

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра общей ядерной физики

Курсовая работа

по теме “Синтез сверхтяжелых элементов”

Выполнил студент 211 группы

Мостаков Иван Алексеевич

Введение

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, которые связаны ядерным взаимодействием. Ядра делятся на радиоактивные и стабильные в зависимости от времени жизни и соотношением между числом протонов Z и нейтронов N . На нынешний момент известно около 3500 атомных ядер, и только около 300 из них являются стабильными. Все эти ядра изображены на N - Z диаграмме.

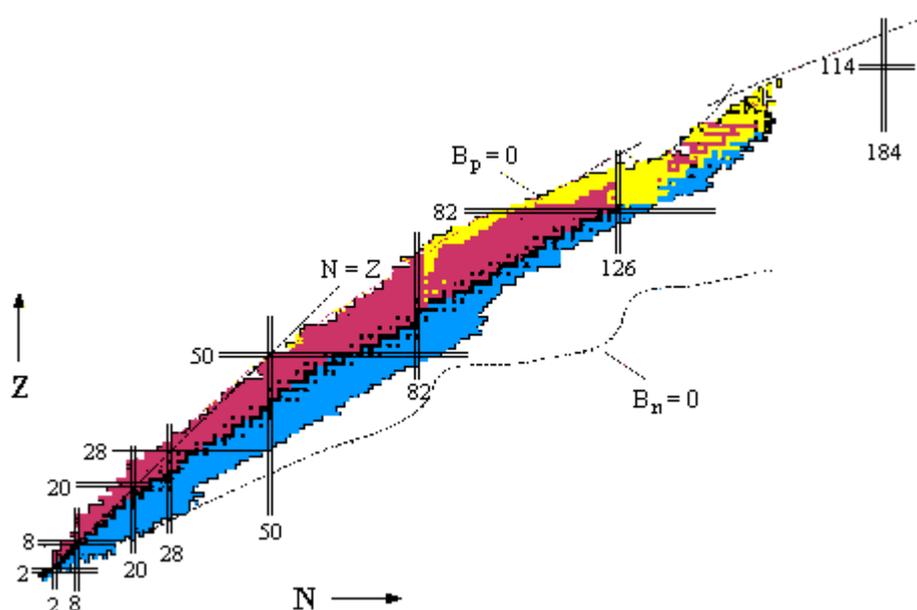


Рис.1 N - Z диаграмма атомных ядер

Черным цветом на диаграмме показаны с стабильные ядра. И как видно, с повышением массы у стабильных ядер растет отношение числа нейтронов к числу протонов. Это связано с возрастанием кулоновского взаимодействия. Красным цветом показаны ядра, подверженные β^+ распаду, синим цветом ядра, подверженные β^- распаду, и желтым цветом отмечены α - радиоактивные ядра.

Самыми тяжелыми стабильными ядрами являются изотопы свинца $Pb(N = 207,208; Z = 82)$ и висмута $Bi(N=209; Z = 83)$. Область ядер не бесконечна, её ограничивают граница, для ядер которой энергия отделения протона для протоноизбыточных ядер и нейтрона для нейтроноизбыточных равна нулю. Внутри этой ограниченной области может находиться еще около 2500-3000 не открытых ядер. Также существует граница в области сверхтяжелых элементов, ядра с $Z > 92$ не были обнаружены в природе, все они синтезированы искусственно. В

области сверхтяжелых возникают несколько вопросов. Какие свойства характерны для сверхтяжелых элементов? Есть ли граница, новый остров стабильности и новые магические числа? С помощью каких реакций следует пытаться синтезировать такие элементы? Какие тип распада и время жизни характерны для сверхтяжелых? На эти вопросы пытаются найти ответы и все это объяснить, создавая различные модели атомных ядер.

Модель жидкой капли

Одной из первых моделей атомного ядра, была жидкокапельная модель. Она была навеяна результатами измерений радиусов ядер, которые показали, что плотность в ядре близка для всех ядер, независимо от размера. По этой модели ядро представляет собой сферическую несжимаемую каплю из заряженной ядерной жидкости. В рамках этой модели была получена полуэмпирическая формула для энергии связи ядра, которая дает понимание процессов деления ядра и α - и β -распадов, позволяет оценить энергию связи и масс, рассчитать пороги ядерных реакций.

