

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

541 9

СИНТЕТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ*)

Г. Сиборг, Д. Блум

Эта статья является четвертой в серии статей, публикуемых с 1950 г. В них рассказывается об открытиях синтетических элементов, которые могут быть получены в лабораториях, в ядерных реакторах или при ядерных взрывах, но не существуют в природе. Все эти элементы, за исключением четырех, являются трансурановыми элементами, поскольку их атомный номер больше атомного номера урана — самого тяжелого природного элемента. К моменту выхода из печати третьей статьи (апрель 1963 г.) было открыто 11 трансурановых элементов; последним был Лоуренсий, элемент с атомным номером 103. За последние шесть лет получено значительное количество данных, свидетельствующих о существовании 104-го элемента, и имеются некоторые указания об открытии 105-го элемента. Основная цель настоящей статьи состоит в том, чтобы подвести итоги последних работ. Они дают основание полагать, что список элементов распространится далеко за пределы, о достижении которых раньше можно было только мечтать.

Мы позволим себе напомнить читателю о нескольких фундаментальных фактах. Химические свойства элемента определяются количеством электронов в электронном облаке, окружающем ядро каждого атома, причем число электронов в свою очередь оказывается в точности равным числу частиц с положительным зарядом — протонов — в ядре. Атомный номер элемента соответствует количеству протонов: атомный вес водорода 1, гелия 2, урана 92 и т. д. По традиции элементы располагаются в периодической таблице, которая отражает определенную последовательность в чередовании их химических свойств (рис. 1).

Хотя элемент характеризуется числом протонов, его атомное ядро состоит не только из протонов, но и из нейтральных частиц — нейтронов; надо отметить, что отношение числа протонов к числу нейтронов может изменяться. Поэтому у одного и того же элемента может быть несколько разновидностей — изотопов, совпадающих по своим химическим свойствам, но отличающихся друг от друга массовым числом и временем жизни. Массовое число изотопа оказывается просто равным суммарному количеству нейтронов и протонов в его ядре. Уран-238, например, имеет 92 протона и 146 нейтронов; этот изотоп может обозначаться как U^{238} или, более точно, как ${}_{92}U^{238}$. Большинство изотопов оказывается нестабильным. Они могут превращаться в другие изотопы или элементы за счет радиоактивного распада ядра изотопа одного из следующих типов: β -распада (испускание положительных или отрицательных электронов), α -распада

*) G. T. Seaborg, J. L. Bloom, The Synthetic Elements, Scientific American 220, 4, 56 (1969) Перевод В. Н. Акимова.

(испускание α -частиц, состоящих из двух протонов и двух нейтронов) или спонтанного деления ядра изотопа. При этом могут также иметь место другие типы радиоактивного распада. Создание нового тяжелого элемента, по существу, — процесс, обратный процессам распада: можно, например, добавлять протоны к ядрам существующего элемента, вводя их в ядра с помощью ускорителей частиц, таких, как циклотрон или линейный

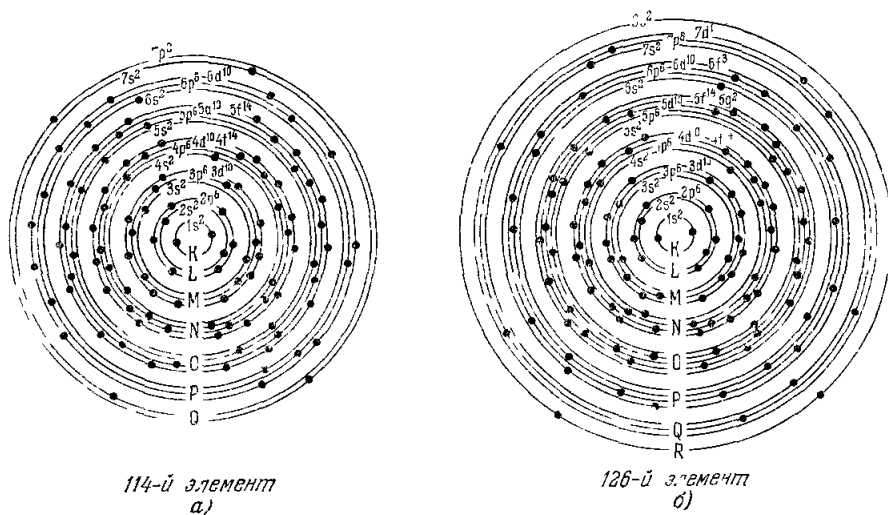


Рис. 2. Предполагаемое строение электронных оболочек для еще неоткрытых элементов 114 и 126. Согласно терминологии рентгеновской спектроскопии оболочки обозначены буквами от K до R; в спектроскопических обозначениях они пронумерованы числами от 1 до 8. В спектроскопии подоболочки обозначаются символами s, p, d, f (для 126-го элемента имеется также подоболочка g). Максимальное число электронов (черные кружки) на любой s-подоболочке равно 3 на p-подоболочке 6, на d-подоболочке равно 10.

ускоритель. Другой метод состоит в добавлении одного или более нейтронов к существующим ядрам, что приводит к увеличению массового числа соответственно числу добавленных нейтронов. Вследствие радиоактивного распада нейтрон внутри ядра может, испустив электрон, превратиться в протон, что в свою очередь приводит к увеличению атомного номера на единицу. Нейтроны могут быть получены на ускорителях, в ядерных реакторах или при ядерных взрывах. Отсутствием заряда у нейтронов объясняется та легкость, с которой они проникают в ядра облучаемого элемента; по той же причине отпадает необходимость ускорения нейтронов до высоких энергий.

Одним из нас (Сиборгом) в 1944 г. было отмечено свойство подобия элементов, принадлежащих одному и тому же семейству. Этот принцип оказывается полезным как для предсказания природы трансурановых элементов, так и при их идентификации в момент обнаружения. Он является следствием группировки электронов вокруг ядра в своего рода оболочки или подоболочки, которые в действительности представляют собой несколько упрощенную картину расположения квантовомеханических энергетических уровней (рис. 2). Конкретное предсказание заключалось в том, что элементы с атомными номерами от 90 до 103 должны вести себя подобно серии редкоземельных элементов от 58 до 71, которая была названа семейством лантаноидов, поскольку химические свойства каждого из элементов семейства аналогичны свойствам элемента, предшествующего

данной серии,— лантана, атомный номер которого равен 57. По тем же соображениям серия трансурановых элементов вплоть до 103-го элемента, следовавшая за актинием (89) и начинавшаяся торием, была названа актиноидной.

ТРАНСУРАНОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Ко времени написания третьей из этой серии статей открытие новых трансурановых элементов происходило достаточно часто,— в среднем один новый элемент каждые два года. Неудивительно, что столь быстрый темп не мог долго сохраняться, так как для дальнейшего увеличения числа протонов в ядрах требовалась не только все более и более сложная аппаратура, но и разработка новых методов. Следует добавить, что синтезированные ядра оказывались менее стабильными, а это усложняло и без того достаточно трудоемкий процесс их обнаружения и идентификации. Несмотря на это, интерес к тяжелым синтетическим элементам продолжал расти благодаря успехам теории стабильности ядер, предсказавшей возможность существования синтетических элементов с таким большим атомным номером, что это выходило за пределы мечтаний людей, ранее занимавшихся этой проблемой. Параллельно с этими работами был достигнут большой прогресс в получении больших количеств нестабильных элементов вплоть до 98-го номера, расширились наши знания о свойствах этих элементов и были исследованы перспективные возможности их применения. На возросший интерес к работам по тяжелым синтетическим элементам указывает тот факт, что это направление фактически уже не является сферой деятельности только американских исследователей. В Дубне (СССР) создана циклотронная лаборатория под руководством Г. Н. Флерова. В области синтеза тяжелых элементов эта лаборатория по своим возможностям превосходит Радиационную лабораторию им. Лоуренса Калифорнийского университета в Беркли, где было открыто 9 из 11 трансурановых элементов и которая продолжает быть ведущей американской лабораторией по синтезированию новых элементов. Надо отметить, что в исследования этой проблемы, особенно ее теоретических аспектов, большой вклад вносят также ученые других стран.

В работе 1950 г., первой из этой серии публикаций, сообщалось о том, что стали известными элементы вплоть до элемента с атомным номером 97, берклия, а в периодической таблице, помещенной в статье, приводились предполагаемые положения элементов вплоть до элемента с атомным номером 118, который, по предсказаниям, должен был быть благородным газом, подобным радону. При этом точные положения, которые должны были занимать неоткрытые элементы в периодической таблице, не давались, хотя при этом и указывался возможный порядок заполнения электронных подболочек вплоть до 118-го элемента. Во второй статье, в 1956 г., отмечалось, что открыты элементы по 101-й — менделевий, и в представленной периодической таблице указывались положения элементов до 106-го включительно, а также электронные подболочки по 118-й элемент. В работе 1963 г. 102-й и 103-й элементы попали в группу уже известных элементов, а все элементы вплоть до 118-го стали занимать определенное положение в периодической таблице.

Основываясь на новой информации, мы берем на себя смелость привести более полную периодическую таблицу, размеры которой не могут не поразить воображения читателя (см. рис. 1). Таблица расширена далеко за пределы актиноидной серии (с 90-го по 103-й элемент) в транс-актиноидную область, состоящую из элементов, следующих за 103-м. Появление новой внутренней переходной серии, начинающейся где-то

около 122-го элемента и простирающейся до 153-го элемента, представляет собой замечательное свойство расширенной периодической таблицы. Мы называем эту группу элементов сверхактиноидной серией, по аналогии с лантаноидной и актиноидной сериями. Однако сразу же отметим, что сверхактиноидная серия состоит из 32 элементов, в то время как лантаноидная, так и актиноидная — из 14; поэтому трудно говорить об однозначном соответствии элементов этих серий. Элементы со 154-го по 168-й, следующие за сверхактиноидной серией, подобны элементам со 104-го по 118-й. При этом элемент 168 занимает в таблице место благородного газа, однако из-за большой массы его ядра было бы правильнее назвать его инертной жидкостью. Значительные усилия, направленные на получение 114-го и соседних с ним элементов, а также поиски в природе 110-го элемента свидетельствуют о серьезном отношении ученых к этой гипотезе. Более подробно об этих интересных веществах мы поговорим несколько ниже. На некоторое время просим читателя поверить нам, что соображения, благодаря которым стало возможным обсуждать вид периодической таблицы в области, до сих пор рассматривавшейся как недоступная для эксперимента, есть нечто существенно большее, чем необоснованная догадка.

ЭЛЕМЕНТЫ ОТ 101-го ДО 105-го

Нам хотелось бы в первую очередь ознакомить читателя с экспериментальными данными, относящимися к тем редким элементам, атомный номер которых больше 100. Эти элементы удастся получать в виде считанных атомов, так что, сколь это ни покажется парадоксальным, мерой количества нового элемента служит единичный атом. 101-й элемент, менделевий, в виде изотопа ^{256}Md , был впервые синтезирован в Беркли в 1955 г. При этом образовывался один атом на единицу временного интервала. Недавно стали известны другие изотопы менделевия; наиболее важным из них является ^{258}Md , который обладает удивительно большим временем жизни — период его полураспада 2 месяца. Он был получен в количестве, которое должно рассматриваться как большое — 10 000 атомов — при облучении изотопа эйнштейния позонами гелия. Поэтому вполне вероятно, что в конечном итоге может быть приготовлено достаточное количество менделевия для исследования его макроскопических свойств. Для изучения химической природы этого элемента химики Радиационной лаборатории им. Лоуренса использовали водный раствор изотопа ^{256}Md с периодом полураспада 77 минут. Полученные данные касаются валентного состояния элемента. Оказывается при этом, что менделевий помимо характерного для элементов актиноидной серии трехвалентного состояния имеет еще и относительно химически стабильное двухвалентное состояние.

В статье 1963 г. настоящего цикла приведено подробное описание метода, с помощью которого Альберт Гиорсо и его коллеги из Беркли в 1958 г. синтезировали 102-й элемент. Изотоп $^{254}102$ был отождествлен с помощью наблюдения и идентификации его дочернего ядра — изотопа фермия ^{250}Fm , образовавшегося вследствие α -распада. На основе ряда экспериментов считалось, что период полураспада изотопа $^{254}102$ равен трем секундам, однако в более поздних работах, как дубненской, так и берклийской групп, было показано, что это время жизни относится к другому изотопу, а именно $^{252}102$, который также появлялся в экспериментах 1958 г. Сейчас известно, что период полураспада элемента $^{254}102$ равен примерно одной минуте.

