

Синтез и изучение новых изотопов и элементов

Г. Н. ФЛЕРОВ

Ныне в ядерной физике средних энергий интенсивно развиваются исследования, в которых используются ускоренные сложные ядра. Тем самым открываются возможности, недоступные другим методам синтеза, ведущие к изучению новых изотопов и элементов в широком интервале атомных номеров Z и массовых чисел ядер A .

Эти возможности вызывают большой интерес ученых, и проекты установок для ускорения тяжелых ионов в последние годы появляются в разных странах мира: в США спроектированы и строятся омнитрон, тандемы и циклотроны, во Франции осуществляется проект ускорителя, с помощью которого, по-видимому, удастся получить криптон с энергией, необходимой для преодоления кулоновского барьера тяжелых ядер, в ФРГ строится мощный линейный ускоритель.

Каковы же основные направления исследований на пучках ускоренных сложных ядер? Прежде всего — это синтез новых элементов и изотопов в широкой области Z и A , далее, изучение ядерных взаимодействий тяжелых ионов, в том числе ускоренных до релятивистских энергий, и, наконец, использование тяжелых ионов для ряда исследований по физике твердого тела и радиационной химии.

В Советском Союзе работы по синтезу новых элементов начались в 1955 г. в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова на циклотроне У-150, предназначенном для ускорения легких частиц. На нем были ускорены пучки тяжелых ионов вплоть до кислорода, изучены некоторые ранее не известные изотопы и синтезирован изотоп нового, 102-го элемента.

В этих первых работах по синтезу далеких трансурановых элементов интенсивность пучков ускоряемых ионов была незначительной, и, кроме того, набор ускоряемых частиц не позволял ставить эксперименты в широких масштабах.

В связи с этим было решено построить в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне специальный ускоритель многозарядных ионов, и в 1961 г. там был введен в строй циклотрон с диаметром полюсных наконечников 310 см, обладающий самыми высокими в мире параметрами (набор частиц, их интенсивность и т. п.). Благодаря правильному выбору метода ускорения тяжелых ионов

(циклотронный метод) и высоким параметрам ионного источника, разработанного в ИАЭ им. И. В. Курчатова, на этом циклотроне получены потоки ускоренных ионов неона и аргона с интенсивностью до 10^{14} ион/сек. На пучках таких частиц велись эксперименты по изучению механизмов взаимодействия сложных ядер, причем особое внимание уделялось проблеме синтеза новых элементов.

И в процессе синтеза курчатовия, и при получении изотопов 102-го и 103-го элементов необходимо было использовать обогащенные нейтронами разделенные изотопы кислорода (O^{18}), неона (Ne^{22}), азота. Кроме того, мишени, облучаемые пучками таких ускоренных частиц, должны были быть также нейтроноизбыточными (Pu^{242} , Am^{243}). Изотопная промышленность Советского Союза обеспечила необходимыми материалами работы по синтезу новых элементов и изотопов, выполнявшиеся на пучках тяжелых ионов циклотрона многозарядных ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Удалось получить и изучить свойства нескольких десятков изотопов далеких трансурановых элементов. В 1964 г. был открыт 104-й элемент, названный курчатовием. Несмотря на то что в процессе синтеза образуются весьма малые количества 104-го элемента, в 1966 г. были исследованы его химические свойства и показано, что далекие элементы подчиняются закономерностям, предсказываемым Периодическим законом Менделеева.

На работы по синтезу курчатовия и анализу его химических свойств понадобилось около шести лет. После того как новый элемент был синтезирован, стало ясно, что для его химического исследования необходим совершенно новый, скоростной метод. Обычные химические методы не подходили — слишком медленно идут реакции в водной среде, чтобы успеть исследовать химические свойства курчатовия за время его полураспада (0,3 сек). Большие сложности возникали и в связи с тем, что приходилось «анализировать» единичные атомы.

