные и точные. По-видимому — физические.

Если вспомнить, что элемент есть совокупность атомов, состоящих из ядра и электронных оболочек, то легко понять разницу в химическом и физическом подходах к изучению элемента. Химики изучают электронные оболочки атома, его способность отдавать или присоединять электроны при взаимодействии с другими атомами. Они устанавливают порядковый номер элемента и его место в периодической системе по особенностям строения внешней части атома. Физики определяют то же самое, но исследуют при этом сами ядра и идентифицируют элемент по его ядерным свойствам.

Химические свойства актиноидов (элементов № 90 — 103) настолько близки, что различить их можно только с помощью очень тонких аналитических методов, сравнительно медленных, требующих большого времени, чем периоды полураспада элементов второй сотни.

Химические методы идентификации элементов были приемлемы при синтезе изотопов, жизнь которых измерялась десятками минут и более (а также 104-го и 105-го элементов, которые по химическим свойствам значительно отличаются от соседних). Но для 102-го и 103-го элементов разработка надежных «быстрых» методов химической



идентификации потребовала больших и длительных усилий.

Физические методы позволяют установить заряд ядра и массовое число синтезированного изотопа и изучить его радиоактивные свойства. Они основаны на быстром улавливании ядер — продуктов реакции, на выносе их из зоны облучения и переносе к детекторам излучения для регистрации радиоактивного распада. Эти методы неразрывно связаны с анализом закономерностей ядерных реакций.

Например, при определенных значениях энергии возбуждения из образовавшегося ядра могут «испариться» несколько нейтронов. Каждый нейтрон уносит часть энергии возбуждения — примерно 10–12 Мэв. Для «охлаждения» и относительной стабилизации ядра обычно необходим вылет 4–5 нейтронов. Кривая зависимости выхода ядер нового изотопа (или нового элемента) от энергии налетающих ионов имеет вид колоколообразной кривой: ее вершина соответствует энергии наибольшего выхода ядер, а ширина «колокола» на половине высоты составляет 10–12 Мэв. Эта кривая называется кривой выхода; изучение ее формы дает достаточно оснований для распознавания изотопа. Для проверки применяют так называемые перекрестные облучения, цель которых показать, что исследуемый изотоп появляется только в одной определенной комбинации мишень — частица, при определенной энергии бомбардирующих ионов. Если же условия опыта меняются (замена мишени или частицы, изменение энергии ионов), то этот изотоп не должен регистрироваться.

Но тут важно еще одно обстоятельство: нужно знать, какому виду радиоактивного распада подвержены новые ядра. Физик должен предвидеть, какие продукты образуются при радиоактивном распаде новых ядер, и иметь мужество вносить необходимые поправки в расчеты и в эксперимент, если «улов» окажется не тем, что ожидалось.

Изотопы 102-го элемента, которые могут образоваться в реакциях с тяжелыми ионами, подвержены трем видам радиоактивного распада. Это — альфа-распад, спонтанное деление и захват орбитальных электронов. Первый вид наиболее вероятен.

При альфа-распаде ядро любого изотопа элемента № 102 превращается в ядро одного из изотопов фермия (элемент № 100) и ядро гелия (альфа-частицу). Энергия альфа-частиц при этом будет строго определенной. Следовательно,

зарегистрировать искомое ядро можно двумя способами: либо измерением энергии образовавшихся альфа-частиц ( $E_\alpha$ ) и периода полураспада ( $T_{1/2}$ ), либо наблюдением дочерних продуктов распада — ядер атомов фермия. Однако в первом случае существенной помехой определения будет фон, обусловленный альфа-распадом короткоживущих изотопов других элементов. При этом образуются альфа-частицы, энергия которых близка к энергии альфа-частиц, возникших при распаде ядер 102-го элемента. В частности, «густой» фон появляется, если в материале мишени или других деталей установки, подвергающихся облучению, есть примеси свинца, висмута, ртути. Вероятность фоновых реакций значительно больше (иногда в миллионы раз) вероятности реакции, приводящей к образованию 102-го элемента. Поэтому тщательная очистка вещества мишени от микропримесей свинца и близлежащих элементов и сверхчистые материалы для изготовления установки — обязательные условия чистого опыта по синтезу 102-го элемента.

Помехи и трудности неизбежны и при определении дочерних продуктов альфа-распада ядер 102-го элемента.

К сожалению, многие из перечисленных трудностей и серьезнейшие требования к условиям эксперимента стали очевидными уже после того, как появились первые сообщения об открытии 102-го элемента.

### Первый этап

Первая статья «Получение нового элемента 102» была направлена в редакцию «Physical Review» в июле 1957 г. и опубликована в сентябрьском номере этого журнала. Объединенная американско-англо-шведская группа сообщала об опытах по облучению мишени из смеси изотопов кюрия ( $^{244}\text{Cm} - 95\%$ ,  $^{243}\text{Cm} - 4\%$  и  $^{240}\text{Cm} - 4\%$ ) ионами углерода-12 и углерода-13, ускоренными на циклотроне Нобелевского института физики. Ядра — продукты реакции — вылетали из мишени, получив энергию налетающего иона. Их улавливали на специальную фольгу-сборник, которую потом сжигали на платине. Радиоактивный остаток смывали с платины и подвергали химическому анализу методом ионного обмена. После двенадцати получасовых облучений во фракции, соответствующей элементу № 102, было зарегистрировано около 20 альфа-частиц с энергией  $8,5 \pm$

$\pm 0,1$  Мэв. Период полураспада составлял примерно 10 минут.

Многое в этой статье вызывало недоумение, и прежде всего то, что авторы не смогли точно указать массовое число изотопа (оно определяется суммой протонов и нейтронов в ядре). Объяснялось это двумя причинами. Во-первых, не удалось выяснить зависимость выхода продукта от энергии ионов из-за неопределенности этой характеристики потока. Вторая причина — довольно сложный изотопный состав мишеней.

Сомнение в правильности выводов вызывал и тот факт, что эффект, приписанный элементу № 102, наблюдался лишь на трех из шести использованных мишеней, да и эти три мишени не давали эффекта после трех недель работы. Почему — непонятно. В чистом опыте так быть не должно.

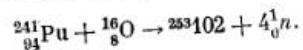
Настораживала и большая величина сечения реакции (большой выход нового излучателя), поскольку пучки ионов были маломощными (0,03–0,1 мка). Но особенно сомнительным было большое время жизни изотопа — период полураспада около 10 минут. Тем не менее авторы работы заявили об открытии элемента № 102 и предложили назвать его nobelium (символ No) в честь Альфреда Нобеля.

Не прошло и года, как американские ученые из Беркли опубликовали статью «Попытки подтвердить существование десятиминутного изотопа элемента 102», в которой сообщили о безуспешных поисках долгоживущей активности с указанными в Стокгольме свойствами. Эта работа была выполнена очень тщательно и более точно, чем в Швеции. Использовались кюриевые мишени того же изотопного состава, те же самые ионы  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$ , однако интенсивность пучка была больше, а энергетический спектр пучка был монохроматическим (т. е. пучок состоял из строго одинаковых по энергии ионов).

Выход всех изотопов более легких элементов в этом эксперименте оказался гораздо больше, чем в стокгольмском, но активность, приписанная элементу № 102, не наблюдалась...

Примерно в то же время, что и в Швеции, в Москве также были проведены опыты по синтезу короткоживущих изотопов 102-го элемента. Для получения нового элемента изотопы плутония  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{239}\text{Pu}$  облучали ионами кислорода-16 с энергией около 100 Мэв. Изучался альфа-распад

продуктов ядерных реакций классическим методом ядерных фотоэмульсий. В спектре альфа-частиц наряду с группами, обусловленными распадом известных элементов, была отмечена группа с энергией  $8,9 \pm 0,4$  Мэв. Было показано, что период полураспада этого изотопа меньше 40, но больше 2 секунд. На основании теоретических оценок предполагалось, что наиболее вероятно реакция с «испарением» четырех нейтронов:



Через несколько месяцев в Беркли были поставлены опыты по синтезу еще одного изотопа —  $^{254}_{102}$ . Американские физики бомбардировали мишени из кюрия-246 ионами углерода-12. Они установили, что период полураспада изотопа  $^{254}_{102}$  близок к 3 секундам, а энергия альфа-частиц равна 8,3 Мэв. В опубликованной ими статье указывалось также, что ядра изотопа  $^{254}_{102}$  испытывают спонтанное деление примерно в 30 случаях из 100.

Для идентификации  $^{254}_{102}$  авторы разработали оригинальный метод, которым доказывалось, что дочерние ядра фермий-250 с хорошо известными свойствами могут появляться на вторичном сборнике ядер отдачи только в результате альфа-распада изотопа  $^{254}_{102}$ . А фермий-250 регистрировали химическими методами.

О синтезе еще одного изотопа —  $^{255}_{102}$  та же группа сообщила в 1961 г. Главные характеристики этого изотопа: период полураспада — 15 секунд, энергия альфа-частиц — 8,2 Мэв.

На этом по существу и закончился первый этап истории 102-го элемента. Началом второго этапа стал пуск большого циклотрона многозарядных ионов в Дубне. Это произошло в начале 1961 г. Тогда же была намечена программа получения на этом ускорителе многих неизвестных изотопов трансурановых элементов начиная от 99-го и далее. Но прежде чем приступить к новым синтезам, сотрудники Объединенного института ядерных исследований провели большую серию опытов по изучению закономерностей образования трансурановых элементов в ядерных реакциях, создали экспрессные методы физической идентификации короткоживущих новых изотопов, разработали детекторы альфа-излучения с очень хорошими характеристиками. Эти работы заняли почти три года.

## Второй этап

В 1963 г. сотрудникам Лаборатории ядерных реакций удалось синтезировать наиболее тяжелый в то время изотоп 102-го элемента —  $^{256}102$ . Его получили в результате бомбардировки мишени из урана-238 ионами неона-22 с энергией 112 Мэв. Были изучены два вида радиоактивного распада этого изотопа — альфа-распад и спонтанное деление. Оказалось, что время жизни изотопа  $^{256}102$  составляет около 4 секунд, доля спонтанного деления — всего 0,5%.

Результаты этих экспериментов сильно расходились с теоретическими оценками, основанными на данных американских ученых о свойствах изотопа  $^{254}102$  (синтез 1958 г. в Беркли).

В связи с этим было решено еще раз экспериментально проверить свойства изотопов  $^{254}102$  и  $^{256}102$  двумя методами. В одном из них свойства изотопов определяли по характеристикам альфа-частиц, в другом — по дочерним ядрам. Результаты экспериментов с изотопом  $^{256}102$  оказались такими же, как раньше. Но в другой серии опытов экспериментаторы с удивлением обнаружили, что изотоп  $^{254}102$  обладает свойствами, сильно отличающимися от указанных калифорнийской группой. Выяснилось, что этот изотоп живет не 3, а 65 секунд; энергия альфа-частиц, образующихся при распаде его ядер, составляет не 8,3, а 8,11 Мэв; и наконец, спонтанное деление он испытывает не в 30% случаев, а примерно в одном случае из 1800. А ведь эти результаты казались самыми достоверными!

Стало ясно, что необходимо повторить опыты по синтезу и изучению свойств других изотопов элемента № 102. Эти опыты и были поставлены в Дубне в 1965—1966 гг.

Здесь необходимо упомянуть о том, что за годы, прошедшие после первых работ по синтезу элемента № 102, ядерная физика ушла далеко вперед. Да и техника эксперимента совершенствовалась все эти годы. Поэтому тем, кто начинал исследования в 60-х годах, много было и понятнее, и доступнее, чем участникам работ 1956—1958 гг.

Сравнить данные, полученные в Дубне, с результатами первых синтезов вы можете, ознакомившись с приведенной здесь таблицей. (Желая подчеркнуть какое-то важное различие, иногда говорят, будто бы по примеру одесситов, «две большие разницы». В нашей таблице «больших раз-

Массовое число изотопа	Реакция синтеза	Период полураспада, сек	Энергия $\alpha$ -частиц, Мэв	Доля спонтанного деления по отношению к $\alpha$ -распаду	Место и год открытия
251	$^{239}\text{Pu}(^{16}\text{O}, 4n)^*$	0,5—1,0	8,6		Дубна, 1967
252	$^{244}\text{Cm}(^{13}\text{C}, 5n)$	$0,8 \pm 0,3$	8,6		Беркли, 1967
253	$^{239}\text{Pu}(^{18}\text{O}, 5n)$	$4,5 \pm 1,5$	8,41		Дубна, 1966
254	$^{239}\text{Pu}(^{16}\text{O}, 4n)$	$95 \pm 10$	8,01		»
254	$^{243}\text{Am}(^{12}\text{N}, 4n)$	$65 \pm 10$	8,11	1/1800	Дубна, 1963—1966
254	$^{242}\text{Pu}(^{16}\text{O}, 4n)$				
255	$^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 6n)$	$180 \pm 10$	8,09		Дубна, 1966
255	$^{242}\text{Pu}(^{18}\text{O}, 5n)$				
256	$^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 4n)$	$3,7 \pm 0,5$	8,42	1/200	Дубна, 1963
256	$^{242}\text{Pu}(^{18}\text{O}, 4n)$				
257	$^{248}\text{Cm}(^{12}\text{C}, 3n)$	$23 \pm 2$	8,23 (50%) 8,27 (50%)		Беркли, 1967
258	$^{248}\text{Cm}(^{13}\text{C}, 3n)$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	—	100%	Беркли, 1968
259	$^{248}\text{Cm}(^{18}\text{O}, \alpha, 3n)$	$1,5 \pm 0,5$ часа	7,5	20%	Ок-Ридж, 1970

\* В скобках указаны бомбардирующие ионы и количество нейтронов, вылетающих из составного ядра. Такая запись ядерных реакций принята в физике.

ниц» уже не две, а четыре.) Сравнение данных показывает, что практически во всех ранних работах были допущены большие или меньшие ошибки.

Группа, работавшая в Нобелевском институте, считала, что, скорее всего, ею был получен изотоп  $^{253}102$  (период полураспада  $T_{1/2}$  равен примерно 10 минутам и энергия альфа-частиц  $E_\alpha$  около 8,5 Мэв). Оказалось, что  $T_{1/2}$  этого изотопа составляет всего 95 секунд, а  $E_\alpha$  — 8,01 Мэв. Тогда стали поговаривать о изотопе  $^{251}102$ . Но в 1967 г. в Дубне и Беркли смогли получить и этот изотоп. Период полураспада его ядер оказался  $0,8 \pm 0,3$  секунды,  $E_\alpha$  — 8,6 Мэв. Опять не сходились концы с концами...

Московский синтез 1958 г. Изотоп  $^{253}102$ ;  $T_{1/2} = 2-40$  секунд,  $E_\alpha = 8,9$  Мэв. Эти цифры тоже отличаются от результатов проверочных экспериментов. Правда, когда в



1966 г. в Дубне был получен более легкий изотоп —  $^{252}\text{102}$ , оказалось, что его характеристики ( $T_{1/2}=4,5$  секунды,  $E_{\alpha}=8,4$  Мэв) близки к указанным в московской работе. Вполне вероятно, что в 1958 г. в Институте атомной энергии были действительно получены первые атомы элемента № 102, но уровень техники того времени не позволил точно определить массовое число и энергию альфа-распада изотопа. О разнице в характеристиках калифорнийского изотопа  $^{254}\text{102}$  рассказывалось выше.

В 1961 г. в Беркли был получен изотоп  $^{255}\text{102}$ , и этот эксперимент был воспроизведен в Дубне. И здесь выяснилась разница в характеристиках. По американским данным, период полураспада ядер  $^{255}\text{102}$  составил примерно 15 секунд, а  $E_{\alpha}=8,2$  Мэв. В Дубне были получены совсем другие цифры:  $T_{1/2}=3$  минуты,  $E_{\alpha}=8,09$  Мэв.

Пятый изотоп —  $^{256}\text{102}$  был впервые получен в Дубне.

Естественно, может возникнуть вопрос: насколько точны новые данные? Ответ: советские ученые не абсолютизируют свои результаты, не выдают их за истину в последней инстанции. Но достоверность этих результатов, бесспорно, намного больше, чем результатов первых работ. К началу новых синтезов в реакторах были накоплены достаточные количества изотопов плутония и америция, необходимых для изготовления высококачественных мишеней. Прецизионные детекторы альфа-излучения и экспрессные методы физической идентификации изотопов, которыми мы располагали, были разработаны уже после окончания ранних работ. Все это позволило делать выводы на основании наблюдения уже не десятков, а сотен и тысяч атомов.

Наконец, участники дубненской работы лучше знали закономерности образования новых ядер в реакциях с тяжелыми ионами, чем ученые, ставившие свои опыты в конце 50-х годов. Для ядерной физики пять — семь лет — срок немалый.

О результатах работ по синтезу и исследованию в Дубне пяти изотопов элемента № 102 впервые было сообщено на Международной конференции по физике тяжелых ионов в октябре 1966 г. А в декабре из Америки пришли первые сообщения о точном воспроизведении этих результатов.

Позже (в 1967—1970 гг.) в США, в лабораториях Беркли и Ок-Риджа, были получены еще три изотопа элемента № 102 с массовыми числами 257, 258 и 259. Последний

изотоп оказался не только самым тяжелым, но и самым долгоживущим: его период полураспада  $1,5\pm 0,5$  часа.

Коротко о химии элемента № 102. Первые опыты по химии этого элемента были предприняты в Дубне в 1967 г. Методом фронтальной хроматографии определялись свойства соединения элемента № 102 с хлором. Использовали ту же установку, что и для первых опытов по химии 104-го элемента (она подробно описана в статье «Курчатовий»). О свойствах хлорида (или хлоридов) 102-го элемента судили по распределению в хроматографической колонке фермия-252 — дочернего продукта изотопа  $^{258}\text{102}$ .

Опыты показали, что элемент № 102 образует нелетучий хлорид. Его фронт двигался по колонке очень медленно, подобно фронту фермия, кюрия и прочих типичных представителей семейства актиноидов. В тех же опытах, первых опытах по химии 102-го элемента, было установлено, что степень окисления этого элемента хлором не выше III.

Позже опыты по химии 102-го элемента проводились и в Калифорнийском университете. Здесь работали со сравнительно долгоживущим изотопом  $^{256}\text{102}$ . Американские химики установили, что в водных растворах наиболее устойчиво валентное состояние  $2+$  и что окисление до состояния выше  $3+$  крайне сложно.

Вот, пожалуй, и все, что известно сейчас о химии элемента № 102. Оттого ядерно-физические характеристики его изотопов остаются главными «показателями» при синтезе и исследовании этого элемента.

Тот факт, что во всех ранних работах по 102-му элементу были допущены неточности и ошибки, теперь абсолютно бесспорен, и есть все основания считать элемент № 102 открытием ученых социалистических стран, работающих в Объединенном институте ядерных исследований. Им и принадлежит право дать имя этому элементу. От нобелия, как шутят физики, остался только символ, а No по-английски означает «нет»...

По этой причине физики из Дубны предлагали переименовать 102-й элемент и назвать его в честь Фредерика Жолио-Кюри жолотием. Однако Международный союз теоретической и прикладной химии (IUPAC) пока сохранил старое название.

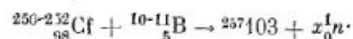
## ЛОУРЕНСИЙ



Элемент № 103 — последний актиноид. Последний — и самый труднодоступный. И наименее изученный. Самый долгоживущий изотоп этого элемента  $^{260}103$  имеет период полураспада  $3 \pm 0,5$  минуты.

Первое сообщение об этом элементе пришло из Беркли в 1961 г. В нем говорилось, что при облучении калифорниевой мишени ионами бора наблюдалась слабая альфа-активность с энергией 8,6 Мэв и периодом полураспада  $8 \pm 2$  секунды. В работе приводился альфа-спектр, полученный при одном из многочисленных облучений. На спектре видна линия 8,6 Мэв, состоящая всего из 10–15 импульсов.

Существенно, что калифорниевая мишень (всего 3 мкг калифорния) не была моноизотопной. В «Радиохимическом словаре элементов», составленном известными французскими радиохимиками М. Гайсинским и Ж. Адлювым (1965 г.), приведено уравнение ядерной реакции, по которой получали новый элемент:



Как видим, уравнение не отличается определенностью, но даже не это главное. В любой работе, цель которой получение нового радиоактивного элемента, самое важное и сложное — доказать, что обнаруженная активность обусловлена конкретным изотопом конкретного элемента. Для этого существует несколько хорошо зарекомендовавших себя методов: изучение зависимости эффекта от энергии бомбардирующих ионов; изучение продуктов распада новой активности; измерение углов вылета изучаемых ядер по отношению к направлению пучка бомбардирующих ионов...

В работе 1961 г. изучалась лишь зависимость выхода излучателя от энергии ионов бора. Эта зависимость оказалась такой, что она скорее отрицала, чем подтверждала предположение о том, что наблюдаемая активность принадлежит 103-му элементу.

Может быть, строгое доказательство образования атомов 103-го элемента дала химическая идентификация? Ничуть

В честь Эрнеста Резерфорда (1871–1937) — одного из основоположников ядерной физики, — учения о радиоактивности и строении атома — предлагают назвать элемент № 103 ученые Дубны. Резерфорд первым доказал возможность взаимопревращения элементов в ядерных реакциях, ввел в физику понятие о протоне и т. д.



не бывало. В цитированном уже «Радиохимическом словаре элементов», авторов которого никак не заподозришь в предвзятости, черным по белому написано: «Химическую идентификацию провести не удалось». Тем не менее мир был широко оповещен, что в Беркли получен новый, 103-й элемент, названный лоуренсием — в честь изобретателя циклотрона, американского физика Эрнеста Лоуренса.

В Дубне элементом № 103 начали заниматься лишь через четыре года после появления этой первой и, прямо скажем, не слишком убедительной публикации. При облучении америция-243 ионами кислорода-18 получили изотоп  $^{256}103$  с периодом полураспада  $35 \pm 10$  секунд. В 1966–1967 гг. были более детально изучены его радиоактивные характеристики, в частности сложный спектр альфа-излучения с энергией от 8,35 до 8,60 Мэв и ярко выраженным максимумом вблизи 8,42 Мэв. Затем были предприняты попытки получить и изотоп с массовым числом 257, описанный в работе 1961 г. Однако обнаружить изотоп 103-го элемента с периодом полураспада около 8 секунд и энергией альфа-частиц 8,6 Мэв так и не удалось ни в одной ядерной реакции, которая бы могла привести к образованию изотопа  $^{257}103$ .

Массовое число изотопа	Реакция синтеза	Период полураспада, сек	Энергия, $\alpha$ -частиц, Мэв	Место и год открытия
255	$^{243}\text{Am}(^{18}\text{O}, 4n)$	20	8,38	Дубна, 1969
	$^{240}\text{C}:(^{10,11}\text{B}, 4-5n)$	$22 \pm 5$	$8,37 \pm 0,02$	Беркли, 1971
256	$^{243}\text{Am}(^{18}\text{O}, 5n)$	$35 \pm 10$	$8,35 \pm 8,6$	Дубна, 1965—1966
	$^{249}\text{C}:(^{11}\text{B}, 4n)$	$31 \pm 3$	(8,42 max)	Беркли, 1971
257	$^{249}\text{C}:(^{11}\text{B}, 3n)$	$0,6 \pm 0,1$	$8,87 \pm 0,02$	»
258	$^{249}\text{Cf}(^{15}\text{N}, \alpha, 2n)$	$4,2 \pm 0,6$	$8,62 \pm 0,02$	»
	$^{248}\text{Cm}(^{15}\text{N}, 5n)$			
259	$^{248}\text{Cm}(^{15}\text{N}, 4n)$	$5,4 \pm 0,8$	$8,45 \pm 0,02$	»
260	$^{249}\text{Bk}(^{18}\text{O}, \alpha, 3n)$	$180 \pm 30$	$8,63 \pm 0,02$	»

Узнав об этих результатах, физики из Беркли «провели ревизию своих данных». Было заявлено, что если 8 секунд живет не изотоп  $^{257}\text{103}$ , то, значит, образовывался другой изотоп этого элемента — с массовым числом 258 или 259.

Это, конечно, верно:  $98+5=103$ , при слиянии ядер элементов № 5 и 98 составное ядро со 103 протонами просто обязано образоваться. Но образовывались ли такие ядра в берклиевских опытах 1961 г.?

Очень может быть, что образовывались. Но доказательств тому, если не считать арифметики, явно недостаточно. Наблюдали какую-то неизвестную прежде активность, но реальных оснований приписывать ее элементу № 103, прямо скажем, маловато...