Еще более важным, чем решение этого сложного вопроса, явилось открытие нескольких других изотопов 102-го элемента, которое было

сделано в Дубне и в Беркли. Большинство из них имеет период полураспада более трех секунд. Такое время жизни позволяет радиохимикам с помощью ряда замечательных опытов выяснить химические свойства этих экзотических элементов. Так, например, исследуя изотоп $^{255}\text{102}$, период полураспада которого равен трем минутам, Яромир Малы, Торбьёрн Сиккеланд, Роберт Дж. Сильва и Гиорсо из Беркли показали в 1967 г., что двухвалентное состояние 102-го элемента оказывается очень стабильным в водном осадке. Такое поведение указывает на то, что при достижении границы актиноидной серии двухвалентное состояние становится более устойчивым, точно так же как и для подобного ему элемента семейства лантаноидов — иттербия (элемент 70); предсказания на этот счет были сделаны около 20 лет назад. Необходимо, однако, подчеркнуть, что легкость сведения к двухвалентному состоянию, наблюдение менделевия в состоянии с двойной валентностью и недавние указания на двухвалентное состояние калифорния (элемент 98) из актиноидной серии, — все это говорит о большей стабильности двухвалентного состояния в тяжелых актиноидных элементах в сравнении с лантаноидными элементами.

Честь назвать новый элемент обычно принадлежит стране, где он был открыт. По предложению Швеции Международный союз чистой и прикладной химии назвал 102-й элемент «нобелием» (символ Nb). Однако работа шведских ученых *) была признана ошибочной. Но в 1967 г. берклийская группа, которая открыла 102-й элемент, предпочла отказаться от своих прав на присвоение имени элементу и предложила принять в качестве названия нобелий.

Вслед за открытием в 1961 г. в Беркли 103-го элемента лоуренсия, с временем жизни 8 сек (^{257}Lr , ^{258}Lr или ^{259}Lr), сотрудниками Дубны в 1965 г. был обнаружен изотоп лоуренсия ^{256}Lr , с периодом полураспада 35 сек. В серии драматических экспериментов Гиорсо и его коллегам из Беркли в прошлом году удалось, используя небольшое количество атомов (порядка пяти атомов на эксперимент), пролить свет на двухвалентное поведение лоуренсия. Ими был применен метод экстракции из раствора: работая крайне искусно и быстро, они извлекли ионы лоуренсия из буферного жидкого раствора в органическом растворителе, затратив на экстракцию около 30 сек. При этом оказалось, что лоуренсий ведет себя иначе, чем дважды положительный нобелий, и очень похож на трехкратно положительные элементы, расположенные в начале актиноидной серии, на что указывал факт экстракции трехкратно положительных ионов в органической среде, в то время как для двукратно положительных ионов этого не наблюдалось. Такая аналогия в поведении и предсказывалась.

Попытки синтезировать и отождествить элементы 104 и 105 были предприняты как в Дубне, так и в Беркли. В 1964 г. Флеровым и его сотрудниками были опубликованы данные эксперимента по бомбардировке плутония-242 ионами неона; по утверждению авторов, в результате этой ядерной реакции образовывался изотоп 104-го элемента, а именно $^{260}\text{104}$. Согласно измерениям период полураспада был приблизительно равен 0,3 сек; распад синтезированного элемента происходил только вследствие спонтанного деления, которое не является специфическим механизмом, как, например, α -распад, позволяющий точно измерить и однозначно идентифицировать энергию изотопа. В 1966 г. Иво Звара и его коллеги из дубненской группы сообщили об эксперименте по выделению изотопа с периодом полураспада 0,3 сек из других продуктов реак-

*) Работа была выполнена совместно с американскими (Филдс, Фридман из Аргоннской национальной лаборатории), английскими (Милстед из Харуэлла) и шведскими (Аттерлинг, Форслинг, Холм и Аострём) учеными. (Прим. ред.)

ции. Они предполагали, что 104-й элемент должен быть первым трансактиноидным элементом и, следовательно, иметь свойства, подобные гафнию, под которым он расположен в периодической таблице. Именно эта гипотеза легла в основу методики выделения изотопа.

Дубненские физики считали, что они добились успеха, хотя до сих пор нет полной определенности и трудно говорить об однозначности выводов. Отметим, что берклийским исследователям не удалось подтвердить результаты дубненской группы. С другой стороны, они недавно доказали, что одним из изотопов, образующихся при бомбардировке калифорния-249 ионами углерода, является элемент $^{257}_{104}$, время жизни которого относительно α -распада равно 3 сек. Образующееся в результате α -распада дочернее ядро отождествляется с ранее известным изотопом nobelium-253. Таким образом, изотоп $^{257}_{104}$ является первым изотопом 104-го элемента с определенно известными свойствами.

Еще более неопределенной представляется работа дубненских исследователей по синтезу 105-го элемента. Облучая америций-243 ионами неона, они обнаружили два α -источника с периодом полураспада, меньшим трех секунд, которые, как они полагали, могли быть отнесены к изотопам $^{260}_{105}$ и $^{261}_{105}$. И снова эксперименты Гиорсо и его коллег не подтвердили эти результаты. Чтобы представить трудности, с которыми приходится сталкиваться при проведении исследований такого рода, достаточно сказать, что за 20 часов облучения на циклотроне в Дубне образуется только один атом *).

СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Для того чтобы изложить соображения, касающиеся возможности идентификации элементов, расположенных далеко за элементом с атомным номером 100, необходимо дать краткий обзор теории структуры ядра (отличающейся от электронной структуры), которые приводят к оптимистическому взгляду на возможность существования сверхтяжелых элементов.