103-й элемент стал «замыкающим» в ряду актинидов. Было известно, что хлориды актинидов могут быть осаждены на фильтре. 104-й же элемент, согласно Периодическому закону, должен обладать свойствами, сходными со свойствами гафния, образующего с хлором летучие соединения, не осаждающиеся на фильтре

Эта аналогия и легла в основу метода химического исследования нового элемента.

Эксперимент проводился следующим образом. Позади мишени из Pu^{242} располагалась камера-пробник, в которую подавался поток азота, тормозящий ядра отдачи. Этот поток подхватывал выбитые из мишени ядра 104-го элемента и побочных продуктов и доставлял их в зону хлорирования. Сюда поступал также поток хлорирующего агента — тетрахлорида циркония, в результате взаимодействия с которым образовывался тетрахлорид 104-го элемента и хлориды актинидов. Увлекаемые хлорирующим агентом, который одновременно играл роль носителя, эти соединения попадали в фильтр, где хлориды актинидов осаждались, а тетрахлорид 104-го элемента проходил через фильтр. Хлорирование велось при температуре $350^\circ C$, что предъявляло высокие требования к коррозионной стойкости аппаратуры. Благодаря принятым в этом направлении мерам фон был полностью исключен.

После фильтра продукты реакции попадали в камеру, где осколки деления регистрировались слюдяными детекторами. Так как фильтр закрывал проход ядрам актинидов, полученные на детекторах следы могли быть следами только 104-го элемента. Они с несомненностью указывали, что курчатовий — аналог гафния.

Интенсивные пучки ускорителя У-300 и использование различных методов идентификации позволили синтезировать также шесть изотопов 102-го элемента. Вероятность образования ядер далеких трансплутониевых элементов в реакциях на тяжелых ионах весьма мала. Так, из 10 млрд. составных ядер с зарядом 104, образовавшихся в результате слияния неона ($Z = 10$) с плутонием ($Z = 94$), в оптимальных условиях только одно ядро может явиться предметом физического и химического исследования, а остальные за время 10^{-15} сек делятся на осколки благодаря энергии возбуждения, вносимой в них ионами неона.

Следует заметить, что надежды американских ученых на синтез далеких элементов в потоках нейтронов термоядерного взрыва не оправдались. Пока был получен только один новый изотоп фермия ($Z = 100$), и есть основания считать, что таким способом не удастся продвинуться далее 102-го элемента.