Лишь в 1971 г. в журнале «Physical Review» появилась статья о синтезе в Беркли сразу нескольких изотопов 103-го элемента. Результаты этой работы не вызывают сомнений. Кстати, в ней полностью подтверждаются полученные в Дубне сведения об изотопе  $^{256}\text{103}$ . Свойства же изотопа  $^{257}\text{103}$  оказались совсем иными, чем приписанные ему в 1961 г.: период полураспада не 8, а  $0,6 \pm 0,1$  секунды, энергия альфа-частиц  $8,37 \pm 0,02$  Мэв вместо 8,6.

Поэтому не должно удивлять, что авторы работы, выполненной в Дубне в 1965 г., с полным правом считают себя первооткрывателями элемента № 103. Они ставили перед IUPAC вопрос о переименовании 103-го элемента в резерфордий. Это предложение пока не принято.

И в заключение несколько слов о химии элемента № 103.

Первые химические эксперименты с несколькими сотнями таких атомов радиохимики Дубны провели в 1968 г. Физики получали изотоп  $^{256}\text{103}$ , атомы которого хлорировали в специальной колонке, и по дочерним (а на этот раз и «внучатым») продуктам судили о летучести образовавшегося хлорида. Летучесть, как и в случае с элементом № 102, оказалась минимальной. Так было определено, что элемент № 103 — последний актиноид.

Спустя два года американские радиохимики установили, что в водных растворах устойчивое окислительное состояние элемента № 103—3+. Тем самым были подтверждены еще раз предположения теоретиков о четырнадцати радиоактивных элементах-аналогах.

Новые сведения о последнем из актиноидов появляются довольно редко. Правда, в 1981 г. в ФРГ на новом ускорителе UNILAC в Дормштадте было получено и исследовано несколько новых изотопов трансурановых элементов. Среди них оказался и изотоп элемента № 103 с массовым числом 254 и периодом полураспада 2,4 секунды. Будучи сам продуктом альфа-распада 105-го элемента, этот новый изотоп тоже предпочитает испускать альфа-частицы, а не делиться на осколки.

Вот так, с интервалом в годы и десятилетия постепенно пополняется копилка наших знаний о последнем из актиноидов.

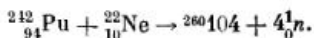


## КУРЧАТОВИЙ



104-й элемент был впервые синтезирован в Дубне в 1964 г. Его получила группа ученых Лаборатории ядерных реакций во главе с Г. Н. Флеровым.

Для синтеза элемента № 104 в циклотроне Объединенного института ядерных исследований была выбрана реакция



Математически все очень просто, но полное слияние ядер плутония и неона с последующим распадом ядра  ${}^{264}_{104}$  на изотоп  ${}^{260}_{104}$  и четыре нейтрона происходит только в одном из нескольких миллиардов случаев.

Почему так редко?

### Коротко о физике

Далеко не все ядра неона взаимодействуют и сливаются с ядрами плутония. Но даже если слияние произошло, то образовавшееся новое ядро оказывается сильно возбужденным. Из-за этого возбуждения оно не может сохранить свою начальную массу ( $22+242=264$ ), а обязательно освобождается от избытка энергии, главным образом путем деления на два ядра примерно равной массы или, реже, выбрасывая альфа-частицы, нейтроны, протоны.

Ядра 104-го элемента получают только в том случае, если после полного слияния ядер неона и плутония новое ядро выбрасывает одни нейтроны; а чтобы получить изотоп с массовым числом 260, образовавшееся ядро должно выбросить четыре нейтрона — не больше и не меньше.

Почему стремились получить именно этот изотоп?

В его ядре — четное число протонов и четное число нейтронов. Поэтому вероятность спонтанного деления таких ядер очень велика. Подавляющее большинство изотопов, которые могут образоваться в этих условиях, напротив, подвержено альфа-распаду. Значит, именно продукты спонтанного деления будут самыми заметными «вещественными доказательствами» образования 104-го элемента.

Понадобился детектор, который фиксировал бы осколки

спонтанного деления и никак не реагировал на прочие частицы. Такой детектор был найден. Материалами для него стали очень известные, обыкновенные вещества, в первую очередь стекло и слюда. На их поверхности не оставляли следа легкие частицы — мала масса, не оставляли и тяжелые с малой энергией. А «золотая середина» (и по массе и по энергии) — продукты спонтанного деления оставляли на поверхности этих материалов невидимые следы — микрообласти с пониженной химической стойкостью. В травящем растворе эти области быстро разрушаются, на их месте образуются различные в обычный оптический микроскоп миниатюрные кратеры.

В ходе многочисленных экспериментов была определена оптимальная энергия бомбардирующих частиц — та, при которой возможно образование наибольшего числа атомов 104-го элемента. Оказалось, что наиболее эффективен обстрел плутониевых мишеней ионами неона-22 с энергией около 115 Мэв. Но и в этих условиях за 6 часов облучения регистрировался всего один акт спонтанного деления. В заключительном эксперименте, проведенном летом 1964 г., было зарегистрировано около 150 ядер нового элемента. Эксперимент длился больше 1000 часов.

После того как была проведена физическая идентификация нового элемента, центр тяжести исследований переместился в группу химиков.

В повторных экспериментах 1969 г. был уточнен период полураспада  ${}^{260}_{104}$ , оказавшийся равным 0,08 секунды, и обнаружено спонтанное деление другого, более легко-

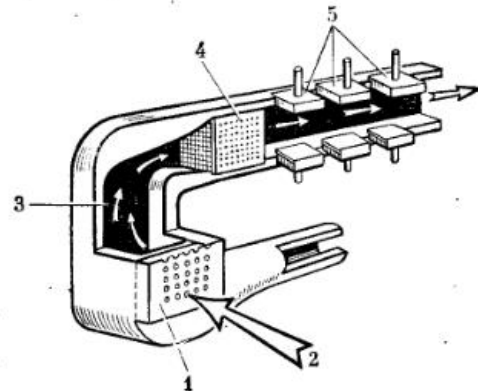


Схема установки для экспрессного разделения короткоживущих изотопов  
1 — мишень; 2 — пучок ускоренных ионов; 3 — газовый тракт; 4 — ловушка для твердых частиц; 5 — детекторы



Элемент № 104, открытый в Дубне в 1964 г., назван курчатовием — в честь выдающегося советского физика и организатора науки трижды Героя Социалистического Труда академика Игоря Васильевича Курчатова (1903—1960)

го изотопа  $^{259}104$ , который образуется одновременно с  $^{260}104$ , но за счет реакции с испарением пяти нейтронов. Всего сейчас получено 9 изотопов элемента № 104.

### На подступах к химии

Почему ученые из Дубны стремились получить именно 104-й элемент? В то время, когда начиналась эта работа, элемент № 103 еще не был синтезирован, но от 104-го ждали резкого отличия от соседних элементов по химическим свойствам. Однако уместен ли здесь разговор о химических свойствах? По мере увеличения массового числа время жизни тяжелых искусственных элементов катастрофически убывает. Химическую идентификацию двух предыдущих элементов сразу провести не удалось прежде всего из-за коротких периодов полураспада. К тому же и количество полученных ядер оказалось очень незначительным — на учете был каждый атом.

Со 104-м дело обстоит еще сложнее. Даже самые оптимистические прогнозы американских ученых предсказывали ему совсем недолгую жизнь — период полураспада порядка сотых долей секунды. Однако по данным первых опытов он оказался намного большим —  $0,3 \pm 0,1$  секунды. Но и это время слишком мало для того, чтобы существую-

щими химическими методами доказать общность свойств нового элемента и какого-либо из «старых». А сделать это было необходимо потому, что выяснение места элемента № 104 в таблице Менделеева не только окончательно подтверждало открытие физиков, но углубляло и конкретизировало современные взгляды на развитие периодической системы.

Согласно актиноидной теории Сиборга, элемент № 103 — последний актиноид. Значит, место 104-го вновь в основной части менделеевской таблицы, под гафнием. Менделеев, вероятно, назвал бы его экагафнием. Доказать идентичность химических свойств 104-го элемента и гафния значило ответить на один из ключевых вопросов современной теоретической химии.

Поэтому еще в 1960 г., когда физики Объединенного института ядерных исследований только готовились к синтезу 104-го, руководитель работы Георгий Николаевич Флеров поручил молодому чехословацкому химику, недавнему выпускнику Московского университета Иво Зваре разработку ультраэкспрессного метода химической идентификации будущего элемента.

Идею химической идентификации 104-го элемента поддержал профессор Московского университета Андрей Николаевич Несмеянов. На одном из симпозиумов Лаборатории ядерных реакций (еще задолго до синтеза 104-го) он высказал мысль, что, несмотря на колоссальные трудности, которые поставит перед химиками краткость жизни нового элемента, возможно, удастся доказать его принадлежность к IV группе и создать новый метод разделения элементов III и IV групп периодической системы.

### Эксперименты химиков: часть первая

Разработка ультраэкспрессного метода разделения элементов III и IV групп (побочных подгрупп) таблицы Менделеева была первой стадией работы радиохимиков. Прежде всего нужно было решить проблему скорости: предстояло сначала получить, а затем разделить однотипные соединения этих элементов. И все — за доли секунды.

За основу была взята разница в свойствах высших хлоридов элементов III и IV групп. При температуре около  $250^\circ\text{C}$  хлориды гафния и его аналогов переходят в газообразное состояние, а хлориды элементов III группы, в том

числе лантаноидов, остаются твердыми. Значит, в этих условиях разделение их технически возможно, нужно лишь найти хорошую конструкцию прибора. После отделения примесей четыреххлористый гафний остается в газообразном состоянии, поэтому его можно быстро отнести к месту анализа. Вот, пожалуй, и весь запас сведений, которыми располагали радиохимики перед началом работы.

Ни в одной книге, ни в одной научной статье не было описания метода, который позволял бы провести химическую идентификацию какого-либо элемента за доли секунды.

Примерно через три года после начала работы были созданы и метод и прибор для ультраэкспрессного разделения хлоридов. Первый пазвали методом «газовой химии», второй — газовым пробником. («Пробник» — слово из профессионального жаргона физиков-атомников; так называют они все устройства, которые позволяют проводить эксперименты в камере циклотрона.)

Хотя создание метода имело и самостоятельное научное значение, И. Звара и его товарищи рассматривали опыты, выполненные в этой части работы, как модели будущих опытов со 104-м. (Правда, конечная цель почти не фигурировала в научных статьях, написанных ими в то время; о ней если и упоминалось, то лишь в самом конце, одной-двумя фразами. Ученых нетрудно понять: еще не было доказательств того, что 104-й элемент — аналог гафния. Была только гипотеза, которую хотелось подтвердить.)

...Итоги были подведены статьей, направленной авторами нового метода в журнал «Радиохимия». Статья называлась «Применение газообразных галогенидов для быстрого разделения продуктов ядерных реакций». Вот ее аннотация:

«Изучалось поведение атомов отдачи, заторможенных в газовой среде, при транспорте газовым потоком в присутствии паров  $ZrCl_4$  и  $NbCl_5$  («носителей»). Атомы V, Sn, Nb и Hf эффективно транспортируются, в то время как атомы Na, Sc и лантаноидных элементов осаждаются на стенках газового тракта. С использованием полученных данных на установке, работающей с продуктами ядерных реакций, вызываемых ускоренными тяжелыми ионами, осуществлено непрерывное количественное выделение изотопов Hf из продуктов реакции. Коэффициент очистки от Na, Sc и



Группа ученых из Дубны, удостоенных Ленинской премии за синтез и исследование элементов второй сотни. Слева направо: академик Г. Н. Флеров, член-корреспондент Чехословацкой академии наук доктор химических наук И. Звара, доктор физико-математических наук В. А. Друин

La достигал значения  $\geq 100$ . Время от момента образования атома Hf, затрачиваемое на очистку и транспорт к детектору излучения, составляет по прямым измерениям  $\leq 0,4$  секунды». Поясним термины, фигурирующие в аннотации, и суть сделанного химиками.

«Атомы отдачи». Это атомы образовавшегося изотопа, вылетающие из мишени при обстреле ее пучком нейтронов или многозарядных ионов. В модельных опытах применялись мишени из окислов разных элементов в зависимости от того, какие атомы отдачи нужно было получить. Мишени наносились на алюминиевую подложку. Короткоживущие изотопы гафния  $^{170}\text{Hf}$  и  $^{171}\text{Hf}$  получены при облучении ионами неона естественной смеси изотопов самария.

В процессе облучения наряду с  $^{170}\text{Hf}$  и  $^{171}\text{Hf}$  образовывались другие изотопы, в том числе изотопы лантаноидов. Их тоже превращали в хлориды и почти полностью отделяли от изотопов гафния — «коэффициент очистки достигал значения  $\geq 100$ ». (Это значит, что количество примесей уменьшалось более чем в 100 раз.) При работе с плутониевой мишенью, когда вместо гафния и лантаноидов атомами отдачи будут атомы 104-го элемента и актиноидов, должно происходить то же самое!

«Газовый поток». Соединения изотопов, живущих считанные секунды, а то и доли секунды, можно исследовать только в газовой фазе. Любимая химиками работа с распадающимися тут исключена: не успеешь оглянуться (не то что



перемешать раствор) — объект исследования исчез. А газовому потоку можно придать непрерывное движение с большой скоростью. Скорости реакций, идущих в нем, также могут быть очень велики.

Функции газового потока двойки: он и участник реакции, и переносчик образующихся соединений к детекторам — регистраторам распада необычных атомов. Поэтому в состав газового потока входит несколько компонентов различного назначения. Количественно преобладает инертный компонент — азот, атомы которого принимают избыток энергии атомов отдачи.

Другой компонент газового потока — хлорирующий агент. В большинстве модельных опытов им были пары  $ZrCl_4$  и  $NbCl_5$ , которые одновременно выполняли функции носителя. Носитель должен не только связать атомы отдачи в химические соединения, но и донести эти считающиеся молекулы до детектора. В условиях опыта (температура  $250^\circ C$ , давление 0,2 мм ртутного столба) эти соли находятся в газообразном состоянии.

Носители транспортируют далеко не все атомы. Пары  $ZrCl_4$  и  $NbCl_5$  переносили к детекторам хлориды гафния, ниобия, ванадия и олова. А хлориды других элементов, в том числе трехвалентных лантаноидов, осаждались на стенках газового тракта и в специальной ловушке.

«Газовый тракт» — это изолированное пространство, в котором, собственно, происходят все химические преобразования атомов отдачи и их соединений. Начинается тракт сразу за мишенью, кончается — у детекторов.

Время от момента образования атома гафния до его попадания в детектор излучения — не больше четырех десятых секунды — в общем устраивало химиков: уже знали, что период полураспада изотопа  $^{260}104$  — величина порядка десятой доли секунды. Химики должны были успеть!

### Эксперименты химиков: часть вторая

К началу 1965 г. химики создали метод, при помощи которого можно было доказать идентичность химических свойств гафния и 104-го элемента. Физики, со своей стороны, научились получать атомы этого элемента десятками (а этого количества вполне достаточно для исследования) и регистрировать каждый из них. Настало время решающих опытов по химической идентификации 104-го.

Если он аналог гафния, то его тетрахлорид должен быть примерно таким же устойчивым и летучим соединением, как  $NiCl_4$ . Ядра 104-го, связанные в молекулы газообразного тетрахлорида, должны пройти через весь тракт газового пробника, и через десятые доли секунды после образования каждого ядра детекторы спонтанного деления, расположенные в конце тракта, должны зафиксировать его осколки.

Если же 104-й не экагафний, детекторы не зарегистрируют ничего: образовавшиеся атомы не смогут до них добраться, химическая идентификация 104-го элемента методом носителей в газовой фазе окажется невозможной.

В газовом пробнике заменили самариевую мишень на плутониевую, в конце тракта установили детекторы спонтанного деления. Через несколько дней видоизмененный газовый пробник впервые въехал в циклотрон...

Атомы 104-го образуются не часто — опыты должны были идти долго и обязательно непрерывно: кто знает, в какой момент образуются эти атомы? В общей сложности химики провели четырнадцать экспериментов на циклотроне, в ходе которых было зарегистрировано четыре осколка спонтанного деления ядер 104-го. Это в двадцать раз меньше, чем ожидалось. В чем причина?

Проверили все расчеты — ошибки нет. Значит, нужно менять температурный режим. Температура в газовом пробнике была доведена до  $350^\circ C$ . Начата новая серия экспериментов. В ходе этой серии детекторы регистрировали восемь атомов 104-го элемента — экспериментаторы рассчитывали на шесть — десять.

После этого можно было делать выводы. Главные из них таковы. Химическим методом подтверждено открытие физиками Объединенного института ядерных исследований нового сверхтяжелого элемента № 104. Его изотоп с массовым числом 260 подвержен спонтанному делению. 104-й элемент — химический аналог гафния. Это первый тяжелый искусственный элемент, не входящий в семейство актиноидов.

### Вне циклотрона и пробника

26 марта 1966 г. был закончен последний химический опыт на циклотроне, а через три дня на кафедре радиохимии Московского университета состоялась защита кан-

дидатской диссертации на тему «Использование газообразных соединений для экспрессного непрерывного разделения продуктов ядерных реакций».

Известный физикохимик, ныне академик В. И. Гольданский внес предложение: рекомендовать кандидатскую диссертацию Иво Звары к рассмотрению на ученом совете факультета на предмет присуждения ему ученой степени доктора химических наук. Это предложение было принято, и 17 июня Иво Зваре пришлось «защищаться» вторично. А шестнадцать днями раньше он докладывал об этой работе на заседании ученого совета Объединенного института ядерных исследований. Здесь же обсуждался вопрос о том, как назвать элемент № 104. Создатели элемента предложили назвать его курчатовием — в честь выдающегося советского физика Игоря Васильевича Курчатова. Ученый совет единогласно поддержал это предложение.

На этом хотелось бы поставить точку, как в романе со счастливым концом, но, оказалось, точку ставить рано.

Открытие 104-го элемента в Дубне было поставлено под сомнение американскими исследователями. Почему? Прежде всего потому, что период полураспада изотопа  $^{260}\text{Ku}$  по спонтанному делению (первоначально он был определен в 0,3 секунды, позже уточнен как величина, около 0,1 секунды) оказался несравненно больше, чем предсказывали американские теоретики.

И еще можно допустить, что существует генетическая связь между неверием американцев в курчатовий и уничтожающей, в общем-то, критикой учеными Дубны американских работ по нобелию и лоуренсию... Чем было подкреплено неверие, чем аргументирована критика американцев? В 1969—1970 гг. в Беркли начали изучать альфа-распад изотопов элемента № 104. Появились сообщения о получении трех изотопов 104-го, в том числе относительно долгоживущего изотопа  $^{259}\text{104}$  (его период полураспада 4,5 секунды). Была предпринята попытка получить и спонтанно делящийся изотоп  $^{260}\text{104}$  при бомбардировке кюрия ионами кислорода ( $96+8=94+10=104$ ). И вот что доложил доктор Гиорсо на конференции по трансуроновым элементам в Хьюстоне (1969 г.)

«На прошлой неделе мы облучили мишень из кюрия ионами кислорода... в надежде найти спонтанно делящуюся активность, которая могла бы быть обусловлена

распадом  $^{260}\text{104}$ , если бы он имел период полураспада более короткий, чем 0,1 секунды (100 мс). Мы зарегистрировали активность с периодом полураспада между 10 и 30 мс, но мы еще не идентифицировали ее. Конечно, она могла быть обусловлена  $^{260}\text{104}$ , хотя кажется, что такой период полураспада слишком длинный. Нам кажется более вероятным, что период полураспада  $^{260}\text{104}$  находится в микросекундной области».

И все. Научных сообщений об исследовании изотопа  $^{260}\text{104}$  от группы Гиорсо не последовало. Пигде больше не упоминалось и о наблюдавшейся 30-миллисекундной активности. Тем не менее в устных выступлениях и в обзорных статьях и Сиборг, и Гиорсо не раз высказывали сомнения в правильности дубненских результатов. Их доводы не отличались конкретностью: «...я считаю, что по спонтанному делению вообще ничего определить нельзя» (Гиорсо); «...но поскольку элемент живет только десятые доли секунды, химия, естественно, но может быть убедительной» (Сиборг). Здесь уместно вспомнить, что совсем недавно, лет тридцать — сорок назад, апологетам классических методов химического анализа представлялись неубедительными результаты радиохимических исследований, проведенных на микроколичествах.

Время так же относительно, как и масса; экспресс-методы анализа короткоживущих изотопов и их соединений создаются в наши дни. И, если возникают сомнения в результатах, полученных этими методами, спровергать их надо аргументированно. Аргументы же типа «не верю» и «этого не может быть, потому что этого не может быть никогда», не убедительны, даже если их высказывают большие ученые, много, действительно много сделавшие для науки о трансуроновых элементах.

Но, так или иначе, не имея убедительных доводов против дубненских работ по 104-му элементу, ученые из Беркли позволили себе назвать этот элемент по-своему — резерфордием.

### Эксперименты химиков: часть третья

Целью новых дубненских экспериментов, о которых сообщил журнал «Радиохимия» (1972, № 1), была повторная химическая идентификация элемента № 104 как экагафния. На этот раз экспериментировали с изотопом

$^{259}\text{Pu}$ , время жизни которого намного больше, чем  $^{240}\text{Pu}$ .  
 Была создана новая методика, позволяющая отфильтровывать не только атомы более легких, чем курчатовий, трансурановых элементов, но и короткоживущий изотоп  $^{240}\text{Pu}$ .

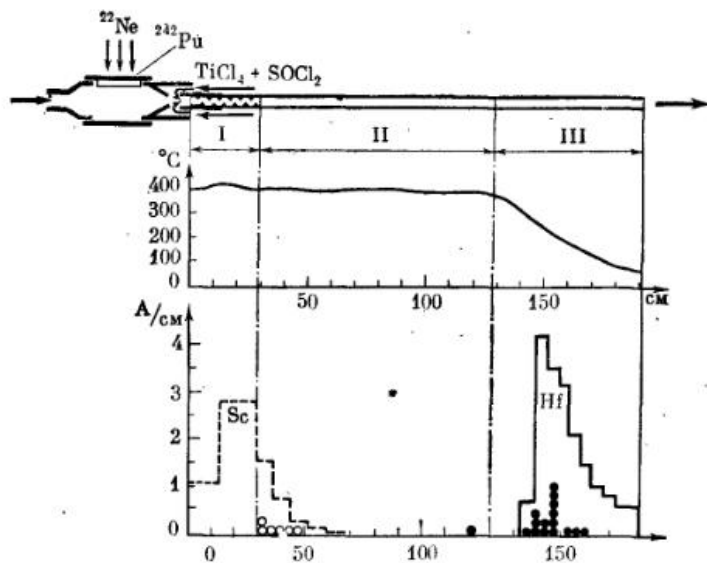
В циклотроне облучали мишени из окиси плутония (95%  $^{242}\text{Pu}$ ). Снарядами, как и в прошлых опытах, служили ускоренные ионы неона-22 с энергией от 110 до 125 Мэв: именно при таких энергиях образуется наибольшее число атомов курчатовия. А энергия 119 Мэв соответствует максимуму образования ядер изотопа  $^{259}\text{Pu}$  в реакции с вылетом пяти нейтронов.

Небольшую часть плутониевой мишени покрыли слоем окиси самария. Это сделали для того, чтобы в параллельной реакции образовывался и ближайший аналог курчатовия — гафний. В другой побочной реакции образовывался и один из радиоактивных изотопов скандия. Скандий — аналог лантаноидов и актиноидов; хлориды этих элементов примерно одинаково нелетучи. Следовательно, попутно образуемые спонтанно делящиеся изотопы актиноидов (фермий-256, в частности) в хроматографической колонке оседали бы вместе со скандием.

Хроматографическая колонка в предыдущей фразе упомянута не случайно. Установка, на которой предстояло заново идентифицировать элемент № 104, представляла собой именно такую колонку, но усложненную, специально созданную для этих опытов. Правильнее было бы назвать ее термохроматографической: строго определенный температурный режим был необходимым условием. Ядра, вылетающие из мишени, тормозились в потоке азота, который и транспортировал их в колонку. Туда же, в самое ее начало, подавали хлорирующие агенты —  $\text{TiCl}_4$  и  $\text{SOCl}_2$ .

Сама колонка состояла из трех участков, трех зон. Эту ядерную трассу можно сравнить с дистанцией стипльчеца — скачек с препятствиями: образующимся атомам пройти эту трассу было очень нелегко. На маршрут направляли всевозможные элементы, хлориды которых обладают разными свойствами. Большинство «всадников» сходило с дистанции задолго до финиша, хотя длина трассы составляла всего 195 см...