История этого вопроса возникла 20 лет назад, когда Мария Гепперт-Майер из Чикагского университета и О. П. Л. Хаксел, Дж. Ханс, Д. Иенсен и Ханс Е. Сьюес из Гейдельбергского университета предложили «оболочечную» модель ядер, которые состоят из частиц, движущихся в поле ядерных сил. Было показано, что совокупность частиц (нейтронов и протонов) становится особенно стабильной, когда ядра содержат «магическое» число протонов или нейтронов. При этом стабильная структура может рассматриваться как оболочки, или сферические орбиты, которые полностью заполнены частицами ядра, по аналогии с заполненными электронными оболочками в благородных газах. Общеизвестно, что для элементов, расположенных ниже урана в периодической таблице, магические числа нейтронов (N) или протонов (Z), суть 2, 8, 20, 28, 50 и 82. Магическое число $N = 126$ является также очень важным в этой области, как это видно по особой стабильности свинца $^{208}_{82}\text{Pb}$ ($Z = 82$, $N = 126$), который имеет дважды магическое ядро. Теория оболочечной модели ядер прошла много стадий развития и достигла такого уровня, когда уже стало возможным рассчитать потенциал нуклона (протона или нейтрона) в искаженном деформированном (несферическом) ядерном поле на основе метода «нильссоновских орбиталей», развитого шведским физиком Свеном Гюстом Нильссоном.

*) Подробности, связанные с историей синтеза в Дубне на 310-см циклотроне многозарядных ионов элементов 102, 103, 104, можно найти в обзоре Г. Н. Флорова, З. А. Друина и А. А. Плева «Устойчивость тяжелых ядер и границы периодической системы элементов» (см. УФН 100 (1), 45 (1970)). (Прим. ред.)

Дальнейшее продвижение в области теории связано с моделью ядра в виде заряженной жидкой капли, впервые предложенной Нильсом Бором и Дж. А. Уилером. В этой модели для стабильных ядер принимается сферическая или каплевидная форма, образующаяся за счет равенства силы поверхностного натяжения, направленной внутрь, и силы отталкивания положительно заряженных протонов, направленной наружу. Дальнейшее развитие этой модели окажется полезным для предсказаний, касающихся стабильности тяжелых ядер по отношению к спонтанному делению и другим каналам распада. Дальнейшее обобщение капельной модели ядра было предложено в работах В. Д. Майера и В. Дж. Святецкого из Радиационной лаборатории им. Лоуренса; в их расчетах предполагается, что потенциальная энергия ядер является функцией числа нейтронов, атомного номера и формы ядра. Ядра большинства изотопов, включая изотопы лантаноидных и актиноидных элементов, имеют несколько деформированную форму, например эллиптическую, а ядра изотопов, оболочки которых заполнены или почти заполнены, — сферическую форму. Все сверхтяжелые элементы, ядерные оболочки которых не заполнены, должны вследствие спонтанного деления быстро распадаться на изотопы в районе средней области периодической таблицы.

Недавно Нильссоном, Святецким, В. М. Струтинским и другими учеными из ряда стран были получены весьма важные результаты. Используя известные данные о структуре ядер лантаноидов и актиноидов на основе капельной модели и применяя метод орбиталей Нильссона, они провели

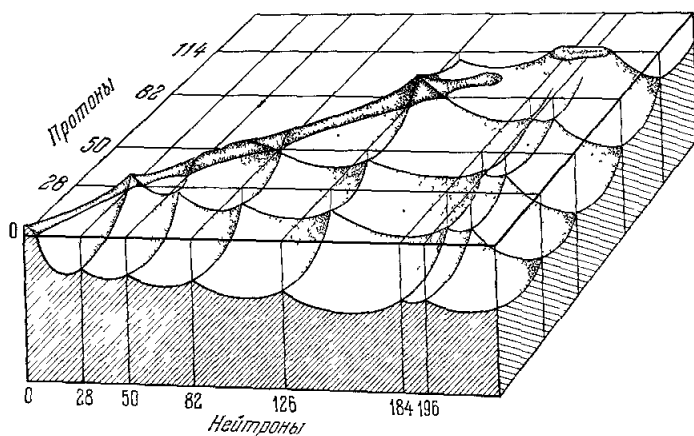


Рис. 3. На этом рисунке схематически в виде «суши в море» нестабильности показаны области известной или предсказываемой стабильности ядер. Линии соответствуют магическим числам протонов или нейтронов, для которых ядра оказываются исключительно стабильными. Дважды магическая область — 82 протона и 126 нейтронов — изображена «горным пиком»; холм соответствует предсказываемой дважды магической, но менее стабильной области в окрестности элемента, ядро которого состоит из 114 протонов и 184 нейтронов. «Горными хребтами» изображена область большой стабильности ядер, которые имеют одно магическое число. «Подводными горными хребтами» показаны нестабильные изотопы, ядра которых более устойчивы, чем их соседи, за счет полного заполнения оболочек нуклонами.

расчеты, с помощью которых установлена возможность существования заполненных ядерных оболочек в области сверхтяжелых элементов. Устойчивость таких ядер к распаду за счет спонтанного деления означает, что становятся существенными каналы распада за счет α - и β -излучения. Вычисления стабильности ядер по отношению к этим каналам

распада недавно были проведены в Беркли Нильссоном и его коллегой Чин Фу Тсуангом.

Эти теоретические вычисления наводят на мысль о существовании ядра с заполненной нуклонной оболочкой при $Z = 114$ и $N = 184$, которое будет весьма устойчивым по отношению к спонтанному делению.

