

ПОПУЛЯРНАЯ
БИБЛИОТЕКА
ХИМИЧЕСКИХ
ЭЛЕМЕНТОВ

Рo — ...



Издание подготовлено
редакцией журнала
Академии наук СССР
«ХИМИЯ И ЖИЗНЬ»

Ответственный редактор

академик

И. В. ПЕТРЯНОВ-СОКОЛОВ

**ПОПУЛЯРНАЯ
БИБЛИОТЕКА
ХИМИЧЕСКИХ
ЭЛЕМЕНТОВ**

Радиоактивные элементы

Po — (Ns) — . . .



**ИЗДАТЕЛЬСТВО
«НАУКА»**

МОСКВА 1974

Содержание

Полоний	5	В. В. Станцо
Астат	15	В. И. Кузин
Радон	22	В. В. Станцо
Франций	31	В. И. Кузин
Радий	40	В. В. Станцо
Актиний	51	В. В. Станцо
Торий	57	И. Г. Минеева, Д. А. Минсев
Протактиний	67	Р. А. Дьячкова
Уран	75	В. И. Кузнецов
Нептуний	103	В. И. Кузнецов
Плутоний	119	В. И. Кузнецов
Америций	135	В. Н. Косяков
Кюрий	144	В. П. Косяков
Берклий	152	В. Н. Косяков
Калифорний	157	В. И. Кузнецов
Эйнштейний	164	В. Л. Михеев
Фермий	171	В. Л. Михеев
Менделевий	178	В. В. Станцо
Жолиотий (нобелий)	189	В. А. Друин
Резерфордий (лоуренсий)	202	В. В. Станцо
Курчатовий (резерфордий)	206	В. В. Станцо
Нильсборий (ганий)	220	Ю. А. Лазарев
А после 105-го?	231	Г. Н. Флеров
Восьмой период: каким он будет?	235	В. И. Гольданский



Нильсборий (ганий)

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 № 105 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.

Как и все другие элементы тяжелее фермия, элемент № 105 получен в ядерных реакциях с участием ускоренных тяжелых ионов. Если ускоренное налетающее ядро, преодолев кулоновский барьер отталкивания, полностью сольется с ядром мишени, то в результате образуется тяжелое составное ядро (или компаунд-ядро)

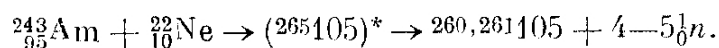
Оно обязательно будет возбуждено и оттого мгновенно разделится на два осколка сравнимой массы. При этом образуются ядра известных элементов из середины периодической таблицы.

И лишь в очень редких случаях, примерно в одном из ста миллионов, составное ядро может избежать деления, «сбросив» свое возбуждение испусканием нескольких нейтронов. Только в этом случае и образуется новый элемент. Очевидно, что вероятность образования ядер нового элемента мала; с увеличением порядкового номера синтезируемого элемента она становится все меньше и меньше.

Скорость образования элементов № 104 и 105 составляет в лучшем случае десятков атомов в час. К тому же у элементов тяжелее фермия очень малое время жизни от десятков секунд до десятых долей секунды. С увеличением атомного номера время жизни элементов уменьшается так же резко, как и вероятность их образования.

Эти обстоятельства чрезвычайно затрудняют идентификацию новых элементов и изотопов (определение порядкового номера Z и массового числа A). Чтобы все-таки поймать эти единичные атомы, в Лаборатории ядерных реакций были созданы специальные быстродействующие и высокоэффективные установки, регистрирующие радиоактивный распад (альфа-распад, спонтанное деление) и способные непрерывно работать в течение многих суток.

Первые опыты по синтезу 105-го элемента начались в Дубне в 1967 году 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 ${}_{105}^{260}$ и ${}_{105}^{261}$ должны быть альфа-излучателями. За очень короткое время (от 0,01 до 0,1 секунды) они должны были испускать альфа-частицы (с энергией 9,4—9,7 Мэв) и превращаться в ядра 103-го элемента.