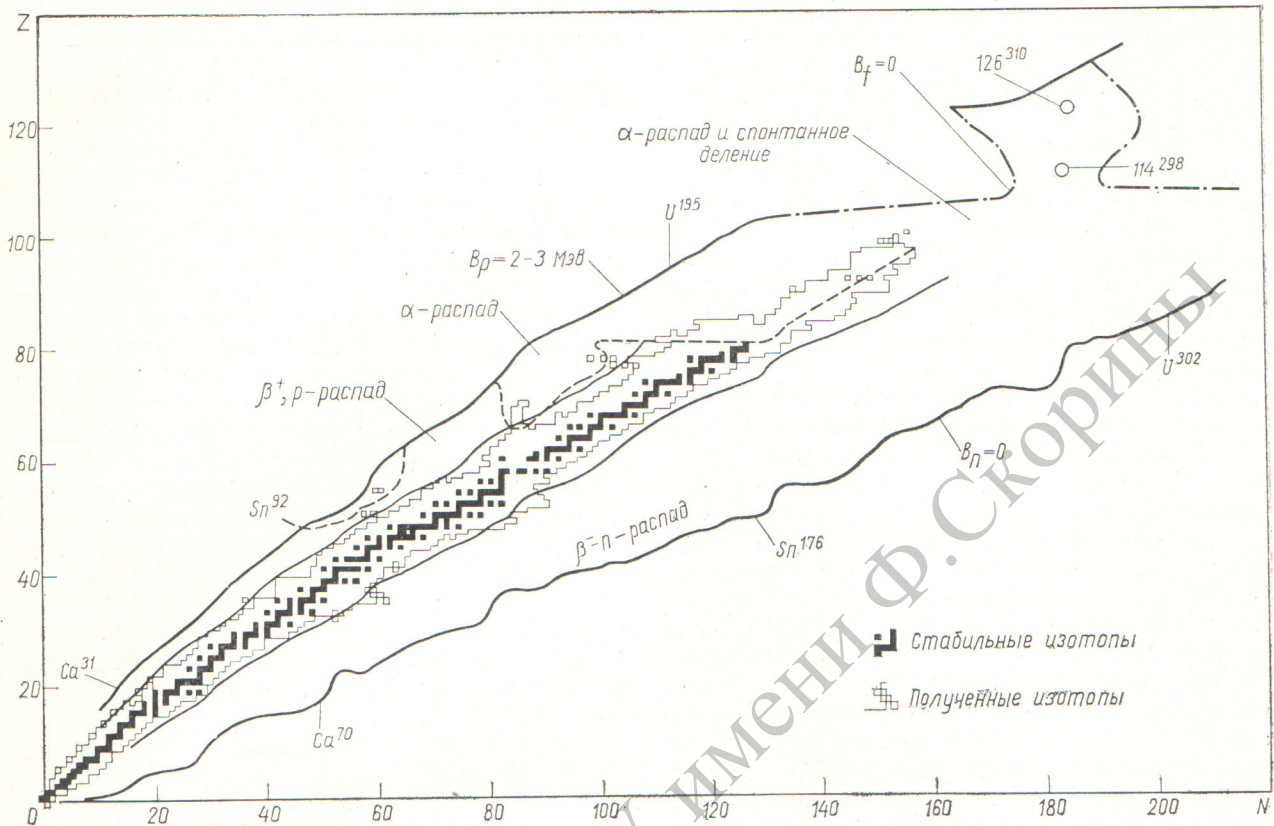
Синтез новых изотопов и изучение их свойств — одна из основных задач экспериментальной ядерной физики. Стабильных изотопов около 300, а радиоактивных, которые получены с помощью всех доступных экспери-

ментаторам методов за 32 года, прошедших со дня открытия Жолио-Кюри искусственной радиоактивности, порядка 1500 (рис. 1).

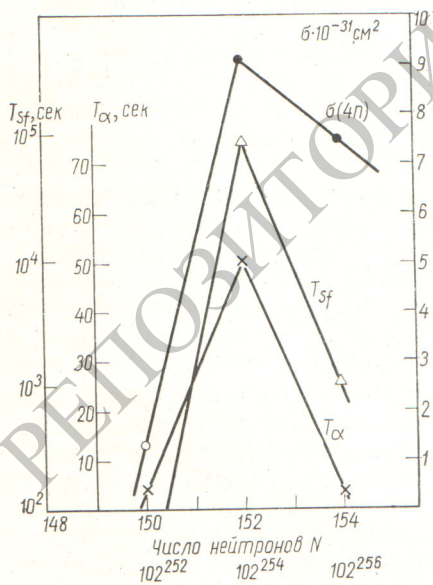
Возникает естественный вопрос: какие еще могут быть получены радиоактивные ядра, сколько их всего и каковы их свойства? Ответ был найден в ряде теоретических работ, основанных на уже имеющихся экспериментальных данных и современных представлениях о стабильности ядер. На рис. 1 контур ограничивает область ядер, для которых ожидаемое время жизни не менее 10^{-10} сек. Эта область значительно обширнее, чем та, которая занята существующими и синтезированными ядрами, и в ней содержится 3000—4000 изотопов. Существенно не только то, что в результате исследований изотопов в этой области ядерная физика получит большое число новых объектов для изучения (хотя это само по себе очень важно), но и то, что в этой области находятся ядра, сильно обогащенные протонами или нейтронами, синтез которых невозможен другими методами.