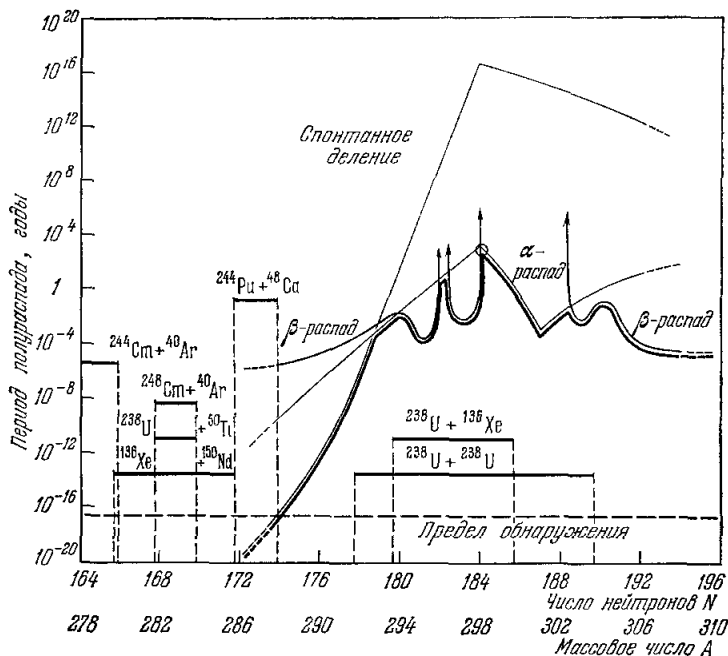


Рис. 4. Из теоретических вычислений следует, что ядра гипотетического 114 элемента должны обладать исключительно большой стабильностью. На рисунке показана зависимость периодов полураспадов для трех типов распадов от числа нейтронов в ядрах изотопов 114 элемента (т. е. при постоянном атомном номере). Изотопы отличаются количеством нейтронов в ядрах. Характер типа распада, за счет которого в основном происходит распад ядер элемента, зависит от нейтронного числа, как это изображено на рисунке жирной линией. Наиболее стабильным элементом оказывается изотоп $^{298}114$, который обозначен кружком. По оси абсцисс горизонтальными полосами указана область тех значений массовых чисел изотопов, которые можно было бы получить в различных ядерных реакциях, например, такой, как бомбардировка ядер кюрия-244 ионами аргона. Предсказываемая область высокой стабильности ядер расположена вблизи элемента с массовым числом и числом нейтронов, соответственно равным 298 и 184. В качестве наилучшей возможности для достижения указанной области предлагается уран-урановая реакция.

К счастью, ядра, состоящие из 114 протонов и 184 нейтронов ($^{298}114$), расположены в области стабильности относительно β -распада и являются дважды магическими, как и ядра свинца — 82-го элемента. Согласно расчетам, следующим (хотя и менее стабильным) будет ядро с $Z = 126$ (или 124), однако имеются новые указания, говорящие о том, что это не так. Более надежные вычисления Тсуанга приводят к существованию заполненной оболочки при $N = 196$. Хотя значение $Z = 164$ может быть предполагаемой точкой стабильности, эта возможность сколько-нибудь детально не исследовалась.

Повышенный интерес к синтезу и идентификации сверхтяжелых ядер объясняется еще и тем, что дважды магическое ядро $^{298}114$ является центром довольно большого «острова» стабильности в «море» спонтанного деления (рис. 3). Наибольшая устойчивость относительно спонтанного

деления наблюдается у элементов, находящихся в центре; при приближении к границам области нестабильность возрастает. Поведение периодов полураспада для спонтанного деления, α - и β -распадов в интересующей нас области, предсказанное Нильссоном, Тсуангом, Святецким и другими, показано на рис. 4 и 5. В приводимых здесь теоретических данных могут быть значительные ошибки, однако, даже если действительные

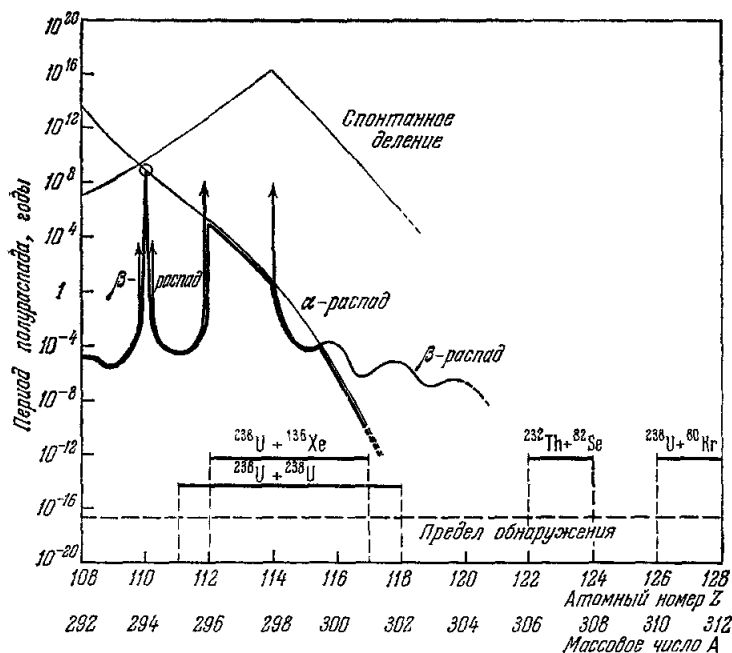


Рис. 5. На рисунке показана предсказываемая зависимость величины периода полураспада от атомного номера для различных сверхтяжелых элементов при постоянном числе нейтронов, которое определяется как разность между массовым числом и атомным номером и равно в данном случае 184. Самая нижняя кривая при любом фиксированном массовом числе или атомном номере выделяет основной канал, в котором период полураспада является наименьшим. Тип основного канала распада изменяется, как это показано на рисунке жирной кривой. Наиболее стабильным элементом (он обозначен кружком) оказывается элемент $^{294}110$. Горизонтальными линиями отмечены типичные ядерные реакции, которые могут быть использованы для получения ядер, содержащих 184 нейтрона; оказывается, что лишь с использованием уран-урановой реакции можно приблизиться к области наивысшей стабильности.

значения на несколько порядков ниже указанных, и тогда ядра с соответствующим атомным номером и массовым числом будут экспериментально наблюдаемыми. Предсказывается, например, что дважды магические ядра элемента $^{298}114$ имеют период полураспада относительно спонтанного деления 10^{16} лет, относительно α -распада — около 1000 лет и стабильны по отношению к β -распаду. Регистрация изотопов с временами жизни, меньшими нескольких наносекунд, оказывается за пределами возможностей используемой сейчас аппаратуры. Это обстоятельство накладывает ограничение на выбор и размеры теоретически предсказываемой области стабильности при проведении экспериментальных исследований.

Далее предсказывается, что должен иметь место максимум стабильности для ядер с числом протонов 110 и нейтронов 184 ($^{294}110$). Этот изотоп имеет период полураспада порядка 100 млн. лет в отношении как спонтанного деления, так и α -распада и, вероятно, стабилен относительно β -излучения. Время жизни — несколько сотен миллионов лет — вполне

достаточно для того, чтобы этот изотоп мог выжить и сейчас существовать в природе (как в случае урана-235, период полураспада которого 700 млн. лет), при условии, что он возник первоначально в результате ядерных реакций в космическом пространстве, которые привели к образованию Солнечной системы. Из рассмотрения периодической таблицы видно, что 110-й элемент гомологичен платине и его химические свойства должны быть подобны свойствам этого драгоценного металла. Поэтому в ряде лабораторий предприняты поиски 110-го и находящихся с ним по соседству элементов в платине и других металлах.