Этот элемент был уже достаточно изучен: его изотопы с массой 255 и 256 «живут» 20—30 секунд и тоже испускают альфа-частицы, превращаясь в ядра элемента № 101 менделевия. И вполне закономерно, что первые попытки

* Здесь звездочкой обозначено неустойчивое компаунд-ядро.



Элемент № 105 предложено назвать в честь великого датского физика Нильса Бора (1885—1962), автора модели строения ядра и многих пионерных работ в разных областях физики

идентифицировать элемент № 105 сводились к установлению генетической связи альфа-частиц с новыми, не наблюдавшимися прежде характеристиками, с альфа-частицами, порожденными уже известным 103-м элементом.

К началу 1968 года 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 сразу превращается в ядро 103-го элемента в основном его состоянии; может существовать некое промежуточное, возбужденное состояние образующихся дочерних ядер. Поэтому энергия испускаемых новыми ядрами альфа-частиц может оказаться меньше предсказанной теоретиками величины 9,4—9,7 Мэв и составить всего 8,9—9,2 Мэв. В силу этого обстоятельства время жизни ядер 105-го может оказаться в десятки раз больше, чем ожидалось... Из всего этого следовало, что так же внимательно, как область 9,4—9,7 Мэв, нужно исследовать и другую, более низкую по энергиям часть спектра.

Здесь, видимо, надо объяснить, что это за спектры. Как и при многих других исследованиях, в ядерной химии получают не отдельные сведения, а спектры — полную картину разброса частиц по энергии. «Снимали» такие спектры и в дубненских экспериментах по синтезу элемента № 105. Однако в опытах 1968 года анализ части спектра ниже 9,4 Мэв был сильно затруднен из-за фона. Фон — излучение, подобное искомому, — возникал из-за побочных ядерных реакций. Альфа-излучатели образовывались на микропримесях свинца в материале мишени. Эти фоновые реакции более вероятны, чем главная, а ядерные свойства продуктов этих реакций весьма близки к ожидаемым для 105-го элемента. Опасны даже ничтожные примеси свинца.

Гарантии, что этой микропримеси в мишенях нет, не было. Таким образом, хотя полученные в опытах 1968 года результаты были близки к предсказанным, они, по мнению Г. Н. Флерова и большинства его сотрудников, не могли служить достаточным основанием для того, чтобы утверждать: элемент № 105 уже открыт.

Видимо, нужно было идти другим путем. Но каким?

Анализ свойств элементов № 102, 103 и 104 позволял предполагать, что наряду с альфа-распадом элемент № 105 должен испытывать и спонтанное (самопроизвольное) деление. Для ядер урана и близких трансуранов этот вид распада крайне редок, но по мере продвижения в далекую трансурановую область его роль постоянно растет. Для некоторых изотопов 104, 105 и 106-го элемен-

тов спонтанное деление может быть основным, решающим видом радиоактивного распада.

Сейчас известно, что открытый в Дубне изотоп элемента № 105 делится спонтанно, без вмешательства извне, примерно в 20 случаях из 100, но в 1968 году этого, конечно, еще не знали.

Идентификация элемента по спонтанному делению имеет бесспорные достоинства. Во-первых, факт распада тяжелого ядра на два осколка обнаруживается значительно