Изучение таких «предельных» ядер, как, например, ${}_{20}Ca^{31}$ или ${}_{20}Ca^{70}$, особенно ценно, поскольку позволяет получать несравненно больше данных, чем изучение изотопов с близким к «нормальному» отношением чисел протонов и нейтронов. Изученные свойства далеких трансураниевых элементов, синтезированных в реакциях на тяжелых ионах в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, позволили наметить пути синтеза высших элементов в новых областях стабильности с Z , лежащими в интервале 114—126.

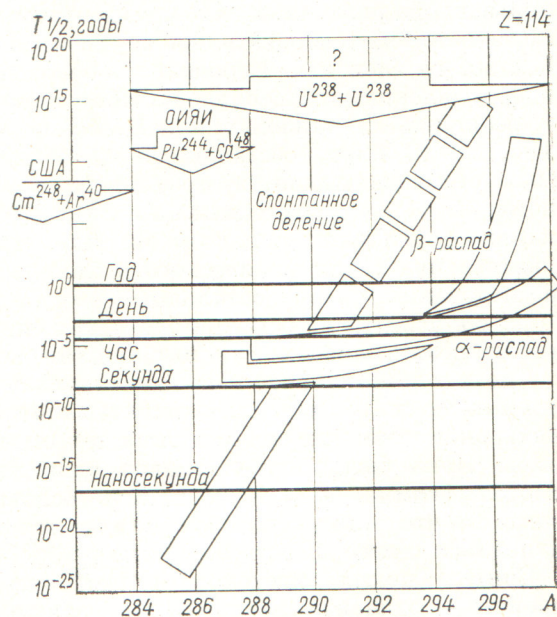
В связи с этим обратимся к рис. 2, где показана зависимость периодов полураспада по отношению к спонтанному делению и α -распаду от числа нейтронов в ядре для четных ядер 102-го элемента. В сильной степени выражено влияние заполненной нейтронной подоболочки со 152 нейтронами — периоды полураспада T_{sf} и T_α изотопа 102^{254} примерно на два порядка превосходят соответствующие периоды соседних четных изотопов. Особенно следует подчеркнуть, что сечение образования изотопа с замкнутой подоболочкой также выше, чем сечения образования соседних изотопов. На основании этого можно ожидать, что в случае ядер с замкнутыми нейтронной и протонной оболочками в области высоких значений Z «оболочечная» поправка компенсирует влияние кулоновских сил и дважды магические ядра будут относительно стабильны к спонтанному делению и α -распаду. Сечения



Р и с. 1. Таблица стабильных и синтезированных изотопов, а также изотопов, синтез которых может быть осуществлен в будущем.



Р и с. 2. Влияние замкнутой подоболочки с числом нейтронов 152 на время жизни изотопов 102-го элемента и сечение их образования в реакциях $\text{Sm}(\text{C}^{14}, 4n)$.



Р и с. 3. Зависимость времени жизни изотопов 114-го элемента от массового числа A по отношению к различным видам распада.

образования этих ядер также будут значительно выше, чем сечения соседних изотопов.

Вычисления возможных замкнутых нейтронных оболочек и влияния их на стабильность ядер в области $Z=114$, $Z=126$ и $N=184$ были выполнены в Советском Союзе В. М. Струтинским и др. [1] и в США Святецким и др. [2]. По их данным, период полураспада по отношению к спонтанному делению сверхядер с замкнутыми протонной и нейтронной оболочками может достигать 10^{16} лет ($Z=114$; $A-Z=184$). Теоретические оценки, однако, показывали, что время жизни таких ядер ограничивается другими видами распада и не превосходит нескольких лет (рис. 3). 114-й и соседние элементы лежат в области β -стабильности. Поэтому и соседние со 114-м элементы могут обладать достаточно большим временем жизни. Эти результаты были неожиданными и вселяли надежды на возможность синтеза сверхэлементов.