СИНТЕЗ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Есть указания, что сверхтяжелые элементы могут быть созданы только с помощью бомбардировки ядер мишени ускоренными пучками тяжелых ионов. На этом пути придется преодолеть немало экспериментальных трудностей. Выход желаемого ядерного продукта, как это предсказывается, очень мал. Это обусловлено тем, что подавляющая часть ядерных реакций при взаимодействии частиц пучка и ядер мишени ведет скорее к делению, а не к синтезу новых ядер. Имеющиеся в настоящее время в нашем распоряжении ядра мишени и пучки ионов не позволяют осуществить реакции создания ядер с таким числом нейтронов, чтобы попасть на «остров стабильности» ядер. Ионы-снаряды с требуемыми энергиями, которые скоро появятся в нашем распоряжении, позволят синтезировать ядра, которые расположены на границе острова стабильности и, следовательно, имеют столь малое время жизни, что их трудно будет зарегистрировать. Для достижения центра острова, возможно, потребуется модификация существующих или проектирование новых ускорителей, которые смогут обеспечить нас необходимыми тяжелыми и энергичными ионами.

Относительно легко осуществляется реакция, протекающая при бомбардировке изотопа кюрия ($^{248}_{96}\text{Cm}$) ионами аргона ($^{40}_{18}\text{Ar}$), продуктом которой является элемент $^{288}_{114}$. (Массовое число 284 имеет лишь иллюстративный смысл — оно может изменяться в интервале от 282 до 284 за счет испускаемых нейтронов.) В настоящее время уже имеются кюриевые мишени и пучки ионов аргона требуемой интенсивности и энергии. При этом можно получить элемент с атомным номером 114, однако число нейтронов оказывается равным всего лишь 170 ($284 - 114 = 170$). Поэтому совершенно очевидно, что такие ядра расположены в «море» спонтанного деления, а потому ненаблюдаемы. Работы по осуществлению этой реакции предпринимались в Беркли, однако определить продукты реакции не представлялось возможным.

Таким образом, необходимо синтезировать ядра с большим числом нейтронов. Лучшее, что можно сделать в ближайшем будущем, это осуществить реакцию по бомбардировке изотопа плутония ($^{244}_{94}\text{Pu}$) ионами кальция ($^{48}_{20}\text{Ca}$). В результате образуется элемент $^{288}_{114}$, ядра которого имеют 174 нейтрона и, следовательно, находятся на краю предсказываемого острова стабильности. Здесь используется то обстоятельство, что составные компоненты реакции содержат довольно большое число нейтронов. Изотоп ^{244}Pu относительно редкий материал, однако скоро его можно будет получить в достаточных количествах с помощью интенсивного облучения плутония ^{239}Pu нейтронами. Использование в качестве бомбардирующих частиц изотопа ^{48}Ca связано с серьезными трудностями. Дело в том, что в природном кальции содержится менее 0,2% этого изотопа и только с помощью процесса обогащения можно увеличить относительное содержание изотопа ^{48}Ca до необходимой степени.

с большим зарядом за счет удаления орбитальных электронов. Ни в США, ни в СССР сейчас нет ускорителей, на которых можно было бы ускорять столь тяжелые ионы до достаточно высоких энергий. Однако можно

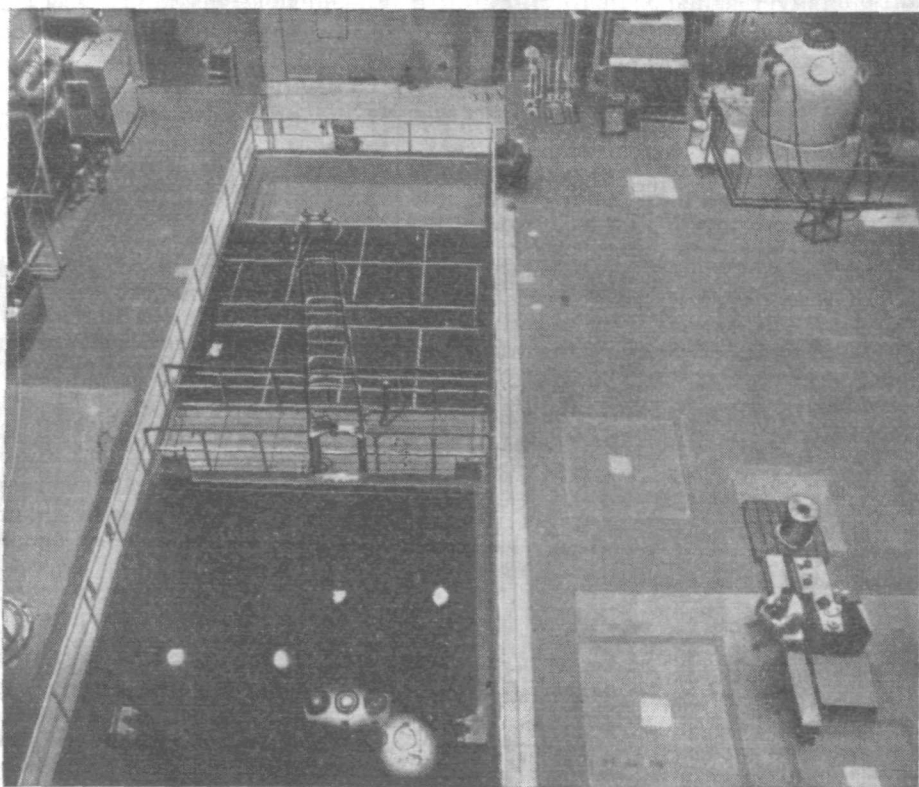


Рис. 7. Ядерный реактор Окриджской Национальной лаборатории, предназначенный для получения тяжелых элементов актиноидной серии вплоть до фермия включительно. Вверху, в водном бассейне, расположен контейнер высокого давления реактора. Внизу находится бассейн, где хранятся радиоактивные элементы, содержащиеся в сердцевине активной зоны реактора после облучения до тех пор, пока не уменьшится их радиоактивность. Справа, вверху, находится контейнер для транспортировки радиоактивных материалов.

надеяться, что в скором времени будут созданы новые или модифицированы существующие ускорители ионов, с помощью которых мы сможем решить проблему ускорения тяжелых ионов до требуемых энергий.

ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Выше мы подробно рассказали о строении ядер сверхтяжелых элементов. Однако химические свойства элементов почти полностью определяются расположением электронов вокруг ядер. У трансурановых элементов, открытых или предсказываемых к настоящему моменту, электроны расположены на семи оболочках: 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7-й, считая от ядра. Оболочки подразделяются далее на подоболочки, обозначаемые буквами *s*, *p*, *d* и *f*. У сверхтяжелых элементов впервые появляется оболочка под номером 8 и подоболочка *g* (рис. 2, б).

Сейчас, после того как мы объяснили, чем вызван наш оптимистический взгляд на возможность образования сверхтяжелых элементов, попытаемся найти каждому из них место в периодической таблице и, следовательно, предсказать химические свойства. Предварительно рассмотрим лантаноидную серию элементов, которая в периодической таблице заключена между элементами церием и лютецием включительно. Элементы этой

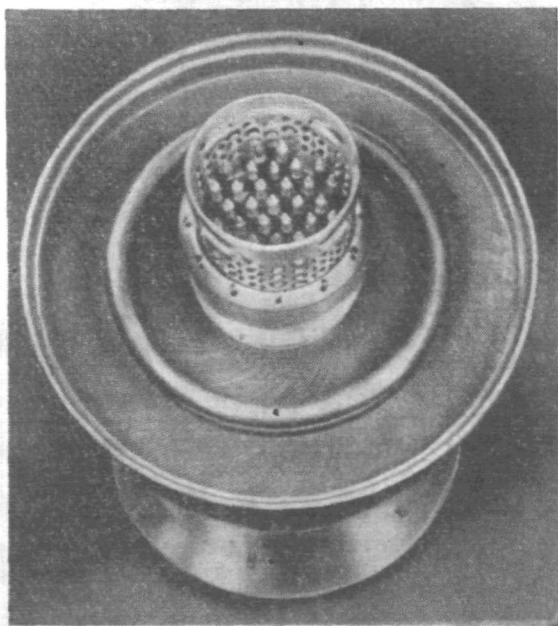


Рис. 8. Устройство активной зоны высоко-точного реактора изотопов состоит из 31 «узлов мишеней» (в центре), в которые помещается материал, предназначенный для облучения нейтронами. Количество облучаемого плутония 242 обычно равно 300 граммам. Чистый комплект топлива составляет около 9,4 килограмма урана-235. Внешний элемент состоит из 369 изогнутых пластин, а его диаметр равен $17\frac{1}{8}$ дюйма (43,5 см).

воляет проделать необходимые расчеты. Они были выполнены в Лос-Аламосской научной лаборатории для элементов с атомным номером вплоть до 132. Как показывают расчеты, элементы от 104-го по 112-й образуются вследствие заполнения подболочки $6d$, и потому их химические свойства подобны свойствам элементов от гафния до ртути. Элементы от 113-го по 118-й являются результатом заполнения подболочки $7p$ и, таким образом, подобны группе элементов, заключенных между таллием и радоном включительно.

Здесь было бы интересно заметить, что 114-й элемент, который уже неоднократно нами упоминался, соответствует такому стабильному элементу, как свинец. Поэтому его можно именовать «эка-свинцом», используя терминологию Д. И. Менделеева — создателя периодической таблицы — для обозначения неоткрытых элементов в периодической таблице, которые должны были бы быть по своим свойствам подобными предшествующим членам семейства. 119-й элемент должен быть щелочноземельным и 121-й элемент эквивалентным по своим свойствам актинию и лантану.

переходной серии отличаются друг от друга последовательным заполнением электронами внутренней подболочки $4f$. Максимальное число электронов подболочки f равно 14. Именно последовательным заполнением внутренней подболочки и объясняется подобие химических свойств лантаноидов. Аналогичным образом происходит формирование актиноидной серии элементов; при этом последовательно заполняется электронами внутренняя $5f$ -подболочка. Каждый элемент этой серии подобен по своим свойствам расположенному над ним элементу из лантаноидной группы. Актиниодная серия, состоящая из 14 элементов, завершается 103-м элементом.

Проведение крайне сложных и громоздких вычислений позволило бы, в принципе, предсказать электронную структуру актиноидных и неоткрытых трансактиноидных элементов. Использование вычислительной техники поз-

Несколько лет назад одним из нас (Сиборгом), а также советским физиком В. Гольданским и др. были рассмотрены еще другие внутренние переходные серии элементов, схожие с лантаноидной и актиноидной сериями, которые должны начинаться где-то в окрестности 120-го элемента. Из квантовой теории следовало, что эти серии должны появляться вследствие последовательного заполнения 18-ю электронами внутренней 5*g*-подоболочки или 14-ю электронами 6*f*-подоболочки. Однако порядок заполнения оболочек оставался невыясненным до проведения расчетов на вычислительной машине в Лос-Аламосе. Как теперь показывают расчеты, заполнение подоболочки 5*f* начинается после добавления нескольких электронов на 7*d*- и 6*f*-подоболочки. Естественно ожидать, что далее будет заполняться 6*f*-подоболочка. Это приведет к появлению внутренней переходной серии из 32 элементов, которая заканчивается 153-м элементом. Первые элементы этой серии, вплоть до 124-го элемента, по-видимому, будут соответствовать начальным элементам актиноидной серии. Сейчас трудно говорить слишком определенно о существовании корреляции между элементами этой серии, хотя трехвалентное состояние возможно и будет явно выраженным. Разность энергетических уровней добавляемых электронов крайне незначительна. Поэтому эта серия сверхактиноидных элементов будет представлять собой фактически вырожденные, слабо различающиеся валентные состояния, что в свою очередь затруднит химический анализ.