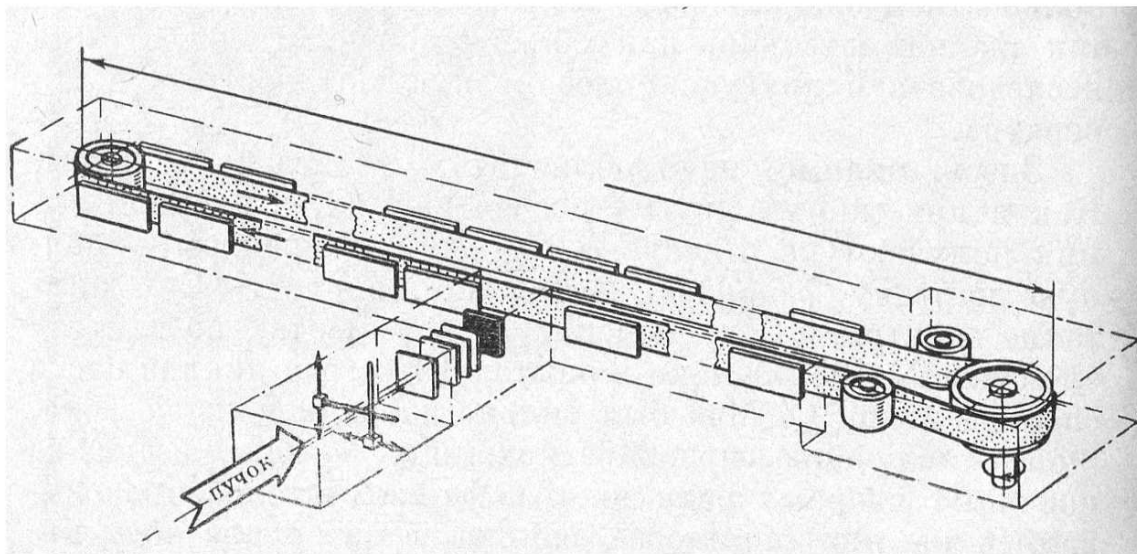


Схема экспериментальной установки для регистрации короткоживущих спонтанно делящихся ядер. С помощью такой установки со многими детекторами, расположенными вдоль движущейся бесконечной ленты из никеля, был впервые обнаружен распад ядер элемента № 105

проще и надежнее, чем случаи альфа-распада. Аппаратура, регистрирующая спонтанное деление, намного чувствительнее. А во-вторых, при правильной постановке опыта фон практически исключен.

Принимая во внимание эти обстоятельства, в ноябре 1969 года 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 мишени, получив большой импульс от налетающего иона, выбивались из нее и попадали на сборник — бесконечную никелевую ленту-конвейер длиной 8 метров и шириной 2,5 сантиметра. Лента двигалась с постоянной скоростью. Сборник перемещал приобретенные ядра от

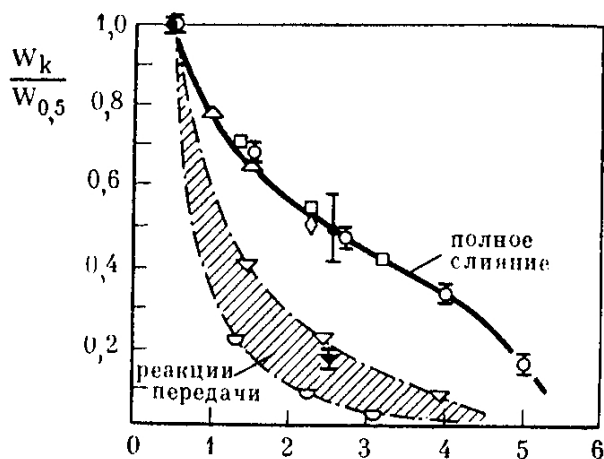
мишени к детекторам, регистрирующим осколки спонтанного деления. Чтобы исключить фон, и сборник и детекторы делали из сверхчистых материалов с рекордно низким содержанием урана — менее одной стомиллиардной грамма урана на грамм материала.

Более ста детекторов, приготовленных из фосфатного стекла (в виде пластинок размером 60×35 мм), располагались вдоль ленты. После специальной химической обработки на таких стеклах 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. Раньше 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 уточнить 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 этой и подобных ей реакциях вероятность образования искомого продукта чрезвычайно сильно зависит от энергии налетающей частицы: изменение энергии ионов всего на 10% уменьшает выход продуктов реакции более чем в 10 раз. (Заметим тут же, что зависимость вероятности образования изотопа от энергии бомбардирующих частиц называется функцией возбуждения ядерной реакции.)

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 нуклонами (протонами



Интегральные угловые распределения ядер отдачи, образующихся в реакциях полного слияния (сплошная линия) и в реакциях передачи нуклонов (заштрихованная область)

или нейтронами), или же происходит неполное слияние, или идут реакции с вылетом заряженных частиц. Во всех этих случаях вылетающие из мишени ядра имеют значительный угловой разброс.