Первый участок колонки длиной 30 см предназначался для отделения нелетучих хлоридов. Именно здесь



Установка для химической идентификации элемента № 104: схема (сверху), график температурного режима в термохроматографической колонке (в середине) и распределение продуктов по длине колонки (внизу). Пунктиром выделена зона осаждения скандия и актиноидов, сплошной линией — зона сорбции гафния и курчатовия. Кружки на нижней диаграмме отражают соотношение зарегистрированных актов спонтанного деления. Следы спонтанного деления в скандиевой зоне — результат деления ядер актиноидов, в первую очередь фермий. В зоне гафния такие следы могли оставить только ядра курчатовия. Как видно из схемы, в оптимальных для синтеза элемента № 104 условиях больше всего следов спонтанного деления наблюдается именно в последней части колонки

заканчивали свой путь образующиеся атомы скандия и актиноидов. Частые выступы на внутренней поверхности этого участка вызывали завихрения потока, что, конечно, способствовало скорейшему осаждению нелетучих хлоридов.

На втором участке (его длина 100 см) оставшимся молекулам предстояло продолжать жаркую борьбу — жаркую в прямом и переносном смысле: здесь поддерживалась температура  $400 \pm 5^\circ\text{C}$ . В этих условиях хлориды гафния и курчатовия газообразны, они должны пройти этот самый длинный участок трассы, в то время как нелетучие соединения, проскочившие барьеры первой зоны, здесь должны были обязательно выбыть из гонки.



На третьем, 65-сантиметровом участке температура резко снижалась — с 400 до 50° С. Хлориды гафния и курчатовия здесь переходили в адсорбированное состояние, замедлялись и улавливались детекторами спонтанного деления — слюдяными пластинками. Такие же пластинки, кстати, были для контроля установлены и по всей длине второго участка.

Предварительные опыты показали, что при импульсном введении в газовый поток атомы гафния проходили дистанцию в среднем за 0,4 секунды, а за 2 секунды сквозь колеску прошло 95% всех атомов гафния. Эти результаты говорили, что у короткоживущих атомов курчатовия-260 нет шансов благополучно закончить дистанцию, зато атомы относительно долгоживущего курчатовия-259 должны были успешно преодолеть ее и дойти до цели.

Когда были подсчитаны треки — следы спонтанного деления на слюдяных пластинках, оказалось, что большинство «дырок» пробито в детекторах, стоявших в последней части колонки, там, где сорбировался гафний. Эти следы могли оставить только распадающиеся атомы курчатовия: все другие спонтанно делящиеся ядра сходили с дистанции раньше.

В последней серии опытов бомбардирующим ионам неона придавали энергию больше 125 Мэв. Число треков, оставленных осколками спонтанно делящихся ядер, стало намного меньше. Это естественно: условия образования ядер курчатовия стали неоптимальны.

Новые эксперименты в Дубне еще раз подтвердили аналогию химических свойств курчатовия и гафния. Их результаты не оставляют сомнений в том, какая из лабораторий — Дубны или Беркли — завоевала «приз» элемента № 104.

## НИЛЬСБОРИЙ

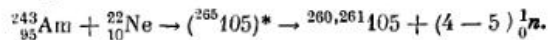


Элемент с атомным номером 105. К его открытию параллельно шли два больших научных коллектива: Лаборатория ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне и Радиационная лаборатория имени Эрнста Лоуренса в Беркли, США. В Дубне элемент сумели получить раньше и назвали нильсборием в честь Нильса Бора.

Американские физики, получившие элемент № 105 двумя месяцами позже, предложили для него свое название — ганий, в честь Отто Гана. Под этим названием он и фигурирует в американской литературе.

### Первая попытка

Как и все другие элементы тяжелее фермия, элемент № 105 получен в ядерных реакциях с участием ускоренных тяжелых ионов. Первые опыты по синтезу 105-го элемента начались в Дубне в 1967 г. под руководством академика Г. Н. Флерова. Была выбрана реакция полного слияния ионов неона-22 (ускоренных на циклотроне до энергии около 120 Мэв) с америцием-243:



По теоретическим оценкам известных американских ученых Гленна Сиборга и Виктора Вайолы, изотопы  ${}^{260}105$  и  ${}^{261}105$  должны быть альфа-излучателями. За очень короткое время (от 0,01 до 0,1 секунды) они должны были, испустив по альфа-частице (с энергией 9,4–9,7 Мэв), превратиться в ядра 103-го элемента.

Этот элемент достаточно изучен: его изотопы с массой 255 и 256 «живут» соответственно 0,6 секунды и 30 секунд и тоже испускают альфа-частицы, превращаясь в ядра элемента № 101 — менделевия. Вполне закономерно, что первые попытки идентифицировать элемент № 105 сводились к установлению генетической связи альфа-частиц с новыми, не наблюдавшимися прежде характеристиками

\* Здесь звездочкой обозначено неустойчивое компаунд-ядро.



*Элемент № 105 предложено назвать в честь великого датского физика Нильса Бора (1885—1962), автора планетарной теории атома и многих пионерских работ в разных областях физики. На основе своей модели атома Н. Бор впервые объяснил физический смысл периодической системы химических элементов. Бором же сформулировано фундаментальное представление о характере ядерных реакций, в которых получают, в частности, и новые элементы.*

и альфа-частицами, испущенными при распаде уже известных изотопов 103-го элемента.

К началу 1968 г. в результате длительных опытов удалось зарегистрировать около десяти случаев таких генетически связанных альфа-распадов. Новый короткоживущий излучатель давал альфа-частицы с энергией около 9,4 МэВ, что соответствовало предсказаниям теоретиков. С большой вероятностью это излучение можно было приписать элементу № 105, однако наблюдавшийся эффект был очень мал и неустойчив, а теория не слишком надежна.

Для ядер с нечетным числом нуклонов ее прогнозы о времени жизни и энергии альфа-частиц всегда очень неопределенны. Если в ряду «четных» ядер (число протонов и число нейтронов — четные) эти свойства изменяются закономерно, то у «нечетных» картина совсем иная: исключений из правила почти столько же, сколько «правильных» ядер. Естественно, что неопределенность теоретических оценок затрудняет поиски «нечетных» элементов и изотопов.

Правда, кое в чем теория помогла. Она допускала, что превращение ядра элемента № 105 в 103-й может идти несколько необычным путем. Испустив альфа-частицу, ядро со 105 протонами не обязательно сразу превращается в ядро 103-го элемента в основном его состоянии: альфа-

распад 105-го может привести к образованию дочернего ядра в промежуточном, возбужденном состоянии. Оно, это ядро, затем «разрядится» за время, меньшее миллиардной доли секунды, испуская гамма-лучи. В таком случае энергия альфа-частиц 105-го будет меньше предсказанной теоретиками: вместо 9,4—9,7 она может составить всего 8,9—9,2 МэВ. Энергию около 0,5 МэВ унесут гамма-лучи. В силу этого сокращения энергии альфа-перехода время жизни новых ядер может оказаться в десятки раз больше, чем ожидалось... Из всего этого следовало, что столь же внимательно, как область 9,4—9,7 МэВ, необходимо исследовать и другую, более низкую по энергиям часть энергетического спектра альфа-частиц.

Однако в опытах 1968 г. анализ энергетического спектра альфа-частиц в области энергий ниже 9,4 МэВ был сильно затруднен из-за присутствия альфа-радиоактивного фона — излучения, подобного искомому, но возникающего в результате побочных ядерных реакций. Фоновые альфа-излучатели образовывались под действием ионов неона-22 на микропримесях свинца в материале мишени. Эти побочные реакции в миллионы раз более вероятны, чем главная, а радиоактивные свойства продуктов таких реакций весьма близки к ожидаемым для изотопов 105-го элемента. Поэтому опасны даже ничтожные примеси свинца.

Гарантии, что этой микропримеси в мишенях нет, не было. Таким образом, хотя полученные в опытах 1968 г. результаты были близки к предсказанным, они, по мнению Г. Н. Флерова и его сотрудников, не могли служить достаточным основанием для того, чтобы утверждать: элемент № 105 уже открыт.

По-видимому, нужно было идти другим путем. Но каким?

### Следы на фосфатном стекле

Анализ радиоактивных свойств ядер 102-го, 103-го и 104-го элементов, к которому не раз возвращались экспериментаторы, позволял предполагать, что наряду с альфа-распадом изотопы элемента № 105 должны испытывать также и спонтанное деление. Несколько забегая вперед, скажем, что предположение полностью оправдалось, точнее, превратилось в надежно установленный экспериментальный факт.

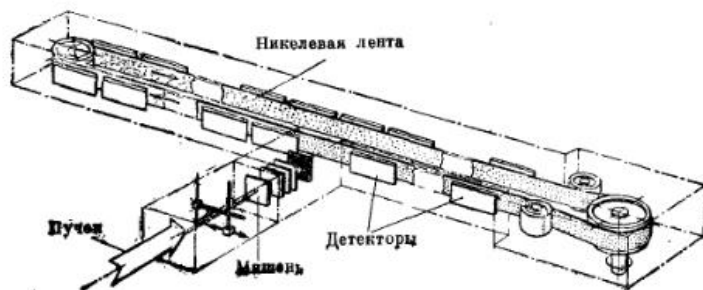
тальный факт. Однако в те дни и месяцы, когда шли первые опыты по синтезу 105-го, оно было достаточно необычным и даже смелым.

В самом деле, было хорошо известно, что вероятность спонтанного деления нечетных ядер в тысячи и даже в сотни тысяч раз меньше вероятности спонтанного деления их ближайших четных соседей. С одной стороны, казалось бы, этот дополнительный «запас прочности» нечетных ядер исключает возможность наблюдать спонтанное деление ядер 105-го. С другой стороны, однако, с увеличением порядкового номера элемента вероятность спонтанного деления его изотопов резко увеличивается как для «четных» элементов, так и для «нечетных». Если, например, к ядру урана-238 добавить 8 протонов, то мы получим ядро фермия-246, для которого вероятность спонтанного деления увеличивается более чем в  $10^{22}$  раз по сравнению с ураном-238.

С увеличением числа протонов растут действующие в ядре силы кулоновского расталкивания, и стабильность ядра относительно спонтанного деления неумолимо уменьшается, примерно в сто или тысячу раз на каждый добавленный протон. Вот почему у изотопов очень тяжелых даже нечетных элементов вероятность спонтанного деления сравнима с вероятностью альфа-распада...

Идентификация элемента по спонтанному делению имеет бесспорные достоинства: факт распада ядра на два

Схема экспериментальной установки для регистрации короткоживущих спонтанно делящихся ядер. С помощью такой установки со многими детекторами, расположенными вдоль движущейся «бесконечной» ленты-сборника, впервые наблюдалось образование ядер элемента № 105



осколка примерно равной массы зарегистрировать значительно легче (и надежнее!), чем случаи альфа-распада; аппаратура, регистрирующая спонтанное деление, намного чувствительнее. К тому же, при правильной постановке опыта фон практически исключен.

Принимая во внимание эти обстоятельства, в ноябре 1969 г. в Лаборатории ядерных реакций были начаты поиски элемента № 105 по спонтанному делению. Реакция синтеза оставалась той же: америций-243+неон-22. Схема установки, которая использовалась в этих опытах, показана на рисунке.

Ядра нового элемента, получив большой импульс от падающих ионов, выбивались из мишени и попадали на сборник — «бесконечную» никелевую ленту-конвейер шириной 2,5 см. Она двигалась с постоянной скоростью и перемещала приобретенные ядра от мишени к детекторам, регистрирующим осколки спонтанного деления. Чтобы исключить фон, и сборник, и детекторы делали из сверхчистых материалов с рекордно низким содержанием урана — менее одной стомиллионной грамма урана на грамм материала.

Более ста детекторов, приготовленных из фосфатного стекла (в виде пластинок размером 50×35 мм), располагались вдоль ленты. После специальной химической обработки на таких стеклах под микроскопом можно отчетливо видеть следы (треки), оставленные осколками деления. По распределению треков на детекторах (при известной скорости движения ленты-сборника) можно судить о времени жизни спонтанно делящегося изотопа, а по числу следов — о вероятности его образования...

В первом же опыте 1969 года, продолжавшемся около 70 часов, было зарегистрировано 58 следов от осколков спонтанного деления изотопа с периодом полураспада около двух секунд. Ранее изотоп с такими свойствами не был известен. Естественно было предположить, что спонтанное деление с таким периодом полураспада испытывает изотоп 105-го элемента. Но чтобы доказать это, необходимо было выяснить механизм образования нового излучателя.

При облучении америция-243 ионами неона-22 105-й элемент может образоваться только в случае полного слияния взаимодействующих ядер. Важно, что в реакциях полного слияния ядер вероятность образования искомого



продукта чрезвычайно сильно зависит от энергии бомбардирующих частиц: изменение энергии ионов всего на 10% относительно ее оптимального значения уменьшает выход продуктов реакции более чем в 10 раз.

Другая особенность избранной реакции заключается в том, что к полному слиянию приводят лишь центральные, «лобовые» соударения взаимодействующих ядер. Поэтому ядра-продукты, в соответствии с законом сохранения импульса, летят строго вперед, по направлению пучка налетающих частиц. Если же происходит лишь касательное соударение, то налетающее ядро и ядро-мишень обмениваются несколькими пучконами (протонами или нейтронами) или наблюдается неполное слияние, или идут реакции с вылетом заряженных частиц. Во всех этих случаях образуется что угодно, но только не ядра 105-го элемента. Эти побочные продукты ядерного синтеза можно и нужно отсеять. Это очень не просто, но это делается. Надежно выделить и опознать, идентифицировать новые ядра — это самая трудная, самая кропотливая часть опытов по синтезу новых элементов.

Было твердо установлено, что спонтанно делящийся изотоп с периодом полураспада около двух секунд регистрируется лишь тогда, когда по условиям опыта возможно полное слияние ядер америция и неона, а продукты побочных реакций «отсеяны» специальными приспособлениями. При полном слиянии образовывались новые ядра и очевидно ядра 105-го, однако необходимо было определить их массовое число. Для этого измерялась так называемая функция возбуждения, т. е. зависимость вероятности образования новых ядер от энергии бомбардирующих ионов. Кривые, построенные по результатам этих экспериментов, наглядно показывали, что образовавшиеся в реакции полного слияния возбужденные составные ядра «остывали», испуская четыре нейтрона. Это означало, что наиболее вероятное массовое число нового изотопа равно  $261: 243+22-4...$

Впоследствии было проведено много контрольных опытов, каждый из которых длился десятки часов. Шаг за шагом исключалась возможность альтернативного объяснения экспериментальных данных. В результате можно было утверждать: при облучении америция-243 ионами неона-22 образуется изотоп 105-го элемента, вероятнее всего —  $^{261}105$ , с периодом полураспада  $1,8 \pm 0,6$  секунды.

Ядра нового элемента распадаются двумя путями: или спонтанно делятся (примерно в 20% случаев распада), или испускают альфа-частицы. Всего в опытах по спонтанному делению было зарегистрировано более 400 ядер нового элемента. Первая публикация о нем в «Сообщениях Объединенного института ядерных исследований» была принята к печати 18 февраля 1970 года. Вскоре статья об открытии 105-го элемента в Дубне появилась также в журналах «Атомная энергия» и «Nuclear Physics».

К этому времени удалось изготовить сверхчистую мишень из америция-243 с содержанием свинца меньше одной десятиллиардной доли грамма. Это намного облегчило изучение альфа-распада 105-го элемента. Вновь были поставлены опыты, подобные первым опытам 1967 года. Они показали, что большинство альфа-частиц, испускаемых при распаде ядер 105-го элемента, имеет энергию около 9 МэВ, а период полураспада нового излучателя практически совпадает с определенным в опытах по спонтанному делению. Заметим, что время жизни первого изотопа элемента № 105 оказалось в десятки раз больше того, что предсказывали теоретики.

#### А через 60 дней...

Первое сообщение об открытии элемента № 105 в Лаборатории имени Лоуренса (Беркли) датировано 17 апреля того же 1970 г. Реакция синтеза была здесь другой: калифорний-249 бомбардировали ионами азота-15. Идентифицировали новые ядра по альфа-распаду материнских и дочерних продуктов. В этих опытах наблюдалось образование излучателей альфа-частиц с энергией 9,06 МэВ и периодом полураспада  $1,60 \pm 0,3$  секунды. По существу, американские ученые подтвердили открытие физиков Дубны и тем не менее высказали претензию на приоритет и в этом открытии...

#### Основы химии

Химические свойства элемента 105 определяли в Дубне с помощью той же экспрессной методики, которая была разработана для химической идентификации 104-го элемента. Суть ее — разделение образующихся в мишени продуктов на основе химических особенностей их летучих соединений. Ожидалось, что по химическим свойствам элемент № 105

должен оказаться аналогом тантала или ниобия. В этом случае его хлорид и, возможно, оксихлорид должны быть сравнительно летучими соединениями, и тогда можно применить метод адсорбции газообразных хлоридов по температурным зонам.

Атомы отдачи, образованные в реакции  $^{243}\text{Am} + ^{22}\text{Ne}$ , выбивались из мишени точно так же, как и в физических опытах. Однако теперь их не собирали на никелевую ленту, а подхватывали потоком горячего, нагретого до  $300^\circ\text{C}$  азота, который уносил атомы нового элемента в специальную термохроматографическую колонку из стекла. Одновременно в начало колонки подавали хлорирующие агенты — газообразные  $\text{TiCl}_4$  и  $\text{SOCl}_2$ .

Первый участок колонки (длиной около 30 см) находился при температуре  $300^\circ\text{C}$  и служил для отделения нелетучих хлоридов. А летучие пролетали дальше, на второй, более длинный (130 см) участок. Здесь температура равномерно понижалась до  $50^\circ\text{C}$ , и хлориды разных элементов адсорбировались в разных температурных зонах — в зависимости от степени их летучести. По положению зоны неизвестного элемента можно было судить, чьим аналогом он является. В предварительных опытах определили зону ниобия — одного из возможных аналогов элемента № 105. И еще гафния. Теперь предстояло установить, где адсорбируются новые ядра.

Спонтанное деление помогло и химикам. Они регистрировали осколки спонтанного деления небольшими пластинками слюды. Если в реакции действительно образовывался элемент № 105, «экатантал», то максимум осколков спонтанного деления должен быть зарегистрирован в «тантало-ниобиевой» части колонки.

Группировка и местоположение следов от осколков спонтанного деления ядер, образующихся при взаимодействии неона и америция (а их было зарегистрировано около 20), свидетельствовали о том, что спонтанно делящаяся активность принадлежит элементу, хлорид которого менее летуч, чем хлорид ниобия, но не уступает по летучести высшему хлориду гафния. Такие свойства хорошо согласуются с предсказанными для элемента № 105 — экатантала.

Летом 1973 г. была испытана несколько иная методика определения химических свойств элемента № 105. Работая с летучими бромидами, а не хлоридами, пришли к тем же выводам.

## Десять лет спустя

В последующие годы эксперименты по синтезу изотопов элемента № 105 продолжались, и сведения о его свойствах были существенно дополнены. Расширилась и «география» исследований: в них включались экспериментаторы из Ок-Риджской национальной лаборатории (США), а в самые последние годы и западногерманские физики, располагающие современным ускорителем тяжелых ионов, построенным в городе Дармштадте.

В Дубне был разработан новый метод синтеза тяжелых элементов с помощью «магических» ядер. (Подробнее о нем рассказано в следующей статье.) Этим методом, предложенным профессором Ю. Ц. Оганесяном, был получен легкий спонтанно делящийся изотоп  $^{237}\text{105}$  при облучении висмута-209 ионами титана-50. С помощью той же комбинации частица-мишень экспериментаторы в Дармштадте получили изотоп  $^{238}\text{105}$ . Изотоп  $^{262}\text{105}$  был зарегистрирован по альфа-распаду в Беркли. В Ок-Ридже успешно завершились эксперименты по установлению генетической связи между альфа-распадом изотопа  $^{260}\text{105}$  и возбуждением рентгеновских лучей (L-серии) элемента № 103.

Наблюдение спектра характеристического рентгеновского излучения было и остается классическим методом идентификации химических элементов. В опытах ок-риджской группы рентгеновские лучи, характерные для 103-го элемента, регистрировались спустя одну-две секунды после вылета из ядер  $^{260}\text{105}$  альфа-частиц с энергией около 9,1 МэВ.

Сейчас известны радиоактивные свойства пяти изотопов элемента № 105, их массовые числа от 257 до 262, исключая 259. Наиболее долгоживущим оказался изотоп  $^{262}\text{105}$ , его период полураспада 40 секунд, у остальных — от одной до пяти. Поистине замечателен тот факт, что все изотопы 105-го наряду с альфа-распадом испытывают и спонтанное деление. Изотоп с массовым числом 262 распадается этим способом в 60 случаях из 100, для других изотопов 105-го доля спонтанного деления составляет 10–20%.

Благоприятные для исследований радиоактивные свойства изотопа  $^{262}\text{105}$  позволили более детально изучить процесс деления его ядер. Уже давно известно, что массы осколков деления крайне редко бывают равными, чаще же соотношение их масс — примерно 2 : 3. Почему ядру вы-

годнее делиться так, а не иначе, каков механизм возникновения этой асимметрии масс?

Три изотопа — фермий-258, фермий-259 и менделевий-259, делящиеся симметрично, позволяли предположить, что и последующие тяжелые изотопы, склонные к спонтанному делению, будут делиться симметрично, опровергая старое — 2 : 3 — правило. Но нет: опыты, проведенные в Ок-Ридже, показали, что ядра  $^{262}105$  придерживаются «старых правил», делятся асимметрично. Видимо, область около  $^{258}\text{Fm}$  — лишь экзотический островок симметрии в море несимметрии. Это обстоятельство имеет важное значение для развития теории деления ядер. А изотоп  $^{262}105$ , таким образом, оказался самым тяжелым ядром, о спонтанном делении которого известно нечто большее, чем просто вероятность этого процесса.

Отметим, наконец, что изотопы  $^{257}105$  и  $^{258}105$ , будучи дочерними продуктами ядер 107-го элемента ( $^{261}107$  и  $^{262}107$ ), сыграли важную роль в экспериментах по синтезу и идентификации элемента № 107.

Первооткрыватели элемента № 105 предложили назвать его нильсборием — в честь Нильса Бора, выдающегося физика XX в., неизменно стремившегося поставить науку на службу миру и прогрессу.

Международный союз теоретической и прикладной химии (ИЮПАК) это название пока не утвердил, как, впрочем, и название «ганий», предложенное американскими физиками. В приоритетном конфликте наших и американских ученых по поводу открытия элементов № 102—105 до сих пор все еще нет компетентного и независимого третейского судьи. Вопрос об окончательном и справедливом наименовании самых тяжелых химических элементов пока остается нерешенным.

## ЭКВАЛЬФРАМ

(106-й — пока безымянный)



В 1974 г. число химических элементов, известных человечеству, увеличилось еще на единицу. Их стало 106.

Между открытиями 104-го и 105-го элементов прошло шесть лет, между 105-м и 106-м — четыре года, и были основания считать, что скоро появится очередной новый элемент.

Причины этих оптимистических надежд будут объяснены чуть позже. Здесь же укажем лишь на одну из них, самую главную: появился новый подход к проблемам ядерного синтеза, новый метод — тот самый, с помощью которого открыт элемент № 106.

106-й — не итог, 106-й — следствие. Поэтому воздержимся от восторженных криков типа «найден еще один элементарный кирпичик мироздания», и «ура первооткрывателям».

Попробуем разобраться, почему так трудно дается каждый очередной шаг в далекую трансурановую область и каковы истоки нынешнего сдержанного оптимизма физиков.

### Summary

Почти каждая научная статья, написанная на английском языке, начинается с этого слова. Иногда оно не пишется — подразумевается, тогда на помощь приходят типографские шрифты. Иным шрифтом, не тем, которым печатается статья в целом, выделяют это самое summary — резюме, итог, краткую сводку наиглавнейшего.

Для элемента № 106 summary, вероятно, должно бы выглядеть так:

«В 1974 г. появились сообщения о синтезе изотопов 106-го элемента с массовыми числами 259 и 263. Первый из них получен в ядерной реакции нового типа при слиянии ядер свинца и хрома с последующим испусканием всего двух или трех нейтронов. Этот изотоп наряду с альфа-распадом испытывает спонтанное деление с периодом полураспада около 7 миллисекунд.

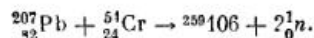


Второй изотоп получен в классической реакции на тяжелой мишени (калифорний), бомбардированной ионами кислорода-18. Период полураспада этого изотопа  $0,9 \pm 0,2$  секунды, энергия альфа-излучения  $9,06 \pm 0,04$  МэВ.

