

### 3.2 Новые тяжёлые элементы

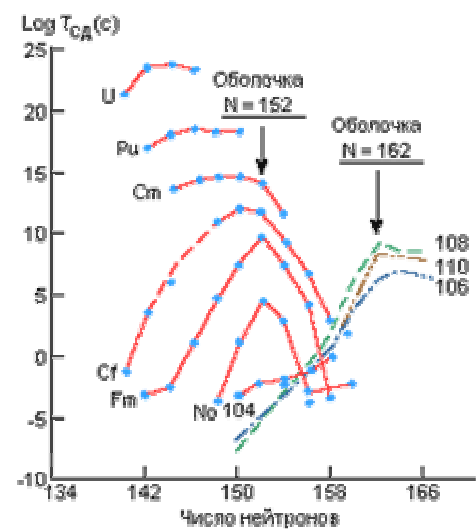
В настоящее время полагают, что основная часть Периодической таблицы заполнена полностью, и обнаружить внутри её какие-либо новые элементы невозможно. Единственная перспектива – выйти за пределы Таблицы, синтезируя элементы с всё большим числом протонов. Сейчас Периодическая система элементов продолжает развиваться за счёт наработки новых «сверхтяжёлых» элементов.

Все элементы с  $Z > 93$  синтезированы искусственно с использованием интенсивных потоков нейтронов или пучков ускоренных тяжелых ионов. Нейтронный метод синтеза новых элементов, использующий потоки нейтронов из реакторов или ядерных взрывов, дал возможность синтезировать новые элементы вплоть до фермия ( $Z=100$ ). Метод этот основан на последовательном захвате нейтронов ядрами урана. Например, ядро  $^{238}\text{U}$  поглощает нейтроны, превращается в ядро  $^{239}\text{U}$ , которое испытывает электронный распад и превращается в ядро 93-го элемента –  $^{239}\text{Np}$ . Если облучение в реакторе проводится достаточно длительное время (год или более), то за это время в образце накопятся ядра не только нептуния, но и следующих за ним элементов. Например,  $^{239}\text{Np}$  может в результате электронного распада превратиться в 94-й элемент –  $^{239}\text{Pu}$ . Затем ядро этого элемента захватывает два нейтрона, после чего  $^{241}\text{Pu}$  испытывает электронный распад и превращается в ядро 96-го элемента – америция и т.д. Однако ядра тяжелее 100-го элемента – фермия нейтронным методом синтезировать не удалось.

Принципиальное ограничение на синтез новых элементов таким способом связано с существованием других типов распада в цепочке образующихся ядер, например, спонтанного деления, которое разрывает цепочку ядер, образующихся после захвата нейтронов. Восемь элементов, завершающих первую сотню периодической таблицы, были открыты американскими учеными с использованием нейтронного метода.

Дальнейшее продвижение в область трансфермиевых элементов стало возможным лишь с появлением ускорителей тяжелых ионов. При слиянии двух ядер может образоваться новое ядро с зарядом, равным сумме зарядов двух ядер. Эти так называемые реакции полного слияния, о которых говорилось выше, были успешно реализованы на ускорителях тяжелых ионов. Синтез элементов «второй сотни» с использованием реакций с тяжелыми ионами велся исключительно на циклотронах. Эксперименты были чрезвычайно сложными. Из миллиардов образующихся ядер нового элемента выживало лишь одно. Все остальные быстро распались путем деления на два осколка, испускания нейтронов и заряженных частиц.

Кроме этого, новые трансфермиевые ядра имели время жизни порядка секунд (для  $Z=101-103$ ) и оно катастрофически уменьшалось с увеличением порядкового номера элемента (**Рис.4**).



**Рис. 4.** Зависимость времени жизни изотопов различных элементов по отношению к спонтанному делению ( $T_{сд}$ ) от числа нейтронов. Пунктиром показаны расчетные кривые для 106, 108 и 110 элементов.

Еще в 1966 В.М.Струтинским было предсказано сильное увеличение стабильности (времени жизни) ядер вблизи магических чисел 114 для протонов и 184 для нейтронов (114-й элемент с числом нейтронов 184). Эти предсказания основывались на оболочечной модели, в которой ядро рассматривается как ряд последовательно заполняемых протонных и нейтронных оболочек. Ядра с замкнутыми оболочками, имеющими число протонов или нейтронов 2, 8, 20, 50, 82, 126, отличаются от своих соседей повышенной стабильностью.