Также модель жидкой капли смогла объяснить деление тяжелых элементов. Этот процесс объясняется тем, что удельная энергия связи ядра уменьшается с ростом массового числа A , так как увеличивается кулоновское взаимодействие внутри ядра. Все это приводит к тому, что чем больше в ядре нуклонов, тем более выгодно ядру делиться. И так как это деление происходит как взаимодействие нуклонов ядра, характерное время этого взаимодействия примерно 10^{-20} - 10^{-23} с. Но так не происходит, некоторые периоды достигают нескольких лет. Это происходит из-за потенциального барьера, который осколки должны преодолеть. Этот барьер возникает из-за того, что поверхностная энергия связи стремится вернуть ядро в сферическое состояние, а кулоновские силы, наоборот, стремятся увеличить расстояние между протонами в ядре, то есть деформировать, растянуть ядро. Этот барьер, например, для ^{238}U достигает примерно 6 МэВ, но с увеличением атомного номера его высота быстро падает. Высота барьера обратно пропорциональна величине Z^2/A .

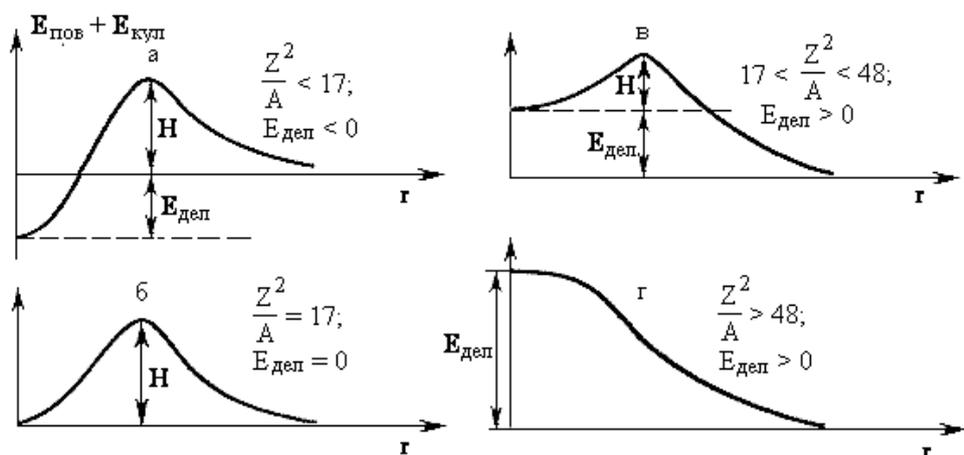


Рис.2 Зависимость высоты потенциального барьера и энергии деления от величины Z^2/A .

И при значении $Z \geq 100$ ядро становится нестабильным по отношению к спонтанному делению.

Однако, модель жидкой капли не смогла объяснить спины и четности ядер, также по этой модели ядро должно было делиться на два равных ядра, но как показала практика это происходит примерно в 1% случаев. Это связано с ядрами, у которых увеличена энергия связи, их называют магическими. Ядрам более выгодно делиться на осколки с числами протонов и нейтронов близкими к магическим. Также по экспериментальным данным было видно, что нужно учесть оболочные эффекты. И эти проблемы объяснила оболочная модель ядра.

Оболочечная модель ядра

При исследовании атомного ядра, были выявлены периодичности атомных характеристик, которые невозможно было описать, тогда одной из ведущих, капельной моделью ядра. Тогда М. Геппертом-Майером была предложена оболочечная модель ядра, которая является итогом этих исследований и выводов.

Эта периодичность заключается в так называемых магических числах. Магические числа - это определенные количества протонов и нейтронов в ядре, такими являются 2, 8, 20, 28, 50, 82. Эти числа соответствуют полностью заполненным нуклонными оболочками. Ядра с таким количеством нейтронов или протонов называют магическими, их энергия связи больше, чем у соседних ядер, они более распространены в природе, и энергия отделения нуклона от магического ядра сильно больше, чем от соседних ядер. Если и число протонов, и число нейтронов

является магическим, то такое ядро называется дважды магическим и обладает еще большей стабильностью.

По оболочной модели нуклоны заполняют оболочки по принципу Паули, согласно которому две тождественные частицы с полуцелым спином не могут одновременно находиться в одном состоянии. Пара протонов или нейтронов, находящихся на одной подоболочке, стремится иметь результирующий момент $J=0$. Такие пары образуют нуклоны с противоположными по направлению и равными по модулю спинами. В итоге, на нижних уровнях все нуклоны разбиты на пары np и pp , суммарный момент и четность которых равна $J^P = 0^+$.