По приведенным характеристикам нетрудно догадаться, где какой изотоп получен. Регистрация новых ядер по спонтанному делению — метод и прерогатива Лаборатории ядерных реакций в Дубне; регистрация по альфа-излучению и дочерним продуктам — метод и критерий открытия для Лоуренсовской лаборатории в Беркли. (Впрочем, к работе по синтезу элемента № 106 в США были привлечены специалисты еще одной лаборатории, тоже носящей имя изобретателя циклотрона Э. Лоуренса и тоже расположенной в штате Калифорния, но в другом городе — Ливерморе.) Первое сообщение об американской работе датировано сентябрем 1974 г.

### Нетрадиционный путь

Во всех предыдущих синтезах новых химических элементов мишени готовились из урана, плутония, других трансурановых элементов. Старались выбрать мишень потяжелее, «снаряд» полегче, и в этом была логика. Чем больше энергии привнесет в составное ядро падающая частица, тем труднее ему не развалиться, остаться новым идентифицируемым ядром. В идеальном для ядерного синтеза случае ядро остывает, выбрасывая только нейтроны, — только тогда находят новые элементы. Обычно составное ядро испускает 4–5 нейтронов, и каждый из них уносит в среднем 10 МэВ. Однако 106-й элемент впервые получили, бомбардируя сравнительно легкую свинцовую мишень ускоренными ионами хрома:



Что же, выходит, что энергия возбуждения в этой реакции в 2–2,5 раза меньше обычного? Совсем нет. Просто ядра свинца — «магические» ядра. Как есть замкнутые электронные оболочки — причина высшей химической стойкости благородных газов, так существуют и замкнутые нуклонные оболочки, как протонные, так и нейтронные. У изотопов свинца протонные оболочки заполнены целиком, и потому их ядра представляют собой как бы упрочен-

ную конструкцию. Оттого и получалось, что ядру-снаряду приходилось затрачивать слишком много энергии на возбуждение в «магическое» ядро, и энергия возбуждения «ядерных сплавов» на свинцовой основе меньше, чем обычно.

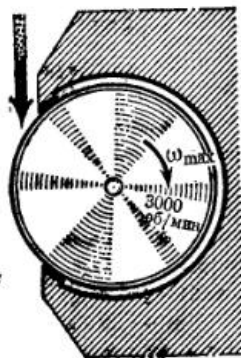
Эту идею впервые высказал доктор физико-математических наук профессор Юрий Цолакович Оганесян, а возглавляемая им группа экспериментаторов блестяще подтвердила ее, получив первые ядра элемента № 106. Первая статья о синтезе в Дубне изотопа  ${}^{259}_{106}$  датирована 11 июля 1974 года. К тому времени было зарегистрировано более 60 спонтанно делящихся ядер с периодом полураспада около 0,007 секунды.

### Аргументы физиков

Почему были уверены, что эти ядра — новые? Во-первых, потому, что ни одно из известных прежде спонтанно делящихся ядер не имело подобных характеристик. Во-вторых, потому, что изменение условий реакции — замена изотопа свинца в качестве мишени или изотопа хрома (бомбардирующего снаряда) — исключало наблюдавшийся эффект. Никто, конечно, не считал напрямую — это невозможно, — сколько протонов содержится в новых ядрах. В экспериментах регистрировали лишь осколки спонтанно делившихся ядер. Однако оснований полагать, что эти осколки чуть раньше составляли ядра 106-го элемента, было более чем достаточно.

Для синтеза и «ловли» осколков сконструировали специальную установку. Она достаточно проста: вращающийся

Схема экспериментальной установки, на которой открыт 106-й элемент. Быстро вращающаяся с постоянной скоростью цилиндрическая камера, наружная поверхность которой покрыта тонким слоем моноизотопного свинца. На эту свинцовую мишень под определенным углом направляли пучок ускоренных в циклотроне ионов хрома. За то время, какое «живет» ядро 106-го элемента, участок мишени успевает выйти из-под ионного пучка, и осколки деления летят на кремниевые детекторы, которыми окружена мишень. Потом следы деления дополнительно протравливают и по числу треков на разных детекторах вычисляют период полураспада



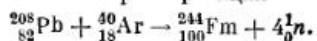
с постоянной скоростью полый цилиндр, покрытый снаружи тонким слоем моноизотопного свинца. На эту мишень и направляют под определенным углом пучок ускоренных в циклотроне ионов хрома. За то время, какое «живет» ядро 106-го элемента, участок мишени успевает выйти из-под ионного пучка, и осколки летят на слюдяные детекторы спонтанного деления, которыми окружена мишень. Потом следы осколков дополнительно протравливают и по числу треков на разных детекторах определяют период полураспада...

Мысль о том, что оболочечные эффекты, действующие в «магических» и «околомагических» ядрах, могут помочь нуклеосинтезу, разумеется, требовала и теоретического обоснования, и экспериментальной проверки. Поэтому один из теоретиков — А. С. Ильинов заранее скрупулезно высчитывал вероятность образования новых ядер и величины барьеров, стоящих на пути синтеза.

Расчеты говорили, что стоит пробовать. Первой такой пробой, моделью будущих синтезов, должно было стать получение новым методом какого-либо известного изотопа. Но какого?

Во-первых, это должен быть хорошо изученный и спонтанно делящийся изотоп. Спонтанное деление — любимый конек, регистрация его осколков для дубненских специалистов — задача привычная и приятная. Во-вторых, должна быть принципиальная возможность получить этот изотоп в ядерной реакции между свинцом и ионом, значительно более тяжелым, чем использовавшиеся прежде, например с аргоном.

Была избрана реакция



Свойства фермия-244, впервые полученного в США в 1967 г., хорошо известны. Ядра этого изотопа с вероятностью, близкой к 100%, испытывают спонтанное деление. Период полураспада — 3,3 миллисекунды.

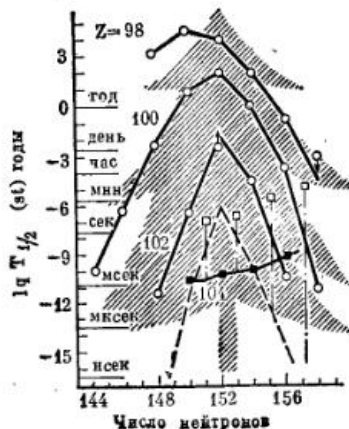
Расчеты показали, что вероятность ядерной реакции  $\text{Pb} + \text{Ar} \rightarrow \text{Fm}$  всего в 10 раз меньше, чем классической ядерной реакции с участием урана и кислорода. А раз так, то, располагая чувствительной аппаратурой, можно было приступить к эксперименту. Попробовали — получили спонтанно делящийся излучатель с периодом полураспада  $4 \pm 0,5$  миллисекунды. То, что надо! Модель работала, обо-

лочечные эффекты ядер свинца помогли получить известный излучатель. За ним — еще несколько, тоже известных.

Вторым этапом работы стал синтез новым методом новых изотопов «старых» элементов. Здесь самыми интересными оказались опыты по синтезу нейтрондефицитных изотопов курчатовия —  ${}^{254}\text{Cu}$ ,  ${}^{255}\text{Cu}$  и  ${}^{256}\text{Cu}$ . В качестве снарядов использовали ионы титана, мишени опять были свинцовыми. Главным результатом этого этапа оказалась даже не сам факт получения трех новых ядерных разновидностей. Нанесенные на график величины периодов полураспада этих ядер по спонтанному делению коренным образом меняли представления о систематике времени жизни изотопов элемента № 104. Объяснимы стали некоторые факты из прошлого.

Здесь нам, пожалуй, не обойтись без помощи графики. На рисунке внизу показана систематика периодов спонтанного деления для изотопов нескольких самых тяжелых элементов с четными номерами. По горизонтальной оси отложено число нейтронов в ядре, по вертикальной — периоды полураспада по спонтанному делению. Экспериментальные кривые — времена жизни изотопов элементов № 98, 100 и 102 — образовывали подобие елки без ствола. Ствол, впрочем, можно провести, соединив высшие точки трех кривых. Что тогда мы увидим? «Ветвь» 102-го элемента расположена ниже «ветви» 100-го, а та, в свою очередь, ниже «ветви» элемента № 98. Чем больше атомный номер

Систематика периодов полураспада по спонтанному делению в логарифмической шкале — так расшифровывается обозначение у вертикальной оси  $\lg T_{1/2}(\text{с})$  — для изотопов 98, 100, 102 и 104-го элементов. Сплошными линиями соединены экспериментальные точки. Пунктирная линия внизу — теоретические предсказания американского физика А. Гнорсо для изотопов 104-го элемента. Черные квадраты — экспериментальные данные для четных изотопов курчатовия, светлые — для его нечетных изотопов. Как видим, эксперимент в очередной раз вступил в противоречие с теорией и опроверг основанные на ней прогнозы



элемента, тем меньше «живут» его изотопы — логично. И автор этой систематики А. Гиорсо провел пунктиром еще одну «ветвь» — для элемента № 104.

Когда в Дубне получили первые сведения о периодах полураспада изотопов 104-го элемента, их значения легли в стороне от логичной, но сугубо теоретической ветви. Тем не менее именно эта елочка стала для американских физиков главным основанием для того, чтобы считать период полураспада изотопа  $^{260}\text{Ku}$ , установленный в Дубне, завышенным и подвергать сомнению исследование в целом.

Но вот на ту же диаграмму легли новые экспериментальные точки, их соединили и увидели, что елки-то нет. У 104-го элемента с увеличением числа нейтронов в ядре растет стабильность, и если есть где-то максимум, за которым следует спад, то этот максимум, видимо, еще не достигнут, он где-то справа. А если так, то ствол аккуратной прежде елочки будет изогнут, как ножка боровика, выросшего под корнями дерева...

Эксперимент опроверг теоретическую систематику Гиорсо. В извечном противоборстве теоретиков и экспериментаторов последние, найдя новые факты, одержали еще одну победу.

Третьим этапом работы с «магическими» мишенями стал синтез нового изотопа нового элемента — 106-го. Когда и как его получили впервые, мы уже знаем, но был и второй эксперимент. Место действия — США, штат Калифорния.

## Второй изотоп

В сентябре 1974 г. было опубликовано сообщение об открытии 106-го элемента в Соединенных Штатах Америки. Синтезировали изотоп  $^{263}\text{106}$  при бомбардировке калифорнийской мишени на новом ускорителе «Суперхайлак». Характеристики этого изотопа приведены в начале статьи.

Не исключено, что для будущих исследований элемента № 106 этот изотоп окажется более важным, чем  $^{259}\text{106}$ , потому что он живет значительно дольше. Но эта работа методологически традиционна. Хорошо, конечно, что удалось сделать мишень из калифорния; хорошо, что начал выдавать научную продукцию ускоритель «Суперхайлак», но синтез с использованием все более тяжелых мишеней — это в общем-то путь «вверх по лестнице, ведущей вниз».

Метод, если и не исчерпал еще себя полностью, то близок к тому. Нужны были новые идеи, новые методы. И тот факт, что местом рождения (или месторождением?) этих методов и идей стала Дубна, знаменателен.

Несколько слов о реакции американских ученых на открытие 106-го элемента в Дубне.

Как и после открытия 104-го 105-го элементов, оппоненты из Беркли выразили сомнения в том, что новый элемент действительно открыт. Вновь, в который раз, был повторен старый и шаткий аргумент, что «по спонтанному делению ничего определить нельзя». Однако те же строгие и не вполне объективные критики отмечали, что новая работа Дубны очень интересна, что дубненская группа — «пионеры в использовании таких тяжелых ионов, которых еще никто никогда не ускорял и не использовал в ядерных реакциях». Более того, американские физики в своих публикациях указывали, что намереваются воспользоваться новым методом в своих будущих работах.

В первом сообщении о получении изотопа  $^{263}\text{106}$  группа Гиорсо указывает, что она «решила пока воздержаться от предложений, как назвать 106-й элемент, до выяснения ситуации». Совсем новые мотивы в давнем трансураново-приоритетном споре...

Остается добавить немного. К концу 1974 г. в Дубне наблюдали уже больше 120 ядер нового элемента. Установили, что в среднем два ядра из трех делятся спонтанно, а треть, испустив альфа-частицу, превращается в ядро курчатовия-255 с периодом полураспада около 4 секунд. Любопытно, что «дочернее» ядро тоже открыто в реакции «магического нуклеосинтеза».

106-й элемент, разумеется, пока не претендует на какое-либо практическое применение. Однако науке о веществе и особенно ядерном веществе его открытие дало немало.



## ЭКРАНИЙ

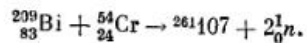


Эксперименты по синтезу элемента № 107 были начаты в Дубне вскоре после получения 106-го элемента. Решено было использовать тот же метод, тот же подход и те же способы регистрации, что и в предыдущем синтезе.

Мишени из сравнительно легких элементов (свинец и его соседи по таблице Менделеева) бомбардировали

очень тяжелыми ионами, подбирая соответствующие элементы середины менделеевской таблицы.

107-й элемент мог в принципе образоваться при бомбардировке таллия железом, свинца марганцем, висмута хромом. Расчеты показали, что наибольшее сечение (вероятность образования ядер 107-го элемента) ожидается для ядерной реакции



На большом дубненском циклотроне получили пучок восьмизарядных ионов хрома достаточной интенсивности и энергии. После первых же облучений висмутовых мишеней этими ионами был обнаружен новый спонтанно делирующийся излучатель с периодом полураспада около 5 секунд. Тот же излучатель удалось зарегистрировать и в так называемых перекрестных реакциях, когда для получения нового ядра использовали иную мишень и иной ион-снаряд — лишь бы осталась неизменной сумма протонов — 107 — у ядер, которые должны слиться.

Пятисекундный период полураспада нового излучателя настораживал. Полностью исключить вероятность столь большого времени жизни ядра  ${}^{261}107$  было, конечно, нельзя, однако намного более вероятно для таких ядер было бы время жизни порядка миллисекунды. Поэтому предположили, что пятисекундный излучатель — это не ядро 107-го элемента, а дочернее ядро —  ${}^{257}105$ , образующееся в результате альфа-распада ядер 107-го. Решили проверить эту догадку.

Были проведены эксперименты, в которых должны были образоваться ядра  ${}^{257}105$ , но не мог образовываться 107-й

элемент — ядерные реакции висмута с титаном и свинца с ванадием. Пятисекундная активность вновь наблюдалась, принадлежность ее 105-му, а не 107-му элементу стала бесспорной ( $83+22=82+23=105$ ).

После этого, настроив аппаратуру на регистрацию очень короткоживущих излучателей, повторили ядерную реакцию висмута и хрома, в которой должен образовываться 107-й элемент. В этих опытах и был «пойман» другой новый излучатель — с периодом полураспада (по спонтанному делению) около 2 миллисекунд.

При бомбардировке той же мишени ионами титана-50 и хрома-53 эта короткоживущая активность не регистрировалась, она появлялась только в реакции  ${}^{209}\text{Bi}$  и  ${}^{54}\text{Cr}$ . Это позволило сделать вывод о том, что именно в этой реакции образуется 107-й элемент, его изотоп с массой 261.

Пока о 107-м элементе известно немного. Часть ядер  ${}^{261}107$  — примерно 20% — распадается спонтанно, а остальные испускают по альфа-частице и превращаются в пятисекундный изотоп  ${}^{257}105$ .

Поскольку большинство ядер  ${}^{261}107$  испытывает альфа-распад, физики надеются, что более тяжелые изотопы 107-го элемента будут жить дольше. Если это окажется так, то будут правы теоретики, утверждающие, что по мере приближения к атомным номерам около 114 время жизни сверхтяжелых ядер будет расти, и среди элементов второй сотни может существовать «остров стабильности».

Впрочем, получить сравнительно долгоживущие тяжелые изотопы 107-го элемента еще предстоит. Пока же наблюдалось лишь немногим больше ста событий, которые авторы исследования объясняют как распад изотопа  ${}^{261}107$ , весьма короткоживущего...

Первая научная публикация об элементе № 107 датирована 29 января 1976 г.

Через пять лет в ядерной реакции висмута-209 с хромом-24 западногерманские физики получили еще один изотоп 107-го элемента — с массовым числом 262.

Вот пока и все, что известно об элементе № 107, замыкающем ныне таблицу Менделеева. Надолго ли?

## А после 107-го?



Беседа корреспондента журнала «Химия и жизнь» с директором Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне академиком Г. Н. Флеровым.

**Вопрос:** Первый вопрос не связан с проблемами трансурановых элементов. Он о взаимосвязи ядерной физики и периодической системы химических элементов...

**Ответ:** Синтез новых элементов это не самое трудное дело. Труднее доказать, что новое действительно получено. Благодаря периодическому закону физики, синтезирующие новые химические элементы, находятся в лучшем положении, чем мореплаватели, открывавшие когда-то новые острова и страны. Начиная работу, мы уже кое-что знаем о наших неоткрытых «островах»; это придает поискам изначальную целенаправленность.

Когда Менделеев вынашивал и создавал свой великий закон, еще не было такой науки — ядерной физики, еще не была открыта радиоактивность... Марии Склодовской-Кюри в день открытия периодического закона — 1 марта 1869 г. еще не было двух лет. Сама идея превращения элементов казалась тогда алхимической, ненаучной. Мне кажется, что это пошло на пользу науке, ибо эта идея могла в какой-то степени затруднить выявление тех закономерностей, которые Дмитрий Иванович обобщил в своем законе.

Интуитивно чувствуя чрезвычайную важность изучения последних по атомным номерам элементов, Менделеев направлял взоры исследователей в ту область системы элементов, на которой впоследствии выросла ядерная физика.

И если поначалу в среде физиков (я имею в виду ядерную физику) бытовало мнение, что их наука и периодическая система мало взаимосвязаны, то это была одна из самых короткоживущих идей. Ни физик, ни химик, ни любой другой ученый-естествоиспытатель не может, как бы он того ни желал, обойти законы природы. В том числе и периодический закон. А та область ядерной физики, в которой мне посчастливилось работать, расширяет границы периодической системы элементов, опираясь на самую систему.

**Вопрос:** Что, с вашей точки зрения, важнее — зани-

маться дальше изучением уже известных элементов и изотопов или синтезировать новые?

**Ответ:** Чем дальше отстоит изотоп от области стабильности, тем больше информации о строении ядра он может нам дать. Исследование вещества в экстремальном состоянии, в экстремальных условиях его существования — особый методологический подход, который используется и физиками, и химиками. Изотопы, далекие от области стабильности, — это и есть «экстремальный объект исследования».

Исследования сверхтяжелых ядер важны прежде всего тем, что они дают возможность получить максимум информации о строении ядра. Ради этого стоит тратить силы и средства на синтез и исследование новых элементов.

**Вопрос:** Что больше всего препятствует синтезу и идентификации элементов с атомными номерами больше 107 и как эти препятствия можно преодолеть?

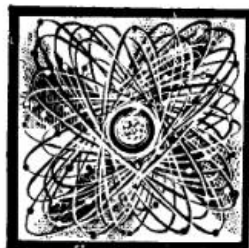
**Ответ:** Главные препятствия — это слишком быстрый распад ядер, исчезающе малое время их жизни и все уменьшающееся сечение образования, т. е. «выход» новых ядер в ядерных реакциях. Но это не значит, что 107-й элемент — последний, замыкающий систему. Нужно пытаться синтезировать новые, все более тяжелые элементы, нужно искать их в природных объектах.

В солнечной системе нуклеосинтез закончился миллиарды лет назад, но в некоторых областях космоса он либо протекал значительно позже, либо продолжается и поныне. Таким образом, в космосе определенно должны быть сверхтяжелые по нашим понятиям ядра — результат нуклеосинтеза, — которые избежали губительного распада. Часть вещества звезд, на которых идут эти процессы, может в виде космического излучения достигнуть Земли и ее окрестностей. Следовательно, изотопы сверхтяжелых элементов с относительно малым временем жизни могут быть обнаружены в околоземном пространстве.

Не исключено, что сверхтяжелые элементы есть и в земной коре, и хотя пока ни в одном эксперименте (а они проводились в разных странах) не удалось идентифицировать изотопы с «острова стабильности», эта идея продолжает волновать исследователей.

Запись 1975 г., редакция — 1981 г.

## Восьмой период: каким он будет?



А действительно — каким? Казалось бы, логичнее всего предположить, что, подобно другим большим периодам менделеевской таблицы, и в частности седьмому, которым она сегодня кончается, этот период тоже будет включать 32 элемента. Однако в 1968 г. В. И. Гольданский, ныне академик, выдвинул гипотезу о ином строении восьмого периода. В нем, согласно

этой гипотезе, будет не 32, а 50 элементов.

Эта, последняя, глава книги представляет собой запись беседы В. И. Гольданского с корреспондентом журнала «Химия и жизнь».

Вопрос: Что заставило вас задуматься о строении восьмого периода таблицы Менделеева? Ведь элементы этого периода пока представляются в высшей степени труднодостижимыми...

Так может выглядеть длиннопериодный вариант таблицы Менделеева с добавлением восьмого и девятого периодов (по Гольданскому)

период	I	1																	2										
	II	3	4																	10									
	III	11	12																	18									
	IV	19	20																	36									
	V	37	38																	54									
	VI	55	56	57	58	59	60	61																	86				
	VII	87	88	89	90	91	92	93																	118				
	VIII	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143			182
	IX	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193			230

← g-элементы →

Ответ: Еще всего несколько лет назад нам казалось, что вопрос о химических свойствах элементов восьмого периода — чисто схоластический. У физиков были надежды получить изотопы еще нескольких новых элементов, примерно до № 110, но считалось, что химикам с ними будет делать нечего: слишком мало будет время жизни новых ядер. Однако затем появились более оптимистические прогнозы, теоретики вычислили возможность существования «островов стабильности», да и методы радиохимии становятся все более быстрыми, или, как говорят, экспрессными. Новые элементы получать все труднее, согласен. И тем не менее есть основания ожидать «скачка» в далекую трансурановую область. Седьмой период заканчивается элементом № 118, значит, один из предполагаемых «обитателей» «островов стабильности» — элемент № 126 — это уже элемент восьмого периода.

Не исключено, что уже в самом недалеком будущем химикам придется столкнуться с элементом или даже с элементами восьмого периода. К этим элементам у химиков должен быть теоретический «ключ». А ключ только один — периодическая система Д. И. Менделеева, ее строжайшая логика и основанное на этой логике ее дальнейшее развитие.

Вопрос: Вы сказали «элементы восьмого периода». Какие есть к тому основания?

Ответ: В 1936 г. Нобелевской премии были удостоены ученые-физики, создатели теории оболочечного строения

																2	He																														
																5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																				
																13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																				
																21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
																39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118											
Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																							
144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168																							
194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218																							

← f-элементы →      ← d-элементы →



ядра М. Гепперт-Майер и Г. Иенсен. Согласно этой теории в ядре, как и в атоме, могут быть случаи предельного заполнения определенных оболочек. Только если в атоме это электронные оболочки, то здесь — протонные и нейтронные. «Магические числа», о которых много писали в газетах и журналах, как раз отвечают случаям предельного заполнения протонных и нейтронных оболочек в ядре. Не буду перечислять все магические числа, скажу только, что 126 и 184 — в их числе. Значит, у изотопа  $^{310}_{126}$  ядро которого содержит 126 протонов и 184 нейтрона, время жизни должно быть значительно больше, чем у других ядер далекой трансурановой области. Он же «дважды магический». И возможно, что где-то в этой же области есть менее «живучие», но все-таки приемлемые (по времени жизни) для химических исследований изотопы.

Конечно, я совсем не убежден, что удастся получить все элементы восьмого периода. Но некоторые — очень может быть.

Вопрос: Согласно вашей гипотезе восьмой период будет сверхбольшим — 50 элементов. Это как-то не вяжется с нынешней периодической системой, где все построено на аналогиях.

Ответ: Именно закономерности системы Менделеева, примененные к восьмому периоду, позволяют предсказать не аналогию, а отличие нового периода от существующих. Объяснить это, не затрагивая довольно многих положений квантовой химии, затруднительно.