Помещая между мишенью и сборником различные коллиматоры и определяя число регистрируемых осколков в зависимости от степени коллимации *, можно уверенно установить, какая реакция происходит: полное слияние ядер мишени и снаряда, частичное слияние или лишь соприкосновение, сопровождаемое передачей от ядра к ядру одного или нескольких нуклонов.

Этот метод, разработанный и введенный в практику трансурановых исследований сотрудниками дубненской лаборатории, был применен и при идентификации элемента № 105 по спонтанному делению.

Оказалось, что выход спонтанно делящегося изотопа с периодом полураспада около двух секунд при увеличении степени коллимации в пять раз уменьшился всего вдвое. Такие показатели характерны для летящих к сборнику напрямик продуктов реакций полного слияния, что ясно видно на диаграмме. Для ядерных реакций других типов зависимость между выходом продуктов и степенью коллимации иная.

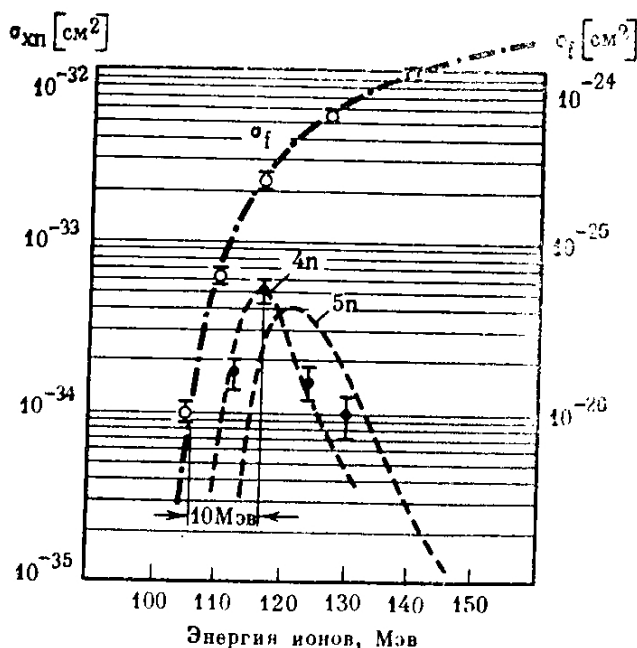
Известно, что при облучении америция-243 неон-22 происходят и реакции передачи: ядро-снаряд лишь ка-

* Коллиматор — устройство для получения параллельных пучков лучей или частиц. Степенью коллимации называется отношение диаметра отверстия к высоте коллиматора.

сается ядра-мишени и пролетает дальше, захватив при этом, например, один чужой нейтрон. Получаются возбужденные ядра изомера америция-242, которые находятся в квазистабильном состоянии и спонтанно делятся всего через 0,14 секунды. Так вот, выход этих ядер при пятикратном изменении степени коллимации упал более чем в пять раз, что характерно для реакций передачи вообще: «неорганизованные», летящие вкривь и вкось ядра не проходят через коллиматор.

Таким образом, коллимационный метод дал важный вывод: спонтанно делящийся изотоп с периодом полураспада около двух секунд образуется при полном слиянии ядер америция и неона. Следовательно, в этих ядрах по 105 протонов!

В дальнейших опытах измеряли функцию возбуждения. Результаты этих опытов, приведенные на графике, показали, что она имеет характерный вид колоколообразной кривой с острым максимумом при энергии ионов неона около 117 Мэв. Форма и положение максимума полностью соответствовали ожидаемым для реакции полного слияния ядер америция-243 и неона-22 с последующим испарением четырех нейтронов. Это означало: наиболее вероятное массовое число нового изотопа равно 261 ($243 + 22 - 4 = 261$).



Зависимость вероятности образования ядер элемента № 105 от энергии бомбардирующих ионов неона

Было проведено более десяти контрольных опытов продолжительностью 40—50 часов каждый. Выводы, полученные на основе этих опытов, можно свести к следующему.