И благодаря этому, во многих случаях можно предсказать суммарный момент и четность всего ядра. Если ядро является четно-четным то $J^P = 0^+$. Если нейтронов или протонов нечетно, то спин-четность ядра будет равна спин-четности единственного неспаренного нуклона. Эта модель подтверждается экспериментальными данными, и также работает для тяжелых ядер.

Так для четного числа нейтронов и нечетного числа протонов J^P ядра зависит только от неспаренного протона. Так для ядер с $Z= 83, 85$ и 87 , $J^P = 9/2^-$ так как на $Z=82$ полностью заполняется оболочка и следующие протоны имеют уже другой спин и четность.

N	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128	130
Z											
81	1/2+	1/2+	1/2+	1/2+	1/2+	1/2+	1/2+	1/2+	1/2+		
83	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-
85	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-
87		9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-	9/2-

Таблица 1. Спин и четность ядер в зависимости от числа протонов и нейтронов.

Для четного числа протонов и нечетного числа нейтронов ситуация обратная, спин и четность ядра зависят от оставшегося без пары нейтрона. В таблице явно видны заполнения оболочек и подоболочек, особенно для $N=123, 125$ и 127 .

N	107	109	111	113		123	125	127	
Z									
80	3/2-	3/2-	3/2-	3/2-		5/2-	1/2-	9/2+	
82	3/2-	3/2-	3/2-	3/2-		5/2-	1/2-	9/2+	9/2+

84	3/2-	3/2-	3/2-	3/2-		5/2-	1/2-	9/2+	9/2+
86	3/2-	3/2-	3/2-	3/2-		5/2-	1/2-	9/2+	9/2+
88						5/2-	1/2-	9/2+	9/2+
90							1/2-	9/2+	

Таблица 2. Спин и четность ядер в зависимости от числа протонов и нейтронов.

Капельная модель пренебрегала влиянием оболочных эффектов в расчетах, и из-за этого при получении результатов экспериментов, многое нельзя было объяснить. Учесть эти эффекты удалось В.М. Струтинскому, он указал способ, с помощью которого можно рассчитать оболочечную поправку микроскопически. По этим расчетам выявили две особенности в структуре барьера деления тяжелых ядер. Стало ясно, что именно за счет оболочечных эффектов ядра актинидов являются деформированными. И также, что барьер деления имеет сложную форму. Так для ядер урана и плутония барьера деления двугорбый, что не соответствует модели жидкой капли.

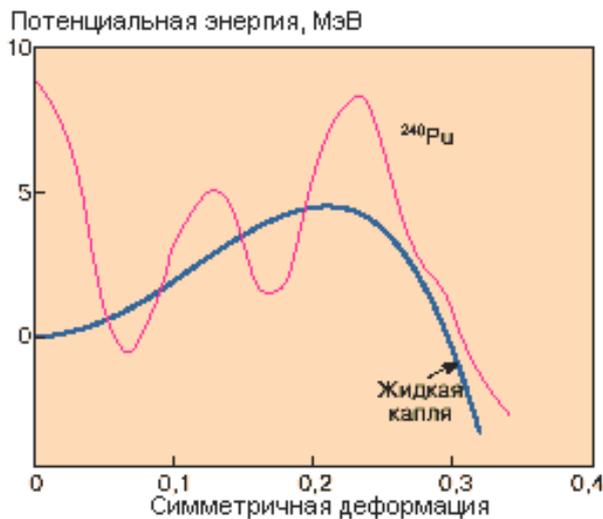


Рис.3 Энергия ядра ^{240}Pu в функции от параметра аксиально-симметричной деформации

В теории Струтинского явление спонтанных делящихся изомеров нашло естественное и понятное объяснение. Также расчеты показали, что поправка больше всего влияет на поверхностную энергию, связанную с делением. Для тяжелых ядер в период полураспада относительно спонтанного деления в основном вклад вносит влияние оболочной структуры. Без этих поправок барьер бы почти отсутствовал, как предполагала капельная модель.

Теория Струтинского предсказала возможность существования нового острова стабильности в районе сверхтяжелых ядер, приблизительно при $Z=114$. Тем самым граница ядер, установленная моделью жидкой капли, была стерта.

Сверхтяжелые элементы.

Все ядра с $Z > 83$ являются радиоактивными, самые распространенные из них это уран ($Z=92$) и торий ($Z=90$). Трансуранами называют элементы тяжелее урана, все они получены на Земле искусственным способом.