Вспользуемся, пожалуй, помощью графикп. Известен длиннопериодный вариант таблицы Менделеева, вариант, в котором лантаноиды и актиноиды не занимают отдельных строк. Эта таблица основана на том, что *s*- и *p*-элементы, составляющие основные подгруппы всех групп, отделены от *d*-элементов побочных групп. Лантаноиды и актиноиды — *f*-элементы. А в восьмом и девятом периодах, согласно опущенным здесь квантовохимическим расчетам, помимо всех этих элементов должны быть еще и *g*-элементы, по 18 *g*-элементов. Здесь впервые появится совершенно новое семейство, которое можно назвать октадеканидами (от латинского слова, означающего число 18). Сходство химических свойств у октадеканидов должно быть еще больше, чем у лантаноидов и актиноидов. В самом деле, если у лантаноидов отличие в строении электрон-

ных оболочек существует лишь в третьей, если считать снаружи, оболочке, то у октадеканидов — лишь в четвертой. Если для лантаноидов ближайшим аналогом, своего рода «образцом поведения», служит иттрий, то для октадеканидов — актиний.

Вопрос: Значит, 126-й элемент, на открытие которого так уповают физики, химически окажется одним из «сверхблизнецов»? И, если вдруг окажется, что и у соседних элементов будут относительно стабильные изотопы, химикам придется решать проблемы «сверхразделения?»

Ответ: Именно так. Элемент № 126 будет одним из октадеканидов, и химикам, которые будут его изучать, нужно, наверное, ожидать встречи с тяжелым трехвалентным металлом, очень похожим как на актиний, так и на соседние с № 126 элементы.

А в целом длиннопериодный вариант таблицы Менделеева с добавлением элементов восьмого и девятого периодов должен, по-моему, выглядеть так, как показано на этих страницах.

Запись 1970 г., новая редакция — 1981 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ

КОНСТАНТЫ И СВОЙСТВА

В этом издании «Популярной библиотеки химических элементов» впервые дается дополнительный справочный материал. В таблицы «Константы и свойства» включены важнейшие характеристики элементов и простых веществ. Величины плотности даны при нормальных условиях, за исключением особо оговоренных случаев. Индексом «р» возле цифр, означающих массовое число, помечены природные радиоактивные изотопы.

Для элементов, не имеющих стабильных изотопов, величины атомных масс не указаны, приведены массовые числа известных к 1 января 1982 г. изотопов и изомеров, а также их важнейшие ядерно-физические характеристики: периоды полураспада и виды распада данного ядра. (Обозначения:  $\alpha$  — альфа-распад;  $\beta^-$  — распад с испусканием бета-частиц, ядерных электронов;  $\beta^+$  — распад с испусканием позитронов, с. д. — спонтанное деление; э. з. — электронный захват.) Для практически важных изотопов радиоактивных элементов приведены также сечения захвата тепловых нейтронов.

Литература, использованная при составлении таблиц: Большая Советская Энциклопедия, III издание, в 30 томах; Краткая химическая энциклопедия в 5 томах; Неорганическая химия — энциклопедия школьника. М., 1975; А. Гордон, Р. Форд. Спутник химика. М.: Мир, 1976; К. Ледерер и В. Ширли. Таблицы изотопов. Нью Йорк, 1978. а также новейшие научные публикации.

Таблицы составлены химиком Ю. Г. Печерской и физиком В. И. Кузнецовым в 1981 г.

Водород

Атомный номер	1
Атомная масса	1,00794
Органолептические свойства	Легкий газ без цвета, вкуса и запаха
Число известных изотопов	4
массовые числа	1, 2, 3, 4
Число природных изотопов	2
массовые числа	1      2
содержание в природной смеси, %	99,984    0,0156
Молекула	H <sub>2</sub>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	0,0899
Температура плавления, °C	-259,2
Температура кипения, °C	-252,7
Степени окисления	-1, +1
Потенциал ионизации, эВ	13,598
Конфигурация внешних электронов	1s <sup>1</sup>

Гелий

Атомный номер	2
Атомная масса	4,0026
Органолептические свойства	Газ без цвета, вкуса и запаха
Число известных изотопов	4
массовые числа	3, 4, 6, 8
Число природных изотопов	2
массовые числа	3      4
содержание в природной смеси, %	0,00013    99,99987
Молекула	He
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	0,178
Температура плавления, °C	-269,7
Температура кипения, °C	-268,9
Степени окисления	Не известны
Потенциал ионизации, эВ	24,586
Конфигурация внешних электронов	1s <sup>2</sup>

Литий

Атомный номер	3
Атомная масса	6,941
Органолептические свойства	Мягкий серебристо-белый металл

Число известных изотопов	5
массовые числа	6—9, 11
Число природных изотопов	2
массовые числа	6     7
содержание в природной смеси, %	7,42  92,58
Молекула	Li
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	534
Температура плавления, °C	180,5
Температура кипения, °C	1326
Степень окисления	+1
Потенциал ионизации, эВ	5,392
Конфигурация внешних электронов	2s <sup>1</sup>

### Бериллий

Атомный номер	4
Атомная масса	9,01218
Органолептические свойства	Светло-серый металл
Число известных изотопов	5
массовые числа	7, 9—12
Число природных изотопов	1
массовое число	9
содержание в природной смеси, %	100

Молекула	Be
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1848
Температура плавления, °C	1278
Температура кипения, °C	2970
Степень окисления	+2
Потенциал ионизации, эВ	9,322
Конфигурация внешних электронов	2s <sup>2</sup>

### Бор

Атомный номер	5
Атомная масса	10,81
Органолептические свойства	Бесцветное кристаллическое вещество
Число известных изотопов	6
массовые числа	8, 10—14

Число природных изотопов	2
массовые числа	10   11
содержание в природной смеси, %	19,7  80,3
Молекула	B <sub>n</sub>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2340
Температура плавления, °C	2200
Температура кипения, °C	3800
Степень окисления	+3
Потенциал ионизации, эВ	8,298
Конфигурация внешних электронов	2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>

### Углерод

Атомный номер	6
Атомная масса	12,011
Органолептические свойства	Бесцветное кристаллическое вещество (в виде алмаза)

Число известных изотопов	8
массовые числа	9—16
Число природных изотопов	3
массовые числа	12       13     14p
содержание в природной смеси, %	98,892   1,108  2·10 <sup>-10</sup>

Молекула	C <sub>n</sub>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	3510 (алмаз)
Температура плавления, °C	>3500 при давлении выше 105 атм
Температура кипения, °C	4830 в тех же условиях
Температура сублимации (возгонки), °C	3700
Степени окисления	-4, +2, +4
Потенциал ионизации, эВ	11,267
Конфигурация внешних электронов	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>

### Азот

Атомный номер	7
Атомная масса	14,0067
Органолептические свойства	Бесцветный, без вкуса и запаха газ (чуть легче воздуха)
Число известных изотопов	8
массовые числа	12—19



Число природных изотопов	2
массовые числа	14 15
содержание в природной смеси, %	99,635 0,365
Молекула	$N_2$
Плотность, $кг/м^3$	1,2506
Температура плавления, $^{\circ}C$	-209,86
Температура кипения, $^{\circ}C$	-195,8
Степень окисления	от -3 до +5
Потенциал ионизации, эВ	14,549
Конфигурация внешних электронов	$2s^2 2p^3$

#### Кислород

Атомный номер	8
Атомная масса	15,999
Органолептические свойства	Газ без цвета и запаха
Число известных изотопов	8
массовые числа	13-20
Число природных изотопов	3
массовые числа	16 17 18
содержание в природной смеси, %	99,759 0,037 0,204

Молекула	$O_2$
Плотность, $кг/м^3$	1,429
Температура плавления, $^{\circ}C$	-218,8
Температура кипения, $^{\circ}C$	-182,97
Степень окисления	-2
Потенциал ионизации, эВ	13,618
Конфигурация внешних электронов	$2s^2 2p^4$

#### Фтор

Атомный номер	9
Атомная масса	18,9984
Органолептические свойства	Почти бесцветный газ с резким запахом
Число известных изотопов	7
массовые числа	17-23
Число природных изотопов	1
массовое число	19
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	$F_2$

Плотность, $кг/м^3$	1,696
Температура плавления, $^{\circ}C$	-219,6
Температура кипения, $^{\circ}C$	-188,1
Степень окисления	-1
Потенциал ионизации, эВ	17,426
Конфигурация внешних электронов	$2s^2 2p^5$

#### Неон

Атомный номер	10
Атомная масса	20,179
Органолептические свойства	Газ без цвета и запаха
Число известных изотопов	9
массовые числа	17-25
Число природных изотопов	3
массовые числа	20 21 22
содержание в природной смеси, %	90,92 0,26 8,82

Молекула	Ne
Плотность, $кг/м^3$	0,900
Температура плавления, $^{\circ}C$	-248,6
Температура кипения, $^{\circ}C$	-246
Степень окисления	Ne известны
Потенциал ионизации, эВ	21,564
Конфигурация внешних электронов	$2s^2 2p^6$

#### Натрий

Атомный номер	11
Атомная масса	22,9898
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл легче воды
Число известных изотопов	14
массовые числа	20-33
Число природных изотопов	1
массовое число	23
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Na
Плотность, $кг/м^3$	971
Температура плавления, $^{\circ}C$	97,8
Температура кипения, $^{\circ}C$	890
Степень окисления	+1

Потенциал ионизации, эВ	5,139
Конфигурация внешних электронов	$3s^1$
<b>Магний</b>	
Атомный номер	12
Атомная масса	24,305
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	11
массовые числа	20—30
Число природных изотопов	3
массовые числа	24      25      26
содержание в природной смеси, %	78,70    10,13    11,17
Молекула	Mg
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1738
Температура плавления, °С	650
Температура кипения, °С	1107
Степень окисления	+2
Потенциал ионизации, эВ	7,646
Конфигурация внешних электронов	$3s^2$
<b>Алюминий</b>	
Атомный номер	13
Атомная масса	26,9815
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	9
массовые числа	23—31
Число природных изотопов	1
массовое число	27
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Al
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2702
Температура плавления, °С	660,2
Температура кипения, °С	2400
Степень окисления	+1, +3 (обычно)
Потенциал ионизации, эВ	5,986
Конфигурация внешних электронов	$3s^2 3p^1$
<b>Кремний</b>	
Атомный номер	14
Атомная масса	28,086

Органолептические свойства	Кристаллическое вещество темно-серого цвета с металлическим блеском
Число известных изотопов	10
массовые числа	25—34
Число природных изотопов	3
массовые числа	28      29      30
содержание в природной смеси, %	92,21    4,70    3,09
Молекула	Si
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2330
Температура плавления, °С	1410
Температура кипения, °С	2355
Степени окисления	-4, +4
Потенциал ионизации, эВ	8,151
Конфигурация внешних электронов	$3s^2 3p^2$
<b>Фосфор</b>	
Атомный номер	15
Атомная масса	30,9738
Органолептические свойства	Аморфное вещество белого цвета (белый фосфор)
Число известных изотопов	8
массовые числа	28—35
Число природных изотопов	1
массовое число	31
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	P <sub>n</sub>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1820 (белый фосфор)
Температура плавления, °С	44,2
Температура кипения, °С	280
Степени окисления	-3, +3, +5
Потенциал ионизации, эВ	10,980
Конфигурация внешних электронов	$3s^2 3p^3$
<b>Сера</b>	
Атомный номер	16
Атомная масса	32,06
Органолептические свойства	Аморфное вещество желтого цвета
Число известных изотопов	10
массовые числа	29—38

Число природных изотопов	4
массовые числа	32 33 34 36
содержание в природной смеси, %	95,0 0,76 4,22 0,014
Молекула	S <sub>n</sub>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2070 (ромбическая сера)
Температура плавления, °C	119,5
Температура кипения, °C	444,6
Степени окисления	-2, +2, +4, +6
Потенциал ионизации, эВ	10,36
Конфигурация внешних электронов	3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>

#### Хлор

Атомный номер	17
Атомная масса	35,453
Органолептические свойства	Желто-зеленый тяжелый газ с резким запахом
Число известных изотопов	10
массовые числа	32—41
Число природных изотопов	2
массовые числа	35 37
содержание в природной смеси, %	75,53 24,47

Молекула	Cl <sub>2</sub>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	3,214
Температура плавления, °C	-100,98
Температура кипения, °C	-34,6
Степени окисления	-1, +1, +3, +4, +5, +6, +7

Потенциал ионизации, эВ	13,02
Конфигурация внешних электронов	3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>

#### Аргон

Атомный номер	18
Атомная масса	39,948
Органолептические свойства	Газ без цвета и запаха
Число известных изотопов	12
массовые числа	33—44
Число природных изотопов	3
массовые числа	36 38 40
содержание в природной смеси, %	0,337 0,063 99,60

Молекула	Ar
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1,7824
Температура плавления, °C	-189,2
Температура кипения, °C	-185,8
Степени окисления	Не известны
Потенциал ионизации, эВ	15,759
Конфигурация внешних электронов	3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>

#### Калий

Атомный номер	19
Атомная масса	39,102
Органолептические свойства	Серебристо-белый легкий металл
Число известных изотопов	15
массовые числа	36—50
Число природных изотопов	3
массовые числа	39 40p 41
содержание в природной смеси, %	93,08 0,01 6,91

Молекула	K
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	862
Температура плавления, °C	63,7
Температура кипения, °C	774
Степень окисления	+1
Потенциал ионизации, эВ	4,341
Конфигурация внешних электронов	4s <sup>1</sup>

#### Кальций

Атомный номер	20
Атомная масса	40,08
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	14
массовые числа	37—50
Число природных изотопов	6
массовые числа	40 42 43 44
содержание в природной смеси, %	96,97 0,64 0,145 2,06
массовые числа	46 48
содержание в природной смеси, %	0,0033 0,18

Молекула	Ca
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1550

Температура плавления, °C	850
Температура кипения, °C	1490
Степень окисления	+2
Потенциал ионизации, эВ	6,113
Конфигурация внешних электронов	4s <sup>2</sup>
<b>Скандий</b>	
Атомный номер	21
Атомная масса	44,9559
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	12
массовые числа	40—51
Число природных изотопов	1
массовое число	45
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Sc
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	3000
Температура плавления, °C	1539
Температура кипения, °C	2727
Степень окисления	+3
Потенциал ионизации, эВ	6,561
Конфигурация внешних электронов	3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>
<b>Титан</b>	
Атомный номер	22
Атомная масса	47,90
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	13
массовые числа	41—53
Число природных изотопов	5
массовые числа	46    47    48    49    50
содержание в природной смеси, %	7,93   7,28   73,94   5,51   5,34
Молекула	Ti
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4500
Температура плавления, °C	1675
Температура кипения, °C	3260
Степени окисления	+2, +3, +4
Потенциал ионизации, эВ	6,818
Конфигурация внешних электронов	3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>

<b>Ванадий</b>	
Атомный номер	23
Атомная масса	50,9414
Органолептические свойства	Металл серо-стального цвета
Число известных изотопов	10
массовые числа	44, 46—54
Число природных изотопов	2
массовые числа	50p        51
содержание в природной смеси, %	0,25       99,75
Молекула	V
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	6100
Температура плавления, °C	1890
Температура кипения, °C	3000
Степени окисления	+2, +3, +4, +5
Потенциал ионизации, эВ	6,740
Конфигурация внешних электронов	3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>

<b>Хром</b>	
Атомный номер	24
Атомная масса	51,996
Органолептические свойства	Металл серо-стального цвета
Число известных изотопов	12
массовые числа	45—56
Число природных изотопов	4
массовые числа	50    52    53    54
содержание в природной смеси, %	4,31   83,76   9,55   2,38
Молекула	Cr
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7190
Температура плавления, °C	1900
Температура кипения, °C	2500
Степени окисления	+2, +3, +6
Потенциал ионизации, эВ	6,765
Конфигурация внешних электронов	3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup>

<b>Марганец</b>	
Атомный номер	25
Атомная масса	54,9380
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	10
массовые числа	49—58



Число природных изотопов	1
массовое число	55
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Mn
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7400
Температура плавления, °C	1245
Температура кипения, °C	2097
Степени окисления	+2, +3, +4, +6, +7
Потенциал ионизации, эВ	7,434
Конфигурация внешних электронов	3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>

### Железо

Атомный номер	26
Атомная масса	55,847
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	12
массовые числа	49, 52—62
Число природных изотопов	4
массовые числа	54    56    57    58
содержание в природной смеси, %	5,82  91,66  2,19  0,33
Молекула	Fe
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7874
Температура плавления, °C	1535
Температура кипения, °C	3000
Степени окисления	+2, +3, +6
Потенциал ионизации, эВ	7,91
Конфигурация внешних электронов	3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>

### Кобальт

Атомный номер	27
Атомная масса	58,9332
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл с бледно-розовым оттенком
Число известных изотопов	12
массовые числа	53—64
Число природных изотопов	1
массовое число	59
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Co

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8900
Температура плавления, °C	1493
Температура кипения, °C	2900
Степени окисления	+2, +3
Потенциал ионизации, эВ	7,87
Конфигурация внешних электронов	3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>

### Никель

Атомный номер	28
Атомная масса	58, 71
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл с бледно-желтым оттенком
Число известных изотопов	15
массовые числа	53—67
Число природных изотопов	5
массовые числа	58    60    61    62    64
содержание в природной смеси, %	67,76  26,16  1,25  3,66  1,16

Молекула	Ni
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8900
Температура плавления, °C	1455
Температура кипения, °C	2730
Степени окисления	+2, +3
Потенциал ионизации, эВ	7,635
Конфигурация внешних электронов	3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>

### Медь

Атомный номер	29
Атомная масса	63,546
Органолептические свойства	Красный металл
Число известных изотопов	14
массовые числа	57—70
Число природных изотопов	2
массовые числа	63    65
содержание в природной смеси, %	69,09  30,91

Молекула	Cu
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8960
Температура плавления, °C	1083
Температура кипения, °C	2595
Степени окисления	+1, +2

Потенциал ионизации, эВ	7,726
Конфигурация внешних электронов	$3d^{10}4s^1$
<b>Цинк</b>	
Атомный номер	30
Атомная масса	65,37
Органолептические свойства	Белый металл с синеватым оттенком
Число известных изотопов	20
массовые числа	57, 60—77, 79
Число природных изотопов	5
массовые числа	64 66 67 68 70
содержание в природной смеси, %	48,89 27,81 4,11 18,57 0,62
Молекула	Zn
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7140
Температура плавления, °C	419,5
Температура кипения, °C	907
Степень окисления	+2
Потенциал ионизации, эВ	9,391
Конфигурация внешних электронов	$3d^{10}4s^2$

<b>Галлий</b>	
Атомный номер	31
Атомная масса	69,72
Органолептические свойства	Мягкий белый чрезвычайно легкоплавкий металл
Число известных изотопов	22
массовые числа	62—83
Число природных изотопов	2
массовые числа	69 71
содержание в природной смеси, %	60,4 39,6
Молекула	Ga
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	5907
Температура плавления, °C	29,78
Температура кипения, °C	2200
Степень окисления	+1 (редко), +2, +3
Потенциал ионизации, эВ	5,997
Конфигурация внешних электронов	$4s^24p^1$

<b>Германий</b>	
Атомный номер	32
Атомная масса	72,59
Органолептические свойства	Кристаллическое вещество светло-серого цвета с металлическим блеском
Число известных изотопов	21
массовые числа	64—84
Число природных изотопов	5
массовые числа	70 72 73 74 76
содержание в природной смеси, %	20,51 27,43 7,76 36,54 7,76
Молекула	Ge
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	5323 (при 25° C)
Температура плавления, °C	937,4
Температура кипения, °C	2830
Степени окисления	—4, +2, +4
Потенциал ионизации, эВ	7,89
Конфигурация внешних электронов	$4s^24p^2$

<b>Мышьяк</b>	
Атомный номер	33
Атомная масса	74,9216
Органолептические свойства	Кристаллы серого цвета с металлическим блеском
Число известных изотопов	20
массовые числа	68—87
Число природных изотопов	1
массовое число	75
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	As
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	5720
Температура плавления, °C	817 (при давлении 28 атм)
Температура кипения, °C	613 (возгонка)
Степени окисления	—3, +3, +5
Потенциал ионизации, эВ	9,815
Конфигурация внешних электронов	$4s^24p^3$

<b>Селен</b>	
Атомный номер	34
Атомная масса	78,96

Органолептические свойства  
 Кристаллическое вещество се-  
 рого цвета  
 23  
 Число известных изотопов  
 массовые числа 68—89, 91  
 Число природных изотопов  
 массовые числа 6  
 содержание в природной сме-  
 си, % 74 76 77 78 80 82  
 0,87 9,02 7,58 23,52 49,82 9,19

Молекула Se  
 Плотность, кг/м<sup>3</sup> 4790 (серый селен)  
 Температура плавления, °C 217  
 Температура кипения, °C 685  
 Степени окисления -2, +4, +6  
 Потенциал ионизации, эВ 9,752  
 Конфигурация внешних электро-  
 нов 4s<sup>2</sup>4p<sup>4</sup>

#### Бром

Атомный номер 35  
 Атомная масса 79,904  
 Органолептические свойства Тяжелая темно-бурая жид-  
 кость  
 Число известных изотопов 23  
 массовые числа 70—92  
 Число природных изотопов 2  
 массовые числа 79 81  
 содержание в природной сме-  
 си, % 50,54 49,46

Молекула Br<sub>2</sub>  
 Плотность, кг/м<sup>3</sup> 3119  
 Температура плавления, °C -7,2  
 Температура кипения, °C 58,78  
 Степени окисления -1, +1, +3, +5, +7  
 Потенциал ионизации, эВ 11,85  
 Конфигурация внешних электро-  
 нов 4s<sup>2</sup>4p<sup>6</sup>

#### Криптон

Атомный номер 86  
 Атомная масса 83,80  
 Органолептические свойства Газ без цвета и запаха  
 Число известных изотопов 24  
 массовые числа 72—95  
 Число природных изотопов 6

массовые числа 78 80 82 83 84 86  
 содержание в природной сме-  
 си, % 0,35 2,27 11,56 11,55 56,90 17,37

Молекула Kr  
 Плотность, кг/м<sup>3</sup> 3,708  
 Температура плавления, °C -157  
 Температура кипения, °C -153  
 Степени окисления +2, +4  
 Потенциал ионизации, эВ 13,999  
 Конфигурация внешних электро-  
 нов 4s<sup>2</sup>4p<sup>6</sup>

#### Рубидий

Атомный номер 37  
 Атомная масса 85,4678  
 Органолептические свойства Серебристо-белый вязкий ме-  
 талл  
 Число известных изотопов 26  
 массовые числа 74—99  
 Число природных изотопов 2  
 массовые числа 85 87  
 содержание в природной сме-  
 си, % 72,15 27,85

Молекула Rb  
 Плотность, кг/м<sup>3</sup> 1530  
 Температура плавления, °C 38,9  
 Температура кипения, °C 688  
 Степень окисления +1  
 Потенциал ионизации, эВ 4,176  
 Конфигурация внешних электро-  
 нов 5s<sup>1</sup>

#### Стронций

Атомный номер 38  
 Атомная масса 87,62  
 Органолептические свойства Серебристо-белый металл  
 Число известных изотопов 23  
 массовые числа 77—99  
 Число природных изотопов 4  
 массовые числа 84 86 87 88  
 содержание в природной сме-  
 си, % 0,56 9,86 7,02 82,56

Молекула Sr  
 Плотность, кг/м<sup>3</sup> 2600

Температура плавления, °C	770
Температура кипения, °C	1384
Степень окисления	+2
Потенциал ионизации, эВ	5,694
Конфигурация внешних электронов	5s <sup>2</sup>

#### Иттрий

Атомный номер	39
Атомная масса	88,9059
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	21
массовые числа	81—100, 102
Число природных изотопов	1
массовое число	89
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Y
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4470
Температура плавления, °C	1500
Температура кипения, °C	2927
Степень окисления	+3
Потенциал ионизации, эВ	6,528
Конфигурация внешних электронов	4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup>

#### Цирконий

Атомный номер	40
Атомная масса	91,22
Органолептические свойства	Блестящий твердый металл, похожий на сталь
Число известных изотопов	22
массовые числа	81—102
Число природных изотопов	5
массовые числа	90    91    92    94    96
содержание в природной смеси, %	51,46 11,23 17,11 17,40 2,80
Молекула	Zr
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	6400
Температура плавления, °C	1852
Температура кипения, °C	4000
Степень окисления	+4
Потенциал ионизации, эВ	6,835
Конфигурация внешних электронов	4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup>

#### Нобий

Атомный номер	41
Атомная масса	92,9064
Органолептические свойства	Светло-серый металл
Число известных изотопов	21
массовые числа	86—106
Число природных изотопов	1
массовое число	93
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Nb
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8570
Температура плавления, °C	2468
Температура кипения, °C	4930
Степени окисления	+3, +5 (чаще всего), +2, +4
Потенциал ионизации, эВ	6,881
Конфигурация внешних электронов	4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup>