Поразительными оказались данные, о которых летом 1968 г. сделал сообщение проф. Пауэлл. Он рассказал об обнаружении группой проф. Фаулера ядер с зарядом $Z \geq 110$ в космических лучах. Позднее английские ученые пришли к мнению, что заряд этих частиц равен 106.

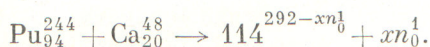
В экспериментах использовались ядерные фотоэмульсии, экспонированные длительное время на большой высоте над поверхностью Земли. Ширина следа, оставляемого ядерной частицей в эмульсии, пропорциональна Z^2 . Надежно и с большой статистикой наблюдались космические ядра железа ($Z=26$). Заряд ядер высших элементов определяется экстраполяцией от этого значения к большим Z . Однако экстраполяция от $Z=26$ до $Z \approx 110$ слишком далекая, в связи с этим в определении Z могут вноситься большие ошибки. На наш взгляд, существует возможность более точного определения Z космических тяжелых ядер. Калибровка эмульсий может быть проведена во время самих измерений при условии достаточно большой статистики. Это связано с тем, что в интервале атомных номеров 83—90 нет долгоживущих изотопов, которые могли бы достигнуть поверхности Земли, не претерпев распада. Поэтому, если статистика достаточно велика, будет наблюдаться «провал» в значениях Z именно в этой области, а так как ее края четко определены значениями Z , равными 83 и 90, в распоряжении экспериментаторов окажутся необходимые калибровочные данные,

и это позволит установить с достаточно высокой точностью атомные номера сверхэлементов, приходящих на Землю из космоса.

Необходимо отметить, что время движения таких сверхядер от их источников, например сверхновых звезд, до Земли порядка сотен миллионов лет. Поэтому, коль скоро эти ядра достигают Земли, не претерпев распада, их время жизни, по крайней мере, должно быть того же порядка, т. е. 10—100 млн. лет. Синтез изотопов 102, 103 и 104-го элементов и изучение их свойств позволили надежно оценить времена жизни всех изотопов в области порядковых номеров 101—108. По нашим оценкам, времена жизни самых долгоживущих изотопов в этой области не превышают нескольких суток [3]. Поэтому среди космических тяжелых ядер с $Z > 100$ могли бы существовать только ядра элементов новой области стабильности с атомными номерами, близкими к $Z=114$.

Химические исследования курчатовия показали, что начиная с $Z=104$ уже застраивается внешняя электронная оболочка, т. е. курчатовий оказался химическим гомологом гафния. На основании этого факта можно с уверенностью предсказать химические свойства и высших элементов в широкой области значений Z , в частности химические свойства 114-го элемента. В интервале атомных номеров 104—114 не должно ожидать каких-либо отклонений от нормальной застройки оболочки 7 p . В этом случае 114-й элемент должен быть химическим гомологом свинца. Это обстоятельство позволяет надеяться на обнаружение 114-го элемента в свинцовых минералах. Если опираться на данные, полученные Фаулером и др. (см. работу [4]) (по данным Фаулера, на земную поверхность в сутки падает ~ 1 мг «эка-свинца»), то возможная концентрация «эка-свинца» в первозданном свинце не может превысить 10^{-14} г/г, если предположить, что период полураспада «эка-свинца» порядка 100 млн. лет. При этих условиях в природном свинце можно было бы наблюдать эффект спонтанного деления с кажущимся периодом полураспада 10^{22} — 10^{23} лет. Поэтому для регистрации актов спонтанного деления в природном свинце необходимо разработать метод, позволяющий использовать большие количества вещества и вместе с тем нечувствительный к фону осколков деления, обусловленному космическими лучами и другими причинами. В дальнейшем можно будет предпринять попытки обогатить фракцию «эка-свинца», основываясь на отличиях его химических свойств от обычного свинца.