Последним известным дважды магическим ядром является изотоп свинца-208 (82 протона и 126 нейтронов). Как показали теоретические расчеты, магическими числами являются также 114 для протонов и 184 для нейтронов. Изотопы вблизи следующего за свинцом-208 дважды магического ядра 114-298 должны обладать повышенной стабильностью и именно здесь можно ожидать нового увеличения времени жизни сверхтяжелых элементов. Эксперименты подтвердили значительное увеличение стабильности тяжелых изотопов 106, 108 и 110-го элементов вблизи числа нейтронов, равного 162. Физики считают, что это обусловлено существованием еще одной нейтронной оболочки, связанной с деформацией ядра.

В правом верхнем углу  $N-Z$  диаграммы (**Рис.1**) расположена интенсивно исследуемая в настоящее время область сверхтяжелых атомных ядер. Открытие и исследование сверхтяжелых атомных ядер с

Z=109-118 показывает, что в этой области ядер существенную роль в повышении их стабильности играют ядерные оболочки. Достаточно хорошее согласие теоретических расчетов с полученными в последнее время экспериментальными данными (Рис.5) позволяет прогнозировать существование острова стабильности в районе Z=110-114 и N=178-184. Трудность проникновения на остров стабильности связана с тем, что нет комбинации соответствующих ядер, использование которых в качестве мишени и налетающей частицы позволили бы попасть в центр острова стабильности.

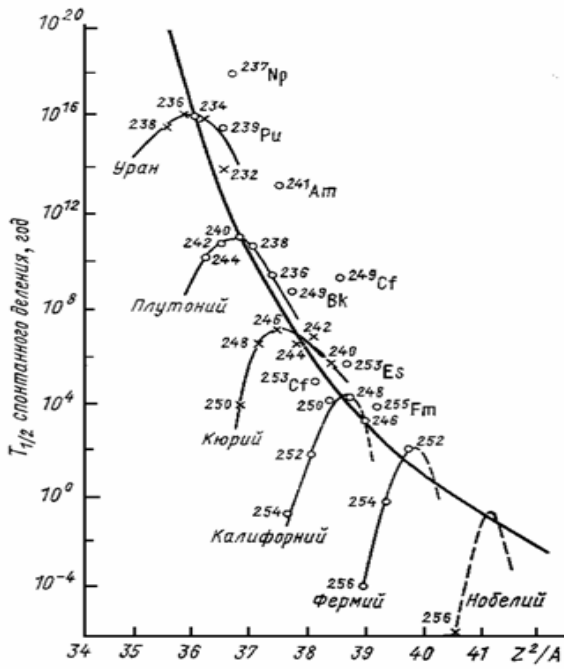
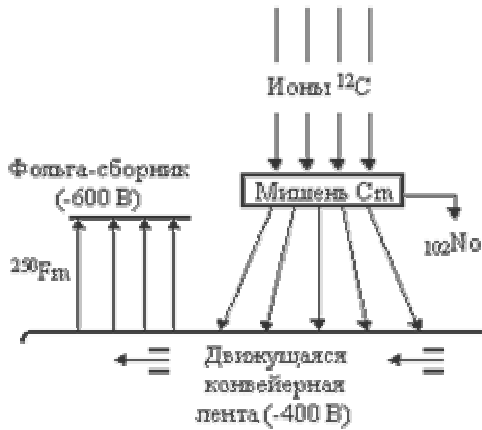


Рис. 5. Периоды полураспада тяжёлых ядер

С продвижением в трансурановую область возникла проблема выделения и идентификации короткоживущих изотопов. В связи с тем, что для получения этих элементов, как правило, используют пучки тяжелых ионов, продукты реакции за счет большого первоначального импульса вылетают из мишени в направлении первичного пучка. Это обстоятельство и используется для идентификации продуктов реакции.

первоначального импульса вылетают из мишени в направлении первичного пучка. Это обстоятельство и используется для идентификации продуктов реакции.