#### Молибден

Атомный номер	42
Атомная масса	95,94
Органолептические свойства	Светло-серый металл
Число известных изотопов	21
массовые числа	88—108
Число природных изотопов	7
массовые числа	92    94    95    96    97
содержание в природной смеси, %	15,84 9,04 15,72 16,53 9,46
массовые числа	98    100
содержание в природной смеси, %	23,78 9,63
Молекула	Mo
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	10220
Температура плавления, °C	2610
Температура кипения, °C	5560
Степени окисления	+3, +4, +6 (чаще всего), +2, +5
Потенциал ионизации, эВ	7,099
Конфигурация внешних электронов	4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup>



### Технеций

Атомный номер	43
Атомная масса	98,9062
Органолептические свойства	Серебристый металл с коричневыми оттенком
Число известных изотопов	21
массовые числа	90—110
Число природных изотопов	Не обнаружены
Молекула	Tc
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	11500
Температура плавления, °C	2200
Температура кипения, °C	4700
Степени окисления	от +2 до +7
Потенциал ионизации, эВ	7,276
Конфигурация внешних электронов	4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup>

### Рутений

Атомный номер	44
Атомная масса	101,07
Органолептические свойства	Очень твердый белый металл
Число известных изотопов	21
массовые числа	92—112
Число природных изотопов	7
массовые числа	96 98 99 100 101
содержание в природной смеси, %	5,51 1,87 12,72 12,62 17,07
массовые числа	102 104
содержание в природной смеси, %	31,61 18,6
Молекула	Ru
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	12200
Температура плавления, °C	2400
Температура кипения, °C	4900
Степени окисления	от +1 до +8
Потенциал ионизации, эВ	7,366
Конфигурация внешних электронов	4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup>

### Родий

Атомный номер	45
Атомная масса	102,9055
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл

Число известных изотопов	21
массовые числа	94—114
Число природных изотопов	1
массовое число	103
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Rh
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	12400
Температура плавления, °C	1966
Температура кипения, °C	около 4000
Степени окисления	+1, +3, +4
Потенциал ионизации, эВ	7,463
Конфигурация внешних электронов	4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup>

### Палладий

Атомный номер	46
Атомная масса	106,4
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	22
массовые числа	97—118
Число природных изотопов	6
массовые числа	102 104 105 106
содержание в природной смеси, %	0,96 10,97 22,23 27,33
массовые числа	108 110
содержание в природной смеси, %	26,71 11,80
Молекула	Pd
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	12020
Температура плавления, °C	1550
Температура кипения, °C	3980
Степени окисления	+2, +3, +4, +6
Потенциал ионизации, эВ	8,336
Конфигурация внешних электронов	4d <sup>10</sup> 5s <sup>0</sup>

### Серебро

Атомный номер	47
Атомная масса	107,8682
Органолептические свойства	Блестящий белый металл
Число известных изотопов	26
массовые числа	97, 99—123
Число природных изотопов	2

массовые числа	107	109
содержание в природной смеси, %	51,82	48,18
Молекула	Ag	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	10500	
Температура плавления, °C	960,8	
Температура кипения, °C	2212	
Степени окисления	+1 (чаще всего), +2, +3	
Потенциал ионизации, эВ	7,574	
Конфигурация внешних электронов	4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	

#### Кадмий

Атомный номер	48
Атомная масса	112,40
Органолептические свойства	Белый металл с синеватым оттенком
Число известных изотопов	25
массовые числа	100—122, 124, 128
Число природных изотопов	8
массовые числа	106 108 110 111 112
содержание в природной смеси, %	1,22 0,88 12,39 12,75 24,07
массовые числа	113 114 116
содержание в природной смеси, %	12,26 28,86 7,57
Молекула	Cd
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8650
Температура плавления, °C	320,9
Температура кипения, °C	764,9
Степень окисления	+2
Потенциал ионизации, эВ	8,993
Конфигурация внешних электронов	4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>

#### Индий

Атомный номер	49
Атомная масса	114,82
Органолептические свойства	Мягкий серебристо-белый металл
Число известных изотопов	29
массовые числа	104—132
Число природных изотопов	2
массовые числа	113 115

содержание в природной смеси, %	4,28 95,72
Молекула	In
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7310
Температура плавления, °C	156,17
Температура кипения, °C	2080
Степени окисления	+1, +2, +3 (чаще всего)
Потенциал ионизации, эВ	5,786
Конфигурация внешних электронов	5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup>

#### Олово

Атомный номер	50
Атомная масса	118,69
Органолептические свойства	Твердый серебристо-белый металл
Число известных изотопов	29
массовые числа	106—134
Число природных изотопов	10
массовые числа	112 114 115 116 117
содержание в природной смеси, %	0,96 0,66 0,35 14,30, 7,61
массовые числа	118 119 120 122 124
содержание в природной смеси, %	24,03 8,58 32,85 4,72 5,94
Молекула	Sn
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7290 (белое олово)
Температура плавления, °C	231,9
Температура кипения, °C	2270
Степени окисления	+2, +4
Потенциал ионизации, эВ	7,344
Конфигурация внешних электронов	5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup>

#### Сурьма

Атомный номер	51
Атомная масса	121,75
Органолептические свойства	Кристаллическое вещество белого цвета с синеватым оттенком
Число известных изотопов	29
массовые числа	108—136
Число природных изотопов	2
массовые числа	121 123

содержание в природной смеси, %	57,25	42,75
Молекула	<b>Sb</b>	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	6684 (при 25°C)	
Температура плавления, °C	630,5	
Температура кипения, °C	1380	
Степени окисления	-3, +3, +5	
Потенциал ионизации, эВ	8,641	
Конфигурация внешних электронов	5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup>	

### Теллур

Атомный номер	52				
Атомная масса	127,60				
Органолептические свойства	Кристаллическое вещество белого цвета с металлическим блеском				
Число известных изотопов	32				
массовые числа	107—138				
Число природных изотопов	8				
массовые числа	120	122	123	124	125
содержание в природной смеси, %	0,089	2,46	0,87	4,61	6,99
массовые числа	126	128	130		
содержание в природной смеси, %	18,7	31,8	34,48		

Молекула	<b>Te</b>				
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	6240				
Температура плавления, °C	450				
Температура кипения, °C	990				
Степени окисления	-2, +4, +6				
Потенциал ионизации, эВ	9,009				
Конфигурация внешних электронов	5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup>				

### Иод

Атомный номер	53				
Атомная масса	126,9045				
Органолептические свойства	Кристаллическое вещество черного цвета с металлическим блеском				
Число известных изотопов	27				
массовые числа	115—141				
Число природных изотопов	1				

массовое число	127
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	<b>I<sub>2</sub></b>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4930
Температура плавления, °C	113,6 (при быстром нагреве; при медленном возгоняется)
Температура кипения, °C	184,35
Степени окисления	-1 (чаще всего), +1, +3, +5, +7
Потенциал ионизации, эВ	10,457
Конфигурация внешних электронов	5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup>

### Ксенон

Атомный номер	54					
Атомная масса	131,30					
Органолептические свойства	Газ без цвета и запаха					
Число известных изотопов	32					
массовые числа	113, 115—145					
Число природных изотопов	9					
массовые числа	124	126	128	129	130	131
содержание в природной смеси, %	0,09	0,09	1,92	26,4	4,1	21,2
массовые числа	132	134	136			
содержание в природной смеси, %	26,9	10,45	8,87			

Молекула	<b>Xe</b>					
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	5,851					
Температура плавления, °C	-111,9					
Температура кипения, °C	-108					
Степени окисления	+1, +2, +4, +6, +8					
Потенциал ионизации, эВ	12, 130					
Конфигурация внешних электронов	5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>					

### Цезий

Атомный номер	55					
Атомная масса	132,9055					
Органолептические свойства	Светлый металл с золотисто-желтым оттенком					
Число известных изотопов	31					
массовые числа	116—146					
Число природных изотопов	1					

массовое число	133
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Cs
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1873
Температура плавления, °C	28,7
Температура кипения, °C	690
Степень окисления	+1
Потенциал ионизации, эВ	3,894
Конфигурация внешних электронов	6s <sup>1</sup>

### Барий

Атомный номер	56
Атомная масса	137,34
Органолептические свойства	Белый металл
Число известных изотопов	30
массовые числа	117, 119—146, 148
Число природных изотопов	7
массовые числа	130 132 134 135
содержание в природной смеси, %	0,101 0,097, 2,42 6,59
массовые числа	136 137 138
содержание в природной смеси, %	7,81 11,32 71,66

Молекула	Ba
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	3510
Температура плавления, °C	725
Температура кипения, °C	1140
Степень окисления	+2
Потенциал ионизации, эВ	5,211
Конфигурация внешних электронов	6s <sup>2</sup>

### Лантан

Атомный номер	57
Атомная масса	138,9055
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	24
массовые числа	125—148
Число природных изотопов	2
массовые числа	138p 139
содержание в природной смеси, %	0,089 99,911

Молекула	La
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	6150
Температура плавления, °C	920
Температура кипения, °C	3470
Степень окисления	+3
Потенциал ионизации, эВ	5,615
Конфигурация внешних электронов	5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>

### Церий

Атомный номер	58
Атомная масса	140,12
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	24
массовые числа	128—151
Число природных изотопов	4
массовые числа	136 138 140 142
содержание в природной смеси, %	0,193 0,250 88,48 11,07

Молекула	Ce
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	6670
Температура плавления, °C	795
Температура кипения, °C	3468
Степень окисления	+3, +4
Потенциал ионизации, эВ	6,54
Конфигурация внешних электронов	4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>

### Празеодим

Атомный номер	59
Атомная масса	140,9077
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	22
массовые числа	121, 129, 130, 133—151
Число природных изотопов	1
массовое число	141
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Pr
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	6770
Температура плавления, °C	935
Температура кипения, °C	3127
Степени окисления	+3, +4



Потенциал ионизации, эВ 5,76  
Конфигурация внешних электронов  $4f^3 6s^2$

### Неодим

Атомный номер 60  
Атомная масса 144,24  
Органолептические свойства Серебристо-белый металл  
Число известных изотопов 24  
массовые числа 129, 130 132—152, 154  
Число природных изотопов 7  
массовые числа 142 143 144p 145 146  
содержание в природной смеси, % 27,11 12,17 23,85 8,30 17,22  
массовые числа 148 150  
содержание в природной смеси, % 5,73 5,62  
Молекула Nd  
Плотность, кг/м<sup>3</sup> 7000  
Температура плавления, °C 1024  
Температура кипения, °C 3027  
Степень окисления +3  
Потенциал ионизации, эВ 5,46  
Конфигурация внешних электронов  $4f^4 6s^2$

### Прометий

Атомный номер 61  
Атомная масса 145  
Органолептические свойства Серебристо-белый металл  
Число известных изотопов 23  
массовые числа 132—154  
Число природных изотопов 1 (радиоактивный изотоп <sup>147</sup>Pm обнаружен в урановых рудах в соотношении  $4 \cdot 10^{-15}$  г на 1 кг руды)  
Молекула Pm  
Плотность, кг/м<sup>3</sup> 7260  
Температура плавления, °C 1035  
Температура кипения, °C 2730  
Степень окисления +3  
Потенциал ионизации, эВ Точно не определен  
Конфигурация внешних электронов  $4f^5 6s^2$

### Самарий

Атомный номер 62  
Атомная масса 150,4  
Органолептические свойства Серебристо-белый металл  
Число известных изотопов 24  
массовые числа 133—135, 137—157  
Число природных изотопов 7  
массовые числа 144 147p 148p 149p 150  
содержание в природной смеси, % 3,09 14,97 11,24 13,83 7,44  
массовые числа 152 154  
содержание в природной смеси, % 26,72 22,71  
Молекула Sm  
Плотность, кг/м<sup>3</sup> 7540  
Температура плавления, °C 1072  
Температура кипения, °C 1900  
Степени окисления +2, +3  
Потенциал ионизации, эВ 5,7  
Конфигурация внешних электронов  $4f^6 6s^2$

### Европий

Атомный номер 63  
Атомная масса 151,96  
Органолептические свойства Серебристо-белый металл  
Число известных изотопов 23  
массовые числа 138—160  
Число природных изотопов 2  
массовые числа 151 153  
содержание в природной смеси, % 47,82 52,18  
Молекула Eu  
Плотность, кг/м<sup>3</sup> 5259  
Температура плавления, °C 826  
Температура кипения, °C 1439  
Степени окисления +2, +3  
Потенциал ионизации, эВ 5,68  
Конфигурация внешних электронов  $4f^7 6s^2$

### Гадолиний

Атомный номер 64  
Атомная масса 157,25

Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	20
массовые числа	143—162
Число природных изотопов	7
массовые числа	152p 154 155 156 157
содержание в природной смеси, %	0,20 2,15 14,73 20,47 15,68
массовые числа	158 160
содержание в природной смеси, %	24,87 21,9

Молекула	Gd
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7895
Температура плавления, °C	1312
Температура кипения, °C	3000
Степень окисления	+3
Потенциал ионизации, эВ	6,16
Конфигурация внешних электронов	4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>

#### Тербий

Атомный номер	65
Атомная масса	158,9254
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	19
массовые числа	146—164
Число природных изотопов	1
массовое число	159
содержание в природной смеси, %	100

Молекула	Tb
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8270
Температура плавления, °C	1356
Температура кипения, °C	2800
Степени окисления	+3, +4
Потенциал ионизации, эВ	6,74
Конфигурация внешних электронов	4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>

#### Диспрозий

Атомный номер	66
Атомная масса	162,50
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	21
массовые числа	147—167

Число природных изотопов	7
массовые числа	156 158 160 161 162
содержание в природной смеси, %	0,052 0,09 2,29 18,88 25,53
массовые числа	163 164
содержание в природной смеси, %	24,97 28,18

Молекула	Dy
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8536
Температура плавления, °C	1407
Температура кипения, °C	2600
Степень окисления	+3
Потенциал ионизации, эВ	5,80
Конфигурация внешних электронов	4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>

#### Гольмий

Атомный номер	67
Атомная масса	164,9303
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	21
массовые числа	150—170
Число природных изотопов	1
массовое число	165
содержание в природной смеси, %	100

Молекула	Ho
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8800
Температура плавления, °C	1461
Температура кипения, °C	2600
Степень окисления	+3
Потенциал ионизации, эВ	6, 19
Конфигурация внешних электронов	4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup>

#### Эрбий

Атомный номер	68
Атомная масса	167,26
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	23
массовые числа	151—173
Число природных изотопов	6
массовые числа	162 164 166 167
содержание в природной смеси, %	0,136 1,56 33,41 22,94

массовые числа	168	170
содержание в природной смеси, %	27,07	14,88
<b>Молекула</b>	<b>Er</b>	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	9050	
Температура плавления, °C	1497	
Температура кипения, °C	2900	
Степень окисления	+3	
Потенциал ионизации, эВ	6,3	
Конфигурация внешних электронов	4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup>	
<b>Тулий</b>		
Атомный номер	69	
Атомная масса	168,9342	
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл	
Число известных изотопов	25	
массовые числа	152—176	
Число природных изотопов	1	
массовое число	169	
содержание в природной смеси, %	100	
<b>Молекула</b>	<b>Tm</b>	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	9330	
Температура плавления, °C	1545	
Температура кипения, °C	1727	
Степень окисления	+3	
Потенциал ионизации, эВ	5,81	
Конфигурация внешних электронов	4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup>	
<b>Иттербий</b>		
Атомный номер	70	
Атомная масса	173,04	
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл	
Число известных изотопов	27	
массовые числа	152—178	
Число природных изотопов	7	
массовые числа	168	170 171 172 173
содержание в природной смеси, %	0,135	3,03 14,31 21,82 16,13
массовые числа	174	176
содержание в природной смеси, %	31,84	12,73

<b>Молекула</b>	<b>Yb</b>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	6980
Температура плавления, °C	824
Температура кипения, °C	1427
Степени окисления	+2, +3
Потенциал ионизации, эВ	6,12
Конфигурация внешних электронов	4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>

**Лютеций**

Атомный номер	71
Атомная масса	174,967
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	23
массовые числа	151, 153—156, 162, 164—180
Число природных изотопов	2
массовые числа	175 176p
содержание в природной смеси, %	97,41 2,59
<b>Молекула</b>	<b>Lu</b>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	9850
Температура плавления, °C	1652
Температура кипения, °C	3327
Степень окисления	+3
Потенциал ионизации, эВ	5,41
Конфигурация внешних электронов	4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>

**Гафний**

Атомный номер	72
Атомная масса	178,49
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	27
массовые числа	154—161, 166—184
Число природных изотопов	6
массовые числа	174p 176 177 178
содержание в природной смеси, %	0,18 5,15 18,39 27,08
массовые числа	179 180
содержание в природной смеси, %	13,78 35,44
<b>Молекула</b>	<b>Hf</b>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	13 200
Температура плавления, °C	2150

Температура кипения, °С	5400
Степени окисления	+2, +3, +4 (чаще всего)
Потенциал ионизации, эВ	7,003
Конфигурация внешних электронов	5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup>

#### Тантал

Атомный номер	73
Атомная масса	180,9479
Органолептические свойства	Светло-серый тяжелый металл с синеватым отливом
Число известных изотопов	26
массовые числа	157—161, 166—186
Число природных изотопов	2
массовые числа	180p 181
содержание в природной смеси, %	0,0123 99,9877
Молекула	Ta
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	16 600
Температура плавления, °С	2997
Температура кипения, °С	5425
Степень окисления	+5
Потенциал ионизации, эВ	7,883
Конфигурация внешних электронов	5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>

#### Вольфрам

Атомный номер	74
Атомная масса	183,85
Органолептические свойства	Светло-серый тяжелый металл
Число известных изотопов	29
массовые числа	158—160, 162—166, 170—190
Число природных изотопов	5
массовые числа	180 182 183 184 186
содержание в природной смеси, %	0,14 26,41 14,40 30,64 28,41
Молекула	W
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	19 300
Температура плавления, °С	3400
Температура кипения, °С	5900
Степени окисления	+2, +3, +4, +5, +6 (чаще всего)

Потенциал ионизации, эВ	7,98
Конфигурация внешних электронов	5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>

#### Рений

Атомный номер	75
Атомная масса	186,2
Органолептические свойства	Светло-серый тяжелый металл
Число известных изотопов	26
массовые числа	161—165, 170, 172, 174—192
Число природных изотопов	2
массовые числа	185 187p
содержание в природной смеси, %	37,07 62,93
Молекула	Re
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	21 000
Температура плавления, °С	3180
Температура кипения, °С	5625
Степени окисления	от -1 до +7 (последняя самая характерная)

Потенциал ионизации, эВ	7,875
Конфигурация внешних электронов	5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>

#### Осмий

Атомный номер	76
Атомная масса	190,2
Органолептические свойства	Тяжелый серебристо-белый металл
Число известных изотопов	33
массовые числа	163—167, 169—196
Число природных изотопов	7
массовые числа	184 186 187 188 189
содержание в природной смеси, %	0,018 1,59 1,64 13,3 16,1
массовые числа	190 192
содержание в природной смеси, %	26,4 41,0
Молекула	Os
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	22 500
Температура плавления, °С	3000
Температура кипения, °С	5000
Степени окисления	+2, +3, +4, +6, +8



Потенциал ионизации, эВ 8,7  
 Конфигурация внешних электронов  $5d^46s^2$

### Иридий

Атомный номер 77  
 Атомная масса 192,22  
 Органолептические свойства Тяжелый серебристо-белый металл  
 Число известных изотопов 31  
 массовые числа 168—198  
 Число природных изотопов 2  
 массовые числа 191 193  
 содержание в природной смеси, % 37,3 62,7  
 Молекула Ir  
 Плотность, кг/м<sup>3</sup> 22 420  
 Температура плавления, °C 2410  
 Температура кипения, °C 4500  
 Степени окисления +3, +4, +6, реже +1 и +2  
 Потенциал ионизации, эВ 9,0  
 Конфигурация внешних электронов  $5d^76s^2$

### Платина

Атомный номер 78  
 Атомная масса 195,09  
 Органолептические свойства Тяжелый серебристо-белый металл  
 Число известных изотопов 33  
 массовые числа 168—171, 173—201  
 Число природных изотопов 6  
 массовые числа 190 192 194 195 196 198  
 содержание в природной смеси, % 0,0127 0,78 32,9 33,8 25,3 7,21  
 Молекула Pt  
 Плотность, кг/м<sup>3</sup> 21450  
 Температура плавления, °C 1769  
 Температура кипения, °C 3800  
 Степени окисления +2, +4, реже +3  
 Потенциал ионизации, эВ 8,962  
 Конфигурация внешних электронов  $5d^96s^1$

### Золото

Атомный номер 79  
 Атомная масса 196,9665  
 Органолептические свойства Тяжелый желтый блестящий металл  
 Число известных изотопов 29  
 массовые числа 175—179, 181—204  
 Число природных изотопов 1  
 массовое число 197  
 содержание в природной смеси, % 100  
 Молекула Au  
 Плотность, кг/м<sup>3</sup> 19 320  
 Температура плавления, °C 1063  
 Температура кипения, °C 2966  
 Степени окисления +1, +3  
 Потенциал ионизации, эВ 9,223  
 Конфигурация внешних электронов  $5d^{10}6s^1$

### Ртуть

Атомный номер 80  
 Атомная масса 200,59  
 Органолептические свойства Тяжелая серебристо-белая жидкость с металлическим блеском  
 Число известных изотопов 30  
 массовые числа 177—206  
 Число природных изотопов 7  
 массовые числа 196 198 199 200 201  
 содержание в природной смеси, % 0,146 10,02 16,84 23,13 13,22  
 массовые числа 202 204  
 содержание в природной смеси, % 29,80 6,85  
 Молекула Hg  
 Плотность, кг/м<sup>3</sup> 13 546  
 Температура плавления, °C —38,87  
 Температура кипения, °C 356,9  
 Степень окисления +2  
 Потенциал ионизации, эВ 10,44  
 Конфигурация внешних электронов  $5d^{10}6s^2$

<b>Таллий</b>	
Атомный номер	81
Атомная масса	204,37
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	18
массовые числа	184—201
Число природных изотопов	2
массовые числа	203    205
содержание в природной смеси, %	29,50   70,50
Молекула	Tl
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	11 850
Температура плавления, °C	304
Температура кипения, °C	1457
Степени окисления	+1, +3
Потенциал ионизации, эВ	6,103
Конфигурация внешних электронов	6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup>
<b>Свинец</b>	
Атомный номер	82
Атомная масса	207,2
Органолептические свойства	Тяжелый мягкий металл темно-серого цвета с синеватым оттенком
Число известных изотопов	30
массовые числа	185—214
Число природных изотопов	4
массовые числа	204   206   207   208
содержание в природной смеси, %	1,48   23,6   22,6   52,3
Молекула	Pb
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	11 340
Температура плавления, °C	327,4
Температура кипения, °C	1744
Степени окисления	+2, +4
Потенциал ионизации, эВ	7,417
Конфигурация внешних электронов	6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>
<b>Висмут</b>	
Атомный номер	83
Атомная масса	208,9806
Органолептические свойства	Тяжелый металл белого цвета с розоватым оттенком

Число известных изотопов	27
массовые числа	189—215
Число природных изотопов	1
массовое число	209
содержание в природной смеси, %	100
Молекула	Bi
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	9800
Температура плавления, °C	271,3
Температура кипения, °C	1560
Степени окисления	+3, +5 (чаще всего), +2, +4 (реже)
Потенциал ионизации, эВ	7,289
Конфигурация внешних электронов	6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup>
<b>Полоний</b>	
Атомный номер	84
Органолептические свойства	Мягкий серебристо-белый металл
Число известных изотопов	26
Массовые числа	
изотопов	193—218
изомеров	195, 199, 201, 203, 207, 211, 212
Самый стабильный изотоп	
массовое число	210
период полураспада, дни	138,39
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	9300
Температура плавления, °C	254
Температура кипения, °C	962
Степени окисления	-2, +2, +4, +6
Потенциал ионизации, эВ	8,42
Конфигурация внешних электронов	6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup>
<b>Астат</b>	
Атомный номер	85
Органолептические свойства	Металл, очевидно, серебристо-белый (в видимых количествах не получен)
Число известных изотопов	24
Массовые числа	
изотопов	196—219
изомеров	198, 200, 212, 216

Самый стабильный изотоп	
массовое число	210
период полураспада, часы	8,3
виды распада	(э. в. + $\beta^+$ ) > 99%; $\alpha \sim 0,17\%$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7000
Температура плавления, °С	299
Температура кипения, °С	411
Степени окисления	-1, +1, +3, +5, +7
Потенциал ионизации, эВ	9,2
Конфигурация внешних электронов	6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup>