После завершения сверхактиноидной серии дальнейшее увеличение числа электронов на подоболочке 7*d* приводит к образованию элементов от 154-го до 162-го (от эка-104 до эка-112). Результатом заполнения шестью электронами оболочки 8*p* будет образование элементов от 169-го до 168-го. Заметим, что элемент 164 соответствует большой стабильности ядра и является эка-114-м элементом, или эка-эка-свинцом. Таким образом, известные или предсказываемые центры ядерной стабильности, такие, как олово (элемент 50), свинец (элемент 82), 114-й и 164-й элементы, являются членами одной колонки и семейства периодической таблицы. Это соответствие является удивительным, так как причины, обуслови-

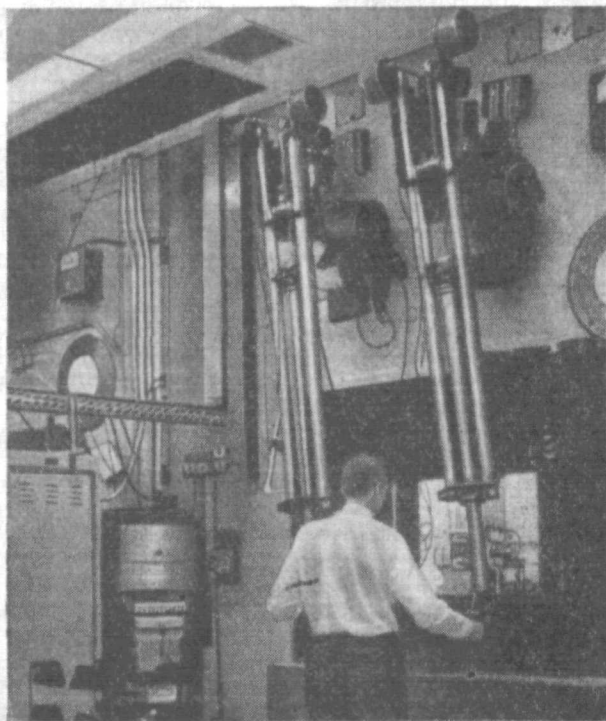


Рис. 9. Пульс управления аппаратурой, используемой при анализе трансураниевых элементов в Окриджской лаборатории. Здесь расположены щиты дистанционного управления механизмами для обработки элементов высокой радиоактивности. Камера, в которой производятся необходимые работы, находится за смотровым окном.

вающие стабильность ядер, очевидно, не имеют отношения к электронной структуре атомов, которая определяет расположение элементов в периодической таблице.

Если окажется возможным синтез сверхтяжелых элементов и их стабильность будет такой, как это предсказывается, то для доказательства их существования потребуется использование как методов химического анализа, так и методов ядерного детектирования. Химическое выделение должно планироваться на основе некоторых указаний о природе разыскиваемого элемента, а потому предсказания (такие, как были даны нами здесь) о химических свойствах новых элементов могут стать определяющими.

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Хотя главной причиной усилий, направленных на создание известных тяжелых элементов и синтезирование новых, является стремление увеличить наши знания о фундаментальных законах природы, эти работы ведут и к практическому применению тяжелых элементов в неожиданных масштабах. Кроме хорошо известной роли плутония как источника энергии при ядерных взрывах и в ядерных реакторах, большое значение приобретают и другие изотопы актиноидной серии. Например, в США было

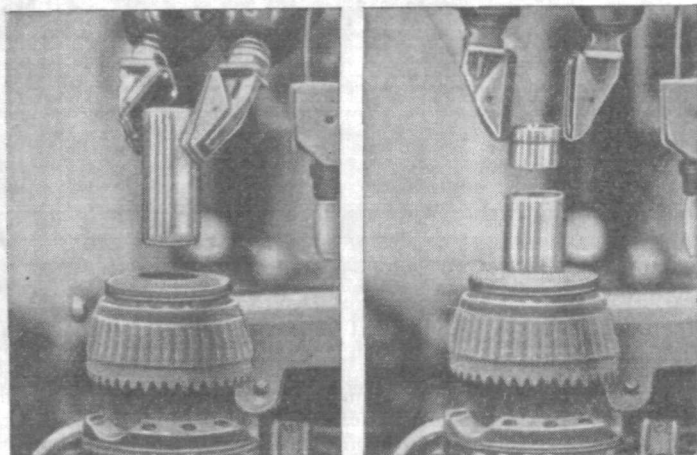


Рис. 10. Внутри камеры механическая «рука» вставляет цилиндр для транспортировки кюрия в сварочный аппарат (рис. слева). После того, как пять граммов кюрия помещены в цилиндр, насаживается головка (рис. справа). Затем головка приваривается к цилиндру с помощью электрода, расположенного справа, и цилиндр оказывается прочно закрытым.

получено большое количество изотопа плутония 238, который излучает α -частицы и образуется при поглощении нейтронов нептунием-237 (побочный продукт в ядерных реакциях), для использования его как теплового источника в дополнительных электросиловых системах, в основном на спутниках и в космических исследованиях. В дальнейшем изотопы найдут широкое применение для обеспечения энергией стимуляторов сердечной мышцы и, вероятно, в конечном счете, при создании искусственного сердца. Возможно, что потребность в плутонии-238 в ближайшие два или три десятилетия будет измеряться в нескольких тоннах.

Изотоп кюрия-244 также, возможно, найдет существенное применение в космических исследованиях.

Неожиданные возможности использования тяжелых элементов стали широко известны в 1967 г., когда космический корабль «Сервейер V» достиг Луны и провел химический анализ лунной поверхности при помощи рассеяния α -частиц, источником которых был кюрий-242. Для проверки исправности регистрирующей аппаратуры в качестве стандартов энергии использовались α -частицы небольшого количества эйнштейния-254.

Изотоп америция 241 получается при β -распаде плутония-241, вырабатываемого в реакторах. Количество образующегося америция измеряется килограммами, и он находит целый ряд применений. Гамма-излучение при распаде америция используется в устройствах для определения плотности различных жидкостей, измерения толщин и расстояний. Изотоп калифорний-252, который является самым интенсивным и компактным из всех известных источников нейтронов, в недалеком будущем будет вырабатываться в количествах, измеряемых граммами. Он найдет применение в таких областях, как радиотерапия рака, нейтронная радиография и нейтронно-активационный анализ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Glenn T. Seaborg, Man-Made Transuranium Elements, Printice-Hall, Inc., 1963.
2. Earl. K. Hyde, Synthetic Transuranium Elements, U.S. AEC, Division of Techn. Information, December 1964.
3. Glenn T. Seaborg, Ann. Rev. Nucl. Sci. 18, 53 (1968).
4. The Encyclopedia of the Chemical Elements (Cl. A. Hampel, Ed.). Reinhold Book Corp., 1968.
5. Glenn T. Seaborg, Isotopes and Rad. Techn. 6 (1), 1 (1968).