Наиболее перспективен все же искусственный синтез изотопов сверхэлементов. Единственным возможным пока методом синтеза сверхэлементов является метод тяжелых ионов. Однако при существующих в наши дни капиталовложениях в технику ускорения тяжелых ионов этим методом могут быть получены только короткоживущие изотопы сверхэлементов, так как ускорители ядер урана еще не построены. Если обратиться к рис. 3, на котором представлена зависимость времени жизни изотопа по отношению к различным видам распада 114-го элемента в зависимости от массового числа, то становится очевидным, что время жизни изотопов 114-го элемента в сильной степени возрастает при увеличении числа нейтронов в ядре. (График построен по данным, полученным в одном из вариантов расчета Святецкого.) Поэтому в процессе синтеза 114-го элемента в реакциях, идущих через составное ядро, необходимо мишени, предельно обогащенные нейтронами, облучать ускоренными сложными ядрами, у которых отношение A/Z также достаточно велико. Наиболее подходящей будет реакция



И Ca^{48} , и Pu^{244} могут быть накоплены только при очень высоком уровне развития изотопной промышленности. В такой реакции уже можно синтезировать 114-й элемент со временем жизни, достаточным для его идентификации.

Значительно более перспективны синтез и исследование новых изотопов и элементов

в реакциях слияния тяжелых ядер, позволяющих получить составные ядра типа 184^{476} ($\text{U}^{238} + \text{U}^{238}$). Такие составные ядра делятся практически мгновенно. Однако среди их осколков деления могут быть и ядра 114-го элемента с высоким значением массового числа. При этом нужно ожидать среди осколков деления относительно высокий выход ядер сверхэлементов с большим периодом полураспада.

Таким образом, можно выделить основные направления синтеза новых изотопов и элементов.

1. Получение изотопов и элементов в реакциях на тяжелых ионах, идущих через составное ядро. И в этом методе особую важную роль играют разделенные изотопы, обогащенные нейтронами.

2. Синтез новых изотопов и элементов в реакциях типа $\text{U} + \text{U}$. Развитие таких методов связано с созданием специальных ускорителей.

3. Поиск и идентификация новых элементов в космических лучах и естественных минералах.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Струтинский, Ю. А. Музычка. Препринт ОИЯИ D7-3548 (1966).
2. W. Myers, N. Swiatecki. UCRL-11980, 1965.
3. V. Viola, G. Seaborg. J. Inorg. and Nucl. Chem., 28, 741 (1966).
4. С. Ф. Пауэлл. «Вестн. АН СССР», № 9,5 (1968).

Применения эффекта Мёссбауэра в науке и технике

в. и. гольданский

Прошло немногим более десяти лет со времени замечательного открытия немецким физиком Мёссбауэром явления γ -резонансного поглощения и испускания γ -квантов ядром без отдачи, получившего название «эффект Мёссбауэра» [1]. На основе этого эффекта создан и продолжает развиваться новый метод исследований — γ -резонансная (ГР) спектроскопия, находящая себе все более многообразные применения в разных областях науки и техники.

Пример эффекта Мёссбауэра и ГР-спектроскопии ярко показывает, что общеизвестные следствия открытия деления ядер далеко не исчерпали вклада ядерной физики в общий прогресс науки и техники. Попытаемся пока-

зать, как широки и разносторонни возможности, связанные с эффектом Мёссбауэра, и сколь велика роль работ советских ученых в возникновении ГР-спектроскопии на основе эффекта Мёссбауэра * и во всевозможных ее применениях: в ядерной физике и физике твердого тела, в разных областях химии и биологии, в геологии и металлургии, в технике и приборостроении.

Работы по эффекту Мёссбауэра были начаты в нашей стране в 1960 г. В первой совет-

* Можно уподобить путь от первых работ Мёссбауэра к созданию основ современной ГР-спектроскопии пути от открытия расщепления урана Ханом и Штрассманом к осуществлению цепной реакции деления.