<b>Радон</b>	
Атомный номер	86
Органолептические свойства	Газ без цвета, запаха и вкуса
Число известных изотопов	27
Массовые числа	
изотопов	200—226
изомеров	201, 203
Самый стабильный изотоп	
массовое число	222
период полураспада, дни	3,824
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	9,73
Температура плавления, °С	-71
Температура кипения, °С	-61,8
Степени окисления	Экспериментально не определены, предположительно +4, +6, +8
Потенциал ионизации, эВ	10,75
Конфигурация внешних электронов	6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup>

<b>Франций</b>	
Атомный номер	87
Органолептические свойства	Не установлены
Число известных изотопов	27
Массовые числа	
изотопов	203—229
изомеров	214
Самый стабильный изотоп	
массовое число	223
период полураспада, мин	2,18
виды распада	$\beta^- < 99\%$ , $\alpha \sim 0,005\%$

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2480	} расчетные величины
Температура плавления, °С	8	
Температура кипения, °С	620	
Степень окисления	+1	
Потенциал ионизации, эВ	3,98	
Конфигурация внешних электронов	7s <sup>1</sup>	

<b>Радий</b>	
Атомный номер	88
Органолептические свойства	Серебристо-белый блестящий металл
Число известных изотопов	25
Массовые числа	
изотопов	206—230
изомеров	213
Самый стабильный изотоп	
массовое число	226
период полураспада, годы	1600
вид распада	$\alpha$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	5500
Температура плавления, °С	700
Температура кипения, °С	1529
Степень окисления	+2
Потенциал ионизации, эВ	5,279
Конфигурация внешних электронов	7s <sup>2</sup>

<b>Активный</b>	
Атомный номер	89
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	24
Массовые числа	
изотопов	209—232
изомеров	216, 222
Самый стабильный изотоп	
массовое число	225
период полураспада, дни	10
вид распада	$\alpha$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	10 070
Температура плавления, °С	1040 ± 50
Температура кипения, °С	3200 (расчетная)
Степени окисления	-1, +1, +5

Потенциал ионизации, эВ	5,2
Конфигурация внешних электронов	$6d^17s^2$
<b>Торий</b>	
Атомный номер	90
Органолептические свойства	Серебристо-белый металл
Число известных изотопов	24
массовые числа	213—236
Самый стабильный изотоп	
массовое число	232
периоды полураспада, годы	
α-распад	$1,41 \cdot 10^{10}$
спонтанное деление	$10^{21}$
эффективное сечение захвата тепловых нейтронов, барн	7,4
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	11 720
Температура плавления, °C	1696
Температура кипения, °C	3862
Степени окисления	+2, +3, +4 (чаще всего)
Потенциал ионизации, эВ	6,08
Конфигурация внешних электронов	$6d^27s^2$

<b>Протактиний</b>	
Атомный номер	91
Органолептические свойства	Блестящий светло-серый металл
Число известных изотопов	19
Массовые числа	
изотопов	216, 217, 222—238
изомеров	234
Самый стабильный изотоп	
массовое число	231
период полураспада, годы	$3,28 \cdot 10^4$
эффективное сечение захвата тепловых нейтронов, барн	200
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	15 400
Температура плавления, °C	1500
Температура кипения, °C	3327
Степени окисления	от +2 до +5
Потенциал ионизации, эВ	5,89
Конфигурация внешних электронов	$5f^26d^17s^2$

<b>Уран</b>			
Атомный номер	92		
Органолептические свойства	Белый тяжелый металл		
Число известных изотопов	15		
Массовые числа			
изотопов	226—240		
изомеров	235		
делящихся изомеров	235, 236, 238		
Самый стабильный изотоп			
массовое число	238		
Важнейшие изотопы			
массовые числа	233	235	238
периоды полураспада, годы			
α-распад	$1,59 \cdot 10^5$	$7,04 \cdot 10^8$	$4,47 \cdot 10^9$
спонтанное деление	$1,2 \cdot 10^{17}$	$3,5 \cdot 10^{17}$	$8,19 \cdot 10^{16}$
эффективные сечения захвата тепловых нейтронов, барн	46	98	2,7
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	19 050		
Температура плавления, °C	1132		
Температура кипения, °C	3818		
Степени окисления	+3, +4, +5, +6 (иногда +2)		
Потенциал ионизации, эВ	6,05		
Конфигурация внешних электронов	$4f^36d^17s^2$		

<b>Нептуний</b>			
Атомный номер	93		
Органолептические свойства	Тяжелый мягкий металл с серебристым блеском		
Число известных изотопов	14		
Массовые числа			
изотопов	228—241		
изомеров	240		
делящихся изомеров	237, 238		
Самый стабильный изотоп			
массовое число	237		
периоды полураспада, годы			
α-распад	$2,14 \cdot 10^6$		
спонтанное деление	$>10^{18}$		
эффективное сечение захвата тепловых нейтронов, барн	180		
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	20 000		
Температура плавления, °C	640		



Температура кипения, °C	3727
Степени окисления	от +2 до +7
Потенциал ионизации, эВ	6,19
Конфигурация внешних электронов	$5f^6d^17s^2$

### Плутоний

Атомный номер	94
Органолептические свойства	Тяжелый блестящий белый металл
Число известных изотопов	15
Массовые числа	
изотопов	232—246
изомеров	237
делящихся изомеров	237—244
Самый стабильный изотоп	
массовое число	244
период полураспада, годы	$8,05 \cdot 10^7$
Важнейшие изотопы	
массовые числа	238      239      242
периоды полураспада, годы	
$\alpha$ -распад	87,74 $92,41 \cdot 10^4$ $3,76 \cdot 10^5$
спонтанное деление	$4,77 \cdot 10^{10}$ $95,50 \cdot 10^{15}$ $6,75 \cdot 10^{16}$
эффективное сечение захвата тепловых нейтронов, бари	500      271      19
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	19 816
Температура плавления, °C	640
Температура кипения, °C	3230
Степени окисления	от +2 до +7
Потенциал ионизации, эВ	6,06
Конфигурация внешних электронов	$5f^67s^2$

### Америций

Атомный номер	95
Органолептические свойства	Серебристо-белый ковкий металл
Число известных изотопов	15
Массовые числа	
изотопов	232, 234—247
изомеров	242, 244
делящихся изомеров	235, 236
Самый стабильный изотоп	
массовое число	243

период полураспада, годы	$7,37 \cdot 10^8$
Важнейший изотоп	
массовое число	241
периоды полураспада, годы	
$\alpha$ -распад	433
спонтанное деление	$1,147 \cdot 10^{14}$
эффективное сечение захвата тепловых нейтронов, бари	86
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	13 670
Температура плавления, °C	995
Температура кипения, °C	2607
Степени окисления	от +2 до +7
Потенциал ионизации, эВ	5,99
Конфигурация внешних электронов	$5f^77s^2$

### Кюрий

Атомный номер	96
Органолептические свойства	Блестящий серебристый металл
Число известных изотопов	15
Массовые числа	
изотопов	238—252
делящихся изомеров	240—245
Самый стабильный изотоп	
массовое число	247
период полураспада, годы	$1,6 \cdot 10^7$
Важнейшие изотопы	
массовые числа	244    245    248
периоды полураспада, годы	
$\alpha$ -распад	18,11 $8,5 \cdot 10^3$ $3,5 \cdot 10^5$
спонтанное деление	$1,345 \cdot 10^7$ — $3,9 \cdot 10^6$
эффективное сечение захвата тепловых нейтронов, бари	14,0      350      —
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	13 000
Температура плавления, °C	1340
Степени окисления	+3, +4, +6
Потенциал ионизации, эВ	6,02
Конфигурация внешних электронов	$5f^6d^17s^2$

### Берклий

Атомный номер	97
Органолептические свойства	Серебристый металл

Число известных изотопов	11
Массовые числа	
изотопов	240, 242—251
делящихся изомеров	242—245
Самый стабильный изотоп	
массовое число	247
период полураспада, годы	$1,4 \cdot 10^3$
Важнейший изотоп	
массовое число	249
период $\alpha$ -распада, дни	321
эффективное сечение захвата тепловых нейтронов, барн	1000
Температура плавления, °C	986
Степени окисления	+3, +4
Потенциал ионизации, эВ	6,23
Конфигурация внешних электро- нов	$5f^8 6d^1 7s^2$
<b>Калифорний</b>	
Атомный номер	98
Органолептические свойства	Белый металл
Число известных изотопов	17
Массовые числа	
изотопов	240—256
делящихся изомеров	246
Самый стабильный изотоп	
массовое число	251
период полураспада, годы	900
Важнейшие изотопы	
массовые числа	249 252 254
период полураспада, годы	
$\alpha$ -распад	351 2,64 —
спонтанное деление	— 60 0,17
эффективное сечение захвата тепловых нейтронов, барн	480 20 —
Степени окисления	+2, +3, +4, +5, +6
Потенциал ионизации, эВ	6,3
Конфигурация внешних электро- нов	$5f^{10} 7s^2$
<b>Эйнштейний</b>	
Атомный номер	99
Число известных изотопов	14
Массовые числа	

изотопов	243—256
изомеров	254
Самый стабильный изотоп	
массовое число	252
период полураспада, дни	472
виды распада	$\alpha$ 78%, $\beta$ з. 22%
Степень окисления	+3
Потенциал ионизации, эВ	6,42
Конфигурация внешних электро- нов	$5f^{11} 7s^2$
<b>Фермий</b>	
Атомный номер	100
Число известных изотопов	17
Массовые числа	
изотопов	242, 244—259
изомеров	250
Самый стабильный изотоп	
массовое число	257
период полураспада, дни	100,5
виды распада	$\alpha$ 99%, с. д. 0,21%
Степени окисления	+2, +3
Потенциал ионизации, эВ	6,5
Конфигурация внешних электро- нов	$5f^{12} 7s^2$
<b>Менделевий</b>	
Атомный номер	101
Число известных изотопов	11
массовые числа	248—252, 254—259
Самый стабильный изотоп	
массовое число	258
период полураспада, дни	56
Степени окисления	+1, +2, +3
Потенциал ионизации, эВ	6,5
Конфигурация внешних электро- нов	$5f^{13} 7s^2$
<b>Нобелий</b>	
Атомный номер	102
Число известных изотопов	10
Массовые числа	
изотопов	250—259
изомеров	254

Самый стабильный изотоп	
массовое число	259
период полураспада, мин	58
виды распада	$\alpha$ 78%, $\beta$ з. 22%
Степени окисления	+2, +3
Потенциал ионизации, эВ	6,65
Конфигурация внешних электронов	$5f^{14}7s^2$

#### Лоуренсий

Атомный номер	103
Число известных изотопов	9
массовые числа	252—260
Самый стабильный изотоп	
массовое число	260
период полураспада, мин	3
Степень окисления	+3
Потенциал ионизации, эВ	5,83
Конфигурация внешних электронов	$5f^{14}6d^{17}s^2$

#### Курчатовий

Атомный номер	104
Число известных изотопов	9
массовые числа	253—261
Самый стабильный изотоп	
массовое число	261
период полураспада, мин	1,1
Плотность, $\text{кг/м}^3$	17 000 (расчетная)
Степени окисления	+4, возможны +2, +3
Потенциал ионизации атома, эВ	5,1
Конфигурация внешних электронов	$6d^27s^2$

#### Нильсборий

Атомный номер	105
Число известных изотопов	6
массовые числа	255, 257, 258, 260—262
Самый стабильный изотоп	
массовое число	262
период полураспада, сек	40
Плотность, $\text{кг/м}^3$	21,600 (расчетная)
Степени окисления	+3, +4, +5

Потенциал ионизации, эВ	6,2
Конфигурация внешних электронов	$6d^37s^2$

#### Экавольфрам

Атомный номер	106
Число известных изотопов	2
массовые числа	259, 263
Самый стабильный изотоп	
массовое число	263
период полураспада, сек	0,9
Плотность, $\text{кг/м}^3$	23 200 (расчетная)
Степени окисления	+3, +4, +6
Потенциал ионизации атома, эВ	7,1
Конфигурация внешних электронов	$6d^47s^2$

#### Экарений

Атомный номер	107
Число известных изотопов	2
массовые числа	261, 262
Самый стабильный изотоп	
массовое число	262
период полураспада, мсек	около 4,2
Плотность, $\text{кг/м}^3$	27 200 (расчетная)
Степени окисления	+5, +6, +7
Потенциал ионизации, эВ	6,9 (расчетный)
Конфигурация внешних электронов	$6d^57s^2$

## ЧТО ЕСТЬ ЧТО

Международная система единиц (СИ) с 1 января 1980 г. стала обязательной во всех изданиях, посвященных науке и технике. Однако есть целый ряд терминов и названий единиц физических измерений, применение которых допустимо наряду с единицами СИ: тонна, минута, градус (единица измерения углов) и градус Цельсия, литр, диоптрия, парсек, электронвольт и т. д. К тому же все разделы «Популярной библиотеки химических элементов» пи-

сались до принятия СТАНДАРТА СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин». Поэтому для удобства пересчета, для удобства читателей — как тех, кто уже привык к единицам СИ, так и тех, для кого привычнее атмосферы, барны и другие единицы применявшихся прежде систем, — в табл. 1 даны соотношения соответствующих единиц измерения в разных системах. Печатаем также таблицу множителей и приставок, рекомендуемых СИ для образования кратных и дольных десятичных единиц (табл. 2). В табл. 3 даны названия некоторых неорганических соединений в соответствии с международной и русской номенклатурой.

Таблица 1

Единицы измерения физических величин

Физическая величина	Единицы СИ		Единицы других систем*
	название	обозначение	
Время	секунда	с	час (3600), сутки (86 400) год (3,1557 · 10 <sup>7</sup> )
Длина	метр	м	ангстрем (10 <sup>-10</sup> ), микрон (10 <sup>-6</sup> )
Площадь	квадратный метр	м <sup>2</sup>	барн (10 <sup>-28</sup> ), гектар (10 <sup>4</sup> )
Масса	килограмм	кг	тонна (10 <sup>3</sup> ), атомная ед. массы (1,6603 · 10 <sup>-27</sup> ), карат (2 · 10 <sup>-4</sup> )
Сила	ньютон	Н	дина (10 <sup>-5</sup> )
Давление	паскаль	Па	миллиметр ртутного столба (133,322), атмосфера техническая (9,80665 · 10 <sup>4</sup> ), атмосфера физическая (1,01325 · 10 <sup>5</sup> )
Работа, энергия	джоуль	Дж	электронвольт (1,60207 · 10 <sup>-19</sup> ), калория (4,1868)
Мощность	ватт	Вт	лошадиная сила (735,499), эрг в секунду (10 <sup>-7</sup> )
Динамическая вязкость	паскаль × секунда	Па · с	пуаз (0,1)
Температура	кельвин**	К	градус Цельсия (прибавить 273,15)

\* В скобках даны коэффициенты, с помощью которых встречающиеся в книге единицы измерения простым умножением переводятся в единицы СИ.

\*\* Знак ° при обозначении температуры в кельвинах не ставится.

Таблица 2

Принятые в СИ приставки для обозначения десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Символ	Множитель	Приставка	Символ	Множитель
тера	Т	10 <sup>12</sup>	пико	п	10 <sup>-12</sup>
гига	Г	10 <sup>9</sup>	нано	н	10 <sup>-9</sup>
мега	М	10 <sup>6</sup>	микро	мк	10 <sup>-6</sup>
кило	к	10 <sup>3</sup>	милли	м	10 <sup>-3</sup>

Таблица 3

Названия неорганических соединений в соответствии с международной и русской номенклатурой

Международная	Русская
оксид (в скобках римскими цифрами указывается степень окисления электроположительного элемента)	закись (высший оксид) окись (высший) используются также приставки, указывающие на число атомов кислорода в молекуле: двуокись, трехокись и т. п.
гидрид пероксид гидроксид	гидрид, . . . -истый водород перекись гидроокись, гидрат окиси (закиси)
Названия солей составляются из названия аниона в именительном падеже и катиона в родительном падеже	



## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абдуллаев Г. Б. I: 447  
 Авдеев И. В. I: 52  
 Авиценна (Абу Али ибн Сина).  
 I: 345; II: 249, 260  
 Агладзе Р. И. I: 322  
 Агрикола Г. I: 233, 332, 345, 400;  
 II: 52, 274  
 Агресс М. II: 345  
 Адлов Ж. II: 313, 468  
 Азимов А. I: 31  
 Акспиль II: 93, 94  
 Аллен А. I: 107  
 Аллисон Ф. II: 294, 310  
 Альберт Великий. I: 317  
 Альтман М. Б. I: 193  
 Амальди Э. II: 378-380  
 Ампер А. I: 133  
 Андерсон. II: 104  
 Андреев И. А. I: 39  
 Андрианов К. А. I: 208  
 Аносов П. II: 329, 330  
 Антипов И. А. II: 255, 328  
 Антонов О. К. I: 189  
 Антропофф. I: 147  
 Ашпер Ф. II: 50  
 Аристотель. I: 162, 329, 397;  
 II: 249  
 Аркадьев В. К. II: 265  
 Аркель ван. I: 288, 290, 498  
 Аррениус К. I: 487  
 Арсланова Н. К. II: 223  
 Артоваара. II: 201  
 Арфведсон И. А. I: 40, 41, 42  
 Архимед. II: 234  
 Астон Ф. II: 366  
 Аткинс Г. I: 106  
 Баббит И. II: 50  
 Бакуль В. Н. I: 89  
 Баландин А. А. I: 547  
 Балар А. Ж. I: 304, 450, 451, 452  
 Балахонцев Г. А. I: 194  
 Бардин Дж. II: 439  
 Бартлетт Н. I: 147, II: 83  
 Бауман Э. II: 76  
 Башилов И. Я. II: 223, 326  
 Бекетов Н. Н. I: 198, 205, 276,  
 308; II: 8, 93  
 Беккер Г. I: 55  
 Беккерель А. А. II: 320, 321, 351,  
 353  
 Белов А. Ф. I: 194  
 Берг. II: 191  
 Бергман Т. I: 365; II: 61  
 Бернерт Т. II: 295  
 Берсенева А. Г. I: 345  
 Берсенева И. С. II: 223  
 Бертолле К. I: 106, 240  
 Бессемер Г. I: 323, 335  
 Берцелиус П. Я. I: 18, 40, 42,  
 202, 205, 246, 283, 286, 297, 304,  
 442, 451, 497, 498, 516, 543;  
 II: 101, 109, 125, 169, 170, 209,  
 251, 274, 333, 334  
 Бете Г. I: 31  
 Биркеланд Х. I: 105  
 Блинова Е. А. II: 223  
 Бломстранд К. I: 506  
 Блэк Д. I: 97, 98  
 Богоявленский Л. Н. II: 326  
 Богусский И. II: 284  
 Бойль Р. I: 213; II: 4  
 Болтон. II: 171

Больштедт А. I: 429  
 Бор Н. I: 19; II: 162, 373, 374, 387,  
 407, 485, 486, 494  
 Боте В. I: 55  
 Бош К. I: 107  
 Бранд Г. I: 212, 213, 216, 221  
 Брандт Г. I: 347, 348, 361, 362  
 Браун И. А. II: 252  
 Браунер Б. Ф. I: 61; II: 69, 115,  
 132, 161  
 Брейтхаупт. II: 161  
 Бриджмен П. I: 214, 217  
 Брипель Ю. II: 177  
 Буабодран Л. П. Э. I: 153, 283,  
 407, 408, 409, 413, 414; II: 3,  
 114, 138, 139, 143, 144, 149,  
 150, 160  
 Буанэ. II: 77  
 Бунзен Р. В. I: 42, 164, 300, 470,  
 471, 472, 474, 476, 477; II: 8,  
 32, 33, 40, 93, 99, 149  
 Бурде. I: 288, 290, 498  
 Бургаве Г. I: 361  
 Буссенго Ж. I: 102  
 Буталов В. А. I: 186  
 Бутлеров А. М. I: 94  
 Быкова А. В. I: 495  
 Бюсси А. I: 51, 170  
 Бюффон Ж. II: 216  
 Вагнер Э. II: 293  
 Вайнер Э. II: 310  
 Вайнсток. I: 149  
 Вайола В. II: 485  
 Вайяр. II: 89  
 Василий Валентин. II: 52.  
 Вейденхаммер. I: 348  
 Вейнтрауб Э. I: 67  
 Вейцекер. I: 31  
 Вельсбах А. К. II: 114, 126, 132,  
 158, 160, 335  
 Вернер. I: 543, 546; II: 162  
 Верещагин Л. Ф. I: 26, 76, 89  
 Вернадский В. И. I: 100; II: 80,  
 281, 321, 325  
 Вестон. II: 31  
 Вёлер Ф. I: 51, 66, 67, 94, 179,  
 246, 286, 295, 296, 304, 488;  
 II: 169, 170  
 Видманштеттен А. I: 371  
 Вийяр П. I: 249; II: 354  
 Вильм А. I: 184, 187  
 Винклер К. I: 283, 416, 417, 418,  
 423, 426, 427; II: 40, 387  
 Виноградов А. П. I: 129, 485;  
 II: 155, 192  
 Виноградский С. Н. I: 111  
 Витеринг У. II: 101  
 Воинов С. Г. I: 340  
 Воклен Л. Н. I: 50, 51, 305, 306,  
 451; II: 10, 63, 203  
 Волластон У. Г. I: 286, 550, 551,  
 560, 561-563, 567, 568; II: 202,  
 208, 217  
 Вольшин М. Е. I: 107  
 Вольфкович С. И. I: 219, 221  
 Воронков А. А. I: 495  
 Воронков М. Г. I: 209  
 Воронов С. М. I: 194  
 Вул Б. М. II: 104  
 Габер Ф. I: 107  
 Гадолин Ю. I: 487, 488; II: 109,  
 139, 144, 145, 418  
 Гадфилд. I: 323  
 Гайсинский М. И. II: 330, 389,  
 390, 418, 468  
 Гален К. I: 345  
 Галилей Г. II: 377  
 Гампе В. I: 66, 67  
 Ган О. I: 458; II: 65, 295, 311,  
 343, 344, 345, 355, 373, 381,  
 382, 485  
 Ган Ю. Г. I: 213, 214, 317, 318,  
 442; II: 101  
 Ганквич А. I: 213  
 Гарвей Б. II: 446, 450, 451