Рис. 6. Схема установки по изучению изотопов методом двойной отдачи



Выбитые из мишени продукты реакции собираются с помощью различных методов и переносятся к анализирующему устройству. Наиболее простой метод - метод прямого сбора ионов отдачи на механической подложке. В некоторых экспериментах используется то обстоятельство, что образующиеся трансфермиевые элементы часто распадаются с испусканием  $\alpha$ -частиц. Тогда находящийся на движущейся ленте радиоактивный изотоп, образующийся в результате  $\alpha$ -распада, вновь получает импульс отдачи и переходит на второй сборник (Рис. 6). Этот метод, называемый методом двойной отдачи, позволяет провести дополнительную селекцию продуктов реакции.

Часто используется метод торможения ионов отдачи в газовой среде с последующим сбором их либо с помощью электростатического поля, либо с помощью газовой струи. В качестве тормозящего газа чаще всего используется инертный газ гелий.

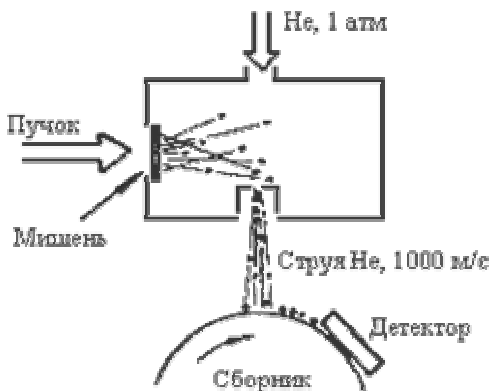
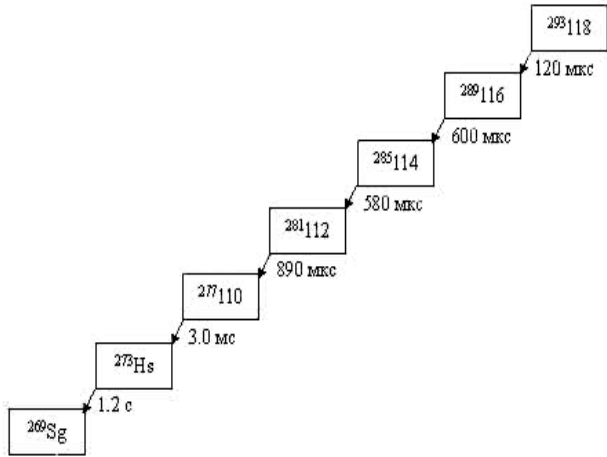


Рис. 7. Схема установки для сбора атомов отдачи из газовой струи

Рис. 7 иллюстрирует один из способов использования метода газовой струи. Ядра отдачи тормозятся в специальном объеме, заполненном гелием при давлении около 1 атмосферы.

Капиллярная трубка соединяет этот объем с другим объемом, откачиваемым с помощью высокоскоростного насоса. За счет разницы в давлениях образуется узконаправленная газовая струя. Ионы отдачи в этой струе имеют скорости около 1000 м/с. Газовая струя ударяет в сборник и тяжелые ионы адсорбируются на его поверхности. Часто используется модификация метода газовой струи, при которой струя газа пропускается через бумажные либо органические волокнистые фильтры. Все эти методы обеспечивают 70-80% сбора образующихся ядер. Эффективность регистрации слабо меняется с течением

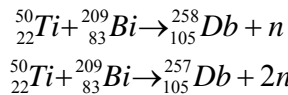
времени, что особенно существенно для экспериментов с низким выходом продуктов реакции. Следующая задача - быстрая транспортировка продуктов реакции к детектору. Часто сборники устанавливаются на движущейся ленте либо на вращающемся колесе. Зная скорость движения сборника и измеряя число зарегистрированных событий несколькими детекторами, расположенными по направлению движения, можно определить период полураспада образующегося изотопа.