При облучении америция-243 ускоренными ионами неона-22 наряду с другими ядерными реакциями происходит реакция полного слияния двух ядер с последующим испарением нескольких нейтронов: в результате этой реакции образуются ядра 105-го элемента, вероятнее всего изотопа $^{261}105$; эти ядра короткоживущие — период полураспада 1,8 ± 0,6 секунды; они могут распадаться двумя путями — или испускать альфа-частицу, или, примерно в 20% случаев, делиться спонтанно на два осколка с соизмеримыми массами.

В опытах по спонтанному делению было зарегистрировано более 400 ядер нового элемента. Результаты этих опытов были опубликованы в «Сообщениях Объединенного института ядерных исследований» от 18 февраля 1970 года, а затем 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 организованы опыты, подобные первым опытам 1967 года. Они показали, что большинство альфа-частиц, испускаемых при распаде ядер 105-го элемента, имеют энергии около 9 Мэв, а период полураспада нового излучателя хорошо согласуется с определенным в опытах по спонтанному делению.

Заметим попутно, что время жизни обнаруженного изотопа 105-го элемента оказалось в десятки раз больше, чем предсказали теоретики.

Несколько позже появилось сообщение об открытии элемента № 105 в Радиационной лаборатории имени Э. Лоуренса (Беркли, США). 28 апреля 1970 года (сопоставьте даты!) об этом сообщила Комиссия по атомной энергии США.

Методика для регистрации альфа-распада была аналогична использовавшейся в Дубне, но ядерная реакция синтеза была другой: калифорний-249 (атомный номер 98) плюс азот-15 (атомный номер 7). Обнаружив для изотопа

105-го элемента альфа-распад с энергией около 9,06 Мэв и период полураспада $1,6 \pm 0,3$ секунды, американские ученые из Беркли практически подтвердили выводы, сделанные ранее в Дубне в опытах по спонтанному делению.

Теперь, когда радиоактивные свойства элемента № 105 были определены и подтверждены, особенно важно стало исследовать химические свойства нового элемента. Эти эксперименты проводились радиохимиками Лаборатории ядерных реакций под руководством доктора химических наук И. Звары.

Основные химические свойства элемента № 105 определялись по той же экспрессной методике, которая была разработана для химической идентификации 104-го элемента. Суть ее — в химическом разделении продуктов ядерных реакций, образующихся в мишени.

Ожидалось, что по химическим свойствам элемент № 105 должен оказаться аналогом ниобия и тантала, — это следует из логики периодического закона. А раз так, то его высший хлорид и, возможно, оксихлорид должны быть сравнительно летучими соединениями; значит, для его химического выделения применим метод адсорбции газообразных хлоридов по зонам, как было в опытах с курчатовием.

Атомы отдачи, образованные в реакции $^{243}\text{Am} + ^{22}\text{Ne}$, вылетали из мишени точно так же, как и в физических опытах. Но теперь их не собирали на никелевую ленту, а подхватывали потоком горячего, нагретого до 300°C азота, и этот поток уносил их в специальную термохроматографическую колонку из стекла. Одновременно в начало колонки подавались хлорирующие агенты — парообразные TiCl_4 и SOCl_2 .

Первый участок колонки (длиной около 30 см) находился при температуре 300°C и служил для отделения твердых нелетучих хлоридов. А летучие пролетали дальше, на второй, более длинный (130 см) участок. Здесь температура равномерно понижалась до 50°C , и хлориды разных элементов выпадали в разных зонах — в зависимости от их летучести. По положению зоны неизвестного элемента можно было судить, чей он аналог. В предварительных опытах определили зону ниобия — как одного из

возможных аналогов элемента № 105. И еще гафния. Теперь надо было только точно определить, где адсорбируются новые ядра.

Спонтанное деление помогло и тут. Акты спонтанного деления регистрировались 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 года была испытана несколько иная методика определения химических свойств элемента № 105. Работая с летучими бромидами, а не с хлоридами, пришли к тем же результатам.

Первооткрыватели элемента № 105 предложили назвать его нильсборием — в честь Нильса Бора, выдающегося физика XX века, неизменно стремившегося поставить науку на службу миру и прогрессу.

Международный союз по чистой 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 пока по-прежнему нет компетентного и независимого третьего судьи. Вопрос об окончательном и справедливом наименовании самых тяжелых химических элементов остается открытым.