- Гебер (Джабир ибн Хайяна). I: 239, 428
- Гейгер Г. I: 437; II: 377, 379
- Гей-Люссак Ж. Л. I: 65, 66, 134, 164, 240, 451; II: 72
- Гейровский Я. II: 192
- Гейслер О. I: 326
- Гексли Т. I: 104
- Гельман А. Д. II: 388-391
- Гельмонт ван. I: 239
- Генсинг. I: 213, 214
- Генперт-Майер М. II: 507
- Герлинг Э. К. I: 252
- Герман Р. II: 138
- Геродот. I: 233
- Гесс В. Ф. II: 311
- Гесс Г. И. I: 266
- Гецелев З. Н. I: 194
- Гёрлинг О. II: 344, 345
- Гизе Ф. И. I: 51
- Гизель Ф. II: 329
- Гиллебранд У. Ф. II: 125, 127
- Гиорсо А. II: 296, 406, 418, 423, 428, 446, 450, 451-453, 460, 480, 481, 507-509
- Глаубер И. Р. I: 103, 111, 235
- Глебова В. И. I: 523
- Гленденан Л. II: 137
- Гмелин Л. I: 42
- Голованов Ю. Н. II: 223
- Головкин В. Г. I: 194
- Гольдванский В. И. II: 480, 506
- Гольдшмидт В. М. I: 506; II: 118
- Гомберг М. I: 81
- Гофман Ф. II: 161
- Грегор У. I: 285; II: 63
- Грей. II: 303
- Григорович В. К. II: 389, 390
- Гриньяр В. I: 44; II: 46
- Гро Н. I: 170
- Гроссе А. II: 345
- Гумбольдт А. I: 295
- Гунстман. I: 334
- Густавсон Г. Г. I: 456
- Гуттенберг И. II: 269
- Гьельм. I: 515, 516
- Дааше. А. Н. II: 150
- Дадли Д. I: 333
- Дагер Л. Ж. II: 19
- Д'Агостино О. II: 378-380
- Дальтон Д. I: 17, 202
- Дарвин Ч. I: 567
- Даунс Г. I: 165
- Дебре. I: 543; II: 219, 220
- Дебьерн А. II: 299, 300, 305, 319, 323, 328, 329
- Делафонтен. II: 139
- Демарсэ. II: 143, 160
- Денисович В. П. II: 78
- Дерби А. I: 332, 333
- Дерягин Б. В. I: 95
- Джеймс Р. II: 406, 418
- Джилль Д. I: 228
- Джонс П. I: 72
- Джоуль Д. П. I: 367
- Диоскорид. I: 162, 274, 428
- Добаткин В. И. I: 194
- Добросердов Д. II: 311
- Довилье. II: 162
- Дол М. I: 128, 129
- Долейжек В. II: 192
- Дондональд. I: 214
- Дорн А. II: 299, 300, 305, 319
- Дреббель К. I: 114
- Дробков А. А. II: 121
- Друин В. II: 477
- Друце И. II: 192
- Дрюс Д. II: 310
- Дэви Х. I: 42, 65, 110, 111, 133, 134-136, 144, 163, 164, 170, 179, 240, 257, 266, 275, 318, 479, 485; II: 72, 101, 251
- Дьюар Дж. I: 177, 254
- Дюлонг П. Л. I: 61, 452
- Дюма Ж. Б. А. I: 246; II: 259, 261
- Ерофеев М. В. I: 89, 90
- Жаннети. II: 217
- Жансен Ж. I: 27, 29
- Жоли К. I: 66, 67
- Жолио-Кюри И. I: 220; II: 377, 378
- Жолио-Кюри Ф. I: 220; II: 355, 377, 378, 457, 467
- Захаров Я. Д. I: 110
- Звара И. II: 475, 476, 477, 480
- Зеноф К. I: 107
- Звягинцев О. Е. II: 215, 223
- Зеебек Т. И. II: 64
- Зинин Н. Н. I: 297
- Зискинд Б. Г. I: 152
- Зосимос. I: 428
- Иенсен. II: 507
- Ильинов А. И. II: 498
- Илющенко В. И. II: 437
- Иностранцев А. А. I: 344
- Иоффе А. Ф. II: 64, 372, 374, 375
- Каблуков И. А. I: 523
- Кавендиш Г. I: 13, 98, 105, 248; II: 4
- Каде Л. К. I: 429
- Камерлинг-Оннес Г. I: 27, 509; II: 251
- Каннингем Б. II: 410, 425
- Капица П. Л. I: 27, 124, 125, 126
- Капустинский А. Ф. I: 33
- Каргин В. А. I: 95
- Карлик Б. II: 295
- Карлсон. I: 445
- Каро Н. I: 105
- Касаточкин В. И. I: 80, 92
- Квасов Ф. И. I: 194
- Квинк. I: 375
- Кеезом. I: 27
- Кейс. II: 258
- Кельвин. I: 377
- Керн С. II: 191
- Керстен. II: 25
- Кикоин И. И. I: 27
- Киренко Ф. Т. II: 223
- Кириллов Д. К. I: 286
- Кирхгоф Г. Р. I: 300, 470, 471, 474, 476, 477; II: 8, 32, 33, 99
- Кирхмейер К. I: 213
- Клапрот М. Г. I: 51, 213, 215, 285, 442, 478, 479, 497; II: 25, 63, 109, 125, 350, 351
- Клаус К. К. I: 538, 542, 543, 551; II: 208, 209
- Клеве П-Т. II: 149, 152, 153, 155, 160
- Клемм В. II: 117
- Кнулянд И. Л. I: 83
- Колле-Дескоти II: 202
- Компто. II: 268
- Копьева И. М. I: 394
- Кораблев Л. Н. I: 161
- Корбино О. М. II: 377
- Корнэлл Ч. II: 137
- Корнилов И. И. I: 381
- Корсон Д. II: 295
- Корт Г. I: 334
- Коршак В. В. I: 80, 92, 440
- Коссович П. I: 111
- Костер Д. II: 116, 162, 163
- Крафт И. I: 213
- Крафт М. Я. I: 432
- Кроль В. I: 66, 290, 499
- Кронстедт А. Ф. I: 362, 364, 365, 373, 515
- Крот Н. Н. II: 388-391
- Кротов Б. П. I: 225
- Кроуфорд. I: 478
- Крукс У. I: 18, 27, 104, 460; II: 33, 114, 143, 255, 256, 257, 259, 260
- Кранстон Дж. II: 310, 343
- Крюкшвенк. I: 478
- Кудрявцев Ю. П. I: 80
- Кужель Н. Д. II: 223
- Куллидж Дж. I: 524

- Кувкель И. I: 213, 348; II: 235  
 Курпаков Н. С. II: 220  
 Куртуа Б. II: 70–72  
 Курчатов Б. В. I: 458  
 Курчатов И. В. I: 458; II: 356, 360, 361, 370, 372–375, 474, 480  
 Кутюрин В. М. I: 129  
 Кучеров М. Г. II: 247  
 Кюри Ж. II: 285  
 Кюри М. II: 283–286, 287, 288, 299, 308, 316–326, 328–330, 334, 353, 417, 418, 439, 504  
 Кюри П. II: 283–285, 286, 288, 299, 316–325, 328–330, 338, 353, 417, 418  
 Лаборд А. II: 321  
 Лаврухина А. К. II: 314  
 Лавуазье А. Л. I: 20, 96–98, 114–116, 117, 127, 128, 134, 202, 213, 214, 216, 229, 240, 429; II: 3, 53, 249–251  
 Лайет П. I: 134  
 Лами. II: 259, 260  
 Лангер. I: 375, 376  
 Ландау Л. Д. I: 27, 293  
 Лапин Ю. Д. II: 223  
 Латаш Ю. В. I: 340  
 Лауэ. I: 214, 218  
 Лачинов П. А. I: 89, 90  
 Ле Шателье А. I: 106  
 Лебедев С. В. I: 165  
 Лебединский В. В. I: 552, 553; II: 223  
 Лебо П. I: 52  
 Легасов В. А. I: 39; II: 87  
 Леманн И. Г. I: 305  
 Ленгмюр И. II: 245  
 Либби Ф. У. I: 93; II: 373  
 Либих Ю. I: 220, 304, 406, 451, 517, 561; II: 14, 225  
 Ливанов В. А. I: 194  
 Линней К. I: 362  
 Ловиц Т. Е. I: 478, 479  
 Локьер Д. Н. I: 27, 29  
 Ломоносов М. В. I: 202, 391; II: 15, 241  
 Лоран О. I: 246  
 Лоринг Ф. II: 192, 310  
 Лосев О. В. I: 403  
 Лоуренс Э. II: 445, 469, 496  
 Лукреций К. I: 385, 386  
 Лундبلاد Г. Э. I: 88  
 Любарский В. В. II: 217, 218  
 Ляликова Н. Н. II: 60  
 Майтнер Л. I: 458; II: 343–345, 355, 382  
 Мак-Кензи К. II: 295  
 Маке. I: 363  
 Макмиллан М. Э. II: 379, 381–383  
 Мальцева Н. II: 314  
 Маринский Дж. II: 137  
 Мариньяк Ж. Ш. Г. I: 510; II: 139, 144, 145, 157, 158, 160, 172  
 Маркграф А. I: 213  
 Марковников В. В. II: 48  
 Мартен П. I: 336  
 Мартен Э. I: 336  
 Матиссен О. I: 42  
 Маттаух Г. I: 528, 529  
 Медан. I: 248  
 Медовар Б. И. I: 340  
 Мейер. II: 311  
 Мельников С. М. II: 51  
 Менделеев Д. И. I: 4–7, 8–11, 18, 19, 52, 60, 61, 77, 78, 109, 124, 153, 163, 166, 184, 203, 256, 265, 277, 278, 282, 283, 375, 381, 407–409, 413, 416, 417, 426, 427, 488, 528, 535, 537; II: 34, 39, 68, 69, 91, 110, 114, 115, 122, 161, 191, 293, 327, 343, 344, 351, 387, 438, 446, 448, 504  
 Мефодьева М. П. II: 388  
 Миллер М. Б. II: 437  
 Миропольский Л. М. I: 225  
 Михайлов К. Н. I: 193  
 Михеев В. Л. II: 437  
 Михеев Н. Б. II: 430, 443  
 Мозандер К. Г. I: 487; II: 109, 110, 114, 125, 132, 133, 149, 153, 154, 158  
 Монд Л. I: 375–377  
 Монель А. I: 370  
 Морган Л. II: 406, 418  
 Морозов Н. I: 256  
 Муассан А. I: 48, 49, 66, 70, 91, 92, 134, 135, 136, 286, 506; II: 3, 171  
 Мусин-Пушкин А. А. I: 221  
 Мысовский Л. В. I: 458  
 Мюллер Ф. И. II: 61, 62  
 Назаренко В. А. I: 422  
 Натта Д. I: 198  
 Некрасов Б. В. I: 67, 74, 492; II: 206  
 Немилов В. А. II: 223  
 Пенадкевич К. А. II: 279, 281, 321, 326  
 Нерст В. Г. I: 499  
 Несмеянов А. Н. II: 475  
 Никитин Б. А. I: 249, 463; II: 89, 304  
 Никифоровский П. М. I: 457  
 Никлес Д. I: 134  
 Никольсон У. I: 381  
 Нилсон Дж. I: 333  
 Нильсон Л. Ф. I: 52, 60, 61, 278, 282, 283, 286; II: 334  
 Нобель А. II: 320, 462  
 Новиков Н. И. II: 215  
 Ноддак В. I: 528, 532; II: 152, 191, 192  
 Ноддак И. I: 528, 532; II: 191, 192, 308, 354, 355  
 Нокс Г. I: 134  
 Нокс Т. I: 134  
 Нортон П. I: 125  
 Оганесян Ю. Ц. II: 497  
 Оддо Дж. II: 82  
 Одинг И. А. I: 394  
 Окерман Р. I: 336  
 Олимпиадор. I: 428  
 Опсагер. I: 27  
 Орфил. I: 431  
 Оствальд В. II: 76  
 Осипов А. И. I: 340  
 Остин У. I: 106  
 Оуэнс Р. Б. II: 299, 300, 305, 337  
 Павлов И. П. I: 457  
 Пальмиери. I: 27, 28  
 Панет Ф. I: 569; II: 311  
 Парацельс. I: 345, 349, 400, 404; II: 236  
 Патканов К. Г. I: 228  
 Пелиго Э. II: 351  
 Пельтье П. Ж. II: 64  
 Пеннеман Р. II: 412  
 Пере М. II: 308, 311–313  
 Перепелкин К. Е. I: 92  
 Перман Э. I: 106  
 Перрен Ж. II: 328  
 Перье К. I: 532  
 Петерс К. I: 569  
 Петерсон О. I: 52, 60, 61, 283, 286  
 Петржак К. А. I: 460; II: 356, 370, 371–376  
 Петрянов И. В. I: 152  
 Пизани. II: 99  
 Пиккар О. II: 271, 272  
 Пирогов Н. И. II: 77  
 Платэ Г. II: 264  
 Платтнер. II: 99  
 Плиний Старший. I: 162, 198, 233, 234, 239, 275, 317, 343, 397; II: 52, 248  
 Погодин С. А. II: 138  
 Поздняков А. А. II: 314  
 Полинг Л. I: 147, 463; II: 82, 439  
 Понтекорво Б. М. II: 439  
 Попов С. К. I: 196  
 Порошин К. Т. I: 63

- Потылицин А. Л. II: 78  
 Правдтль. II: 161  
 Праут У. I: 18-20  
 Пристля Д. I: 98, 105, 114, 115, 122, 130; II: 250, 251  
 Пруст Ж. Л. I: 213, 215, 365, 379  
 Прияшников Д. Н. I: 111, 220  
 Птижан. II: 14  
 Пуанкаре А. II: 351  
 Пшеницын Н. К. I: 552; II: 223  
 Пэниш Дж. II: 310  
 Пятево Ю. А. I: 495  
 Резетти Ф. II: 378, 379  
 Рамаай У. I: 27, 28, 153, 154, 248, 249, 256, 460; II: 81, 82, 299, 300, 302, 303, 320  
 Рамон. I: 418  
 Рашиг. I: 243  
 Рего К. II: 325  
 Резерфорд Д. I: 97, 98  
 Резерфорд Э. I: 27, 404, 569; II: 299-305, 320, 337, 338, 353, 368, 445, 469  
 Рейх Ф. II: 33  
 Реми Г. I: 543  
 Рентген В. II: 351, 353  
 Рио дель А. М. I: 295, 296  
 Рихтер И. I: 365, 366; II: 33  
 Родин С. С. II: 314  
 Рожков П. И. II: 223  
 Розе Генрих. I: 506, 508; II: 138, 139, 170  
 Розе Густав. II: 138  
 Роско Г. I: 295, 300, 304  
 Рубинштейн А. М. II: 223  
 Русинов Л. И. I: 458  
 Рэлей Дж. (Джон Уильям Стратт). I: 125, 153, 248, 249, 256  
 Сажин Н. П. I: 422; II: 51  
 Самарский В. Е. II: 138, 139  
 Свадберг Л. I: 517; II: 161  
 Севергин В. М. I: 65  
 Северов Э. А. I: 495  
 Сегре Э. I: 526, 527, 529-532, 534-537; II: 295, 378, 379, 381, 383  
 Селиванов Л. С. I: 456  
 Селиверстов Н. С. II: 223  
 Семенов Н. Н. I: 120; II: 267  
 Сент-Клер Девиль А. Э. I: 66, 67, 164, 178, 543; II: 219, 220  
 Сеттерберг. II: 93  
 Сефстрем Н. I: 295, 297  
 Сяборг Г. Т. II: 322, 346, 347, 383, 388, 390, 392, 406, 407-410, 415, 418, 423, 428, 435, 441, 446, 453, 475, 481, 485  
 Сименс В. I: 336, 392; II: 240  
 Сладков А. М. I: 80  
 Соболевский П. Г. II: 218, 221  
 Содди Ф. II: 299-301, 303, 320, 327, 338, 343  
 Соколик А. С. II: 267  
 Соколов А. П. II: 321  
 Сорби Г. К. II: 161  
 Сорэ II: 152  
 Спендинг Ф. II: 150  
 Спицын В. И. I: 523; II: 391, 430, 455  
 Старик И. Е. II: 289  
 Старостин С. М. I: 544  
 Стас Ж. I: 18  
 Степанов А. В. I: 493, 495  
 Степанов А. И. II: 223  
 Стодарт. I: 379  
 Страбон. I: 343, 400  
 Стрит Г. II: 428  
 Струве Г. В. I: 517  
 Сырокомский В. С. I: 43  
 Тейлер Р. Дж. I: 99  
 Тейлор Л. I: 72  
 Тейс Р. В. I: 129  
 Теллер Э. I: 46  
 Тенар Л. Ж. I: 65, 66, 134, 164, 365, 451  
 Теннант С. II: 202, 203, 208  
 Тимирязев К. А. I: 117  
 Томас С. Д. I: 335, 336  
 Томпсон С. II: 423, 425, 428, 446, 450, 451  
 Томсон Дж. Дж. I: 161  
 Траверс М. У. II: 81, 82  
 Тропш. I: 474  
 Туполев А. Н. I: 186  
 Ульоа А. II: 215, 216  
 Уолмен Дж. II: 425  
 Уотсон. II: 217  
 Урбен Ж. II: 3, 114, 126, 149, 150, 158, 159, 160, 162, 163  
 Урванцев Н. Н. I: 392  
 Фарадей М. I: 134, 136, 379  
 Фаулер У. I: 98  
 Фаянс К. II: 344, 345  
 Федосеев Д. В. I: 95  
 Федотьев. I: 359  
 Фейнман Дж. I: 27  
 Ферми Э. I: 458, 526, 534; II: 19, 28, 352, 354, 377, 378-380, 382, 383, 386, 387, 439, 440, 441  
 Ферсман А. Е. I: 50, 201, 202, 204, 214, 220, 258, 263, 480, 485, 523, 543, 567; II: 13  
 Фигуровский Н. А. II: 114  
 Филлипс Л. II: 453  
 Филончиков Н. П. II: 77  
 Фишер. I: 474  
 Флеров Г. Н. I: 460; II: 356, 370, 371-376, 472, 475, 477, 485, 487, 504  
 Флинт. I: 487  
 Форкан. II: 89  
 Форд Г. I: 299  
 Франк А. I: 105  
 Франкран Р. А. I: 250  
 Франк-Камеицкий Д. А. I: 33  
 Фраш Г. I: 226-228  
 Фреми Э. I: 134  
 Фриенд И. II: 294, 309  
 Фриш О. II: 355  
 Фрумкин А. Н. I: 560  
 Фуркруа. II: 71, 202, 228  
 Хайд Э. II: 296, 314  
 Халкин В. А. II: 297  
 Хансен. II: 162  
 Хантер М. I: 286, 288  
 Харт М. I: 157  
 Хатчет Ч. I: 506, 507; II: 170  
 Хевеша Д. II: 116, 162, 163, 311  
 Хизингер. II: 109, 125  
 Хилл. I: 482  
 Хлопин В. Г. II: 90, 326, 372, 375  
 Ходаков Ю. В. I: 79  
 Холл Ч. М. I: 164, 181, 200  
 Хоп. I: 478  
 Хофер П. II: 413  
 Хрущов К. Д. I: 91  
 Хулубей Г. II: 310  
 Хуторецкий В. М. II: 84  
 Хьюлет К. II: 454  
 Цандер Ф. А. I: 200  
 Циглер К. I: 198  
 Циммерман К. II: 351  
 Чарч Дж. II: 161  
 Чатт В. А. II: 224  
 Чедвик Дж. II: 324, 354  
 Чемпион Дж. I: 405  
 Черник М. II: 83  
 Чернов Д. К. I: 332, 336, 345  
 Черняев И. И. I: 552; II: 220, 222, 223  
 Чоппин Г. II: 446, 450, 451  
 Чугаев Л. А. I: 552, 568; II: 220, 223, 225, 301, 302, 414  
 Шалаевский М. II: 314  
 Шалимов А. Г. I: 340  
 Шапталъ Ж. I: 97  
 Шатен. II: 76  
 Шванхард А. II: 3  
 Швейгер. I: 240



Шееле К. В. I: 98, 105, 114, 115, 122, 124, 133, 213, 240, 243, 317, 318, 325, 429, 478, 515, 516; II: 3, 101, 188, 189, 250	Щукарев С. А. I: 528, 529
Шерер А. И. I: 318	Эдисон Т. А. I: 380
Шеффер Т. II: 217	Эйбельсон Ф. II: 382, 383, 393
Шилов А. Е. I: 107, 108	Эйде С. I: 105
Шмидт Г. II: 334	Эйнштейн А. I: 248; II: 434, 437, 441
Шорлеммер К. I: 83	Экеберг А. Г. I: 51, 487, 506; II: 158, 169, 170
Шпанский В. А. II: 84	Элюар Ч. II: 188, 189
Шреттер. I: 214	Эммет Р. II: 245
Шрёдингер Э. I: 537	Энгельс Ф. I: 114, 213, 409, 494
Штрассман Ф. II: 355, 373, 381, 382	Эрдманн. II: 109
Штрмейер Ф. II: 24, 25	Эрлих П. I: 432
Шумяцкая Н. Г. I: 495	Эрстед Г. Х. I: 179, 180
Шур В. Б. I: 107	Эру П. I: 164, 182
Щербаков Д. И. II: 51	Эсрир Л. II: 410, 412
Щербина В. В. I: 522	Якоби Б. С. I: 406; II: 234
	Янтсен Г. II: 163

Выделены номера страниц, на которых помещены портреты

## СОДЕРЖАНИЕ

Грамматика	открытий	<i>В. И. Рич</i>	3
СЕРЕБРО		<i>В. И. Казаков</i>	12
КАДМИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	23
ИНДИЙ		<i>Т. И. Молдавер, И. С. Левин</i>	32
ОЛОВО		<i>В. И. Скирстымонская</i>	42
СУРЬМА		<i>В. С. Шеститко</i>	51
ТЕЛЛУР		<i>Т. И. Молдавер</i>	61
ИОД		<i>Е. В. Казаков, Ж. И. Казакова</i>	70
КСЕНОН		<i>А. О. Сафронов</i>	81
ЦЕЗИЙ		<i>Ф. М. Перельман</i>	91
БАРИЙ		<i>А. А. Гусовский</i>	101
ЛАНТАН		<i>В. В. Станцо</i>	107
ЦЕРИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	125
ПРАЗЕОДИМ		<i>В. В. Станцо</i>	132
НЕОДИМ		<i>В. В. Станцо</i>	134
ПРОМЕТИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	137
САМАРИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	138
ЕВРОПИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	142
ГАДОЛИНИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	144
ТЕРБИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	148
ДИСПРОЗИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	150
ГОЛЬМИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	152
ЭРБИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	154
ТУЛИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	155
ИТТЕРБИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	157
ЛЮТЕЦИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	158
ГАФНИЙ		<i>Ю. М. Полежаев</i>	161
ТАНТАЛ		<i>С. И. Венецкий</i>	169
ВОЛЬФРАМ		<i>Ф. М. Перельман</i>	179
РЕНИЙ		<i>В. Л. Покровская</i>	191
ОСМИЙ		<i>В. В. Станцо</i>	202
ИРИДИЙ		<i>А. А. Гусовский</i>	203
ПЛАТИНА		<i>В. Н. Пичков</i>	215
ЗОЛОТО		<i>В. И. Казаков</i>	230

РТУТЬ	<i>В. И. Казаков</i>	241
ТАЛЛИЙ	<i>В. И. Корнеев, М. Н. Конохов</i>	255
СВИНЕЦ	<i>В. И. Казаков</i>	261
ВИСМУТ	<i>Н. Н. Попова</i>	273
ПОЛОНИЙ	<i>В. В. Станцо</i>	283
АСГАТ	<i>В. И. Кузин</i>	293
РАДОН	<i>В. В. Станцо</i>	299
ФРАНЦИЙ	<i>В. И. Кузин</i>	308
РАДИЙ	<i>В. В. Станцо</i>	316
АКТИНИЙ	<i>В. В. Станцо</i>	327
ТОРИЙ	<i>И. Г. Минеева, Д. А. Минеев</i>	333
ПРОАКТИНИЙ	<i>Р. А. Дьячкова</i>	343
УРАН	<i>В. И. Кузнецов</i>	350
НЕПТУНИЙ	<i>В. И. Кузнецов</i>	377
ПЛУТОНИЙ	<i>В. И. Кузнецов</i>	392
АМЕРИЦИЙ	<i>В. Н. Косяков</i>	406
КЮРИЙ	<i>В. Н. Косяков</i>	415
БЕРКЛИЙ	<i>В. Н. Косяков</i>	423
КАЛИФОРНИЙ	<i>В. И. Кузнецов</i>	427
ЭЙНШТЕЙНИЙ	<i>В. Л. Михеев</i>	433
ФЕРМИЙ	<i>В. Л. Михеев</i>	439
МЕНДЕЛЕВИЙ	<i>В. В. Станцо</i>	446
НОБЕЛИЙ	<i>В. А. Друин</i>	456
ЛОУРЕНСИЙ	<i>В. В. Станцо</i>	468
КУРЧАТОВИЙ	<i>В. В. Станцо</i>	472
НИЛЬСБОРИЙ	<i>Ю. А. Лазарев</i>	485
ЭКАВОЛЬФРАМ	<i>В. В. Станцо</i>	495
ЭКАРЕНИЙ	<i>В. В. Станцо</i>	502
А ПОСЛЕ 107-го?	<i>Г. Н. Флеров</i>	504
ВОСЬМОЙ ПЕРИОД: КАКИМ ОН БУДЕТ?	<i>В. И. Гольданский</i>	506
Приложение		
Константы и свойства		510
Что есть что		559
Именной указатель		562

**Популярная  
библиотека  
химических  
элементов**

Издание 3-е

Книга вторая

**СЕРЕБРО — НИЛЬСБОРИЙ**

Утверждено к печати  
редколлегией серии  
научно-популярных изданий  
Академии наук СССР

Редакторы издательства  
*Н. Б. Прокофьева, М. С. Бумаченко*

Переплет и титул художника  
*Н. И. Шевцов*

Заставки художников  
*Е. С. Скрытницкова, И. П. Захаровой*

Художественный редактор  
*Н. А. Фильчагина*

Технический редактор  
*В. В. Тарасова*

Корректоры  
*Н. Г. Васильева, Н. И. Казарина*

ИБ № 24625

Сдано в набор 26.08.82.  
Подписано к печати 02.02.83.  
Т-05525. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага книжно-журнальная  
Гарнитура обыкновенная  
Печать высокая  
Усл. печ. л. 30,2. Усл. кр.-отт. 30,2  
Уч.-изд. л. 31,1. Тираж 50 000 экз. Тип. зак. 2137  
Цена 2 р. 10 к.

Издательство «Наука»  
117864 ГСП-7, Москва, В-185, Профсоюзная ул., 90  
2-я типография издательства «Наука»  
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10