**Рис. 8.** Пример цепочки последовательных  $\alpha$ -распадов при синтезе сверхтяжёлого ядра.

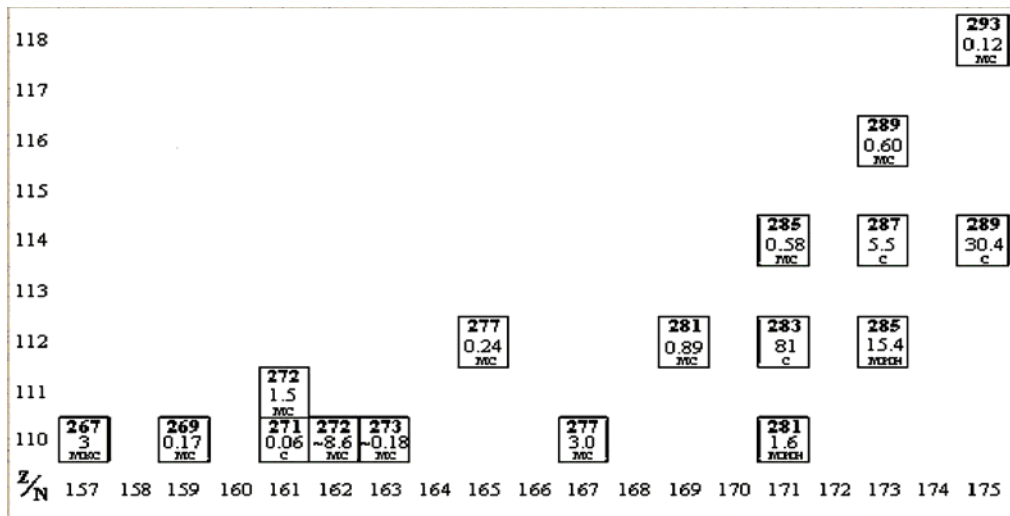
При идентификации трансфермиевых элементов было использовано то обстоятельство, что в области трансфермиевых элементов  $\alpha$ -распад является одним из основных типов радиоактивного распада. Поэтому идентификация цепочек последовательного  $\alpha$ -распада (**Рис. 8**) становится важным методом идентификации изотопов. Рассмотрим это на примере 105 элемента. Для получения 105-го элемента в качестве мишени был выбран

изотоп висмута  $^{209}\text{Bi}$ . При облучении его ионами  $^{50}\text{Ti}$  ожидалось образование изотопов дубния ( $Z=105$ ) с массовыми числами 258 и 257.



Последний канал реакции наблюдался при энергии ионов титана 4.92 МэВ/нуклон как цепь распадов, оканчивающихся изотопами  $^{249}\text{Md}$  и  $^{245}\text{Es}$ . Обнаружение  $\alpha$ -распадов с энергией 8.940 и 8.750 МэВ коррелирует с хорошо установленным распадом  $^{249}\text{Md}$  ( $E_\alpha=7.980$  МэВ). При энергии 4.75 МэВ/нуклон наблюдались две различные цепочки распадов, соответствующих образованию изотопов дубния с массовым числом 258. Периоды полураспада изотопов  $^{258}\text{Db}$  и  $^{257}\text{Db}$  составляют соответственно  $4.4 \pm 0.7$  с и  $0.7 \pm 0.3$  с. Таким образом анализ цепочек распада трансфермиевых элементов показывает, что для большинства ядер с  $Z > 100$  наблюдается каскадный  $\alpha$ -распад. При этом по мере увеличения  $Z$  увеличивается и энергия  $\alpha$ -распада. Регистрация энергий последовательно испускаемых  $\alpha$ -частиц является одним из основных методов идентификации трансфермиевых элементов.

Некоторые изотопы сверхтяжёлых элементов представлены на **Рис. 9**. Видно, что в основная масса их имеет периоды полураспада, измеряемые микросекундами, однако, при приближении к области стабильности время жизни составляет уже секунды, а в районе «магических чисел» периоды полураспада достигают десятков минут.



**Рис. 9** Дальние трансурановые элементы

Замечание. Международный Союз чистой и прикладной химии присвоил следующие названия и символы вновь открытым элементам «второй сотни»: 101 – Менделевий, Md; 102 – Нобелий, No; 103- Лоуренсий, Lr; 104 – Дубний, Db; 105 – Жолиотий, Jl; 106 – Резерфордий, Rf; 107 – Борий, Bh; 108 – Ганий, Hn; 109 – Майтнерий, M. Остальные сверхтяжёлые элементы

названий пока не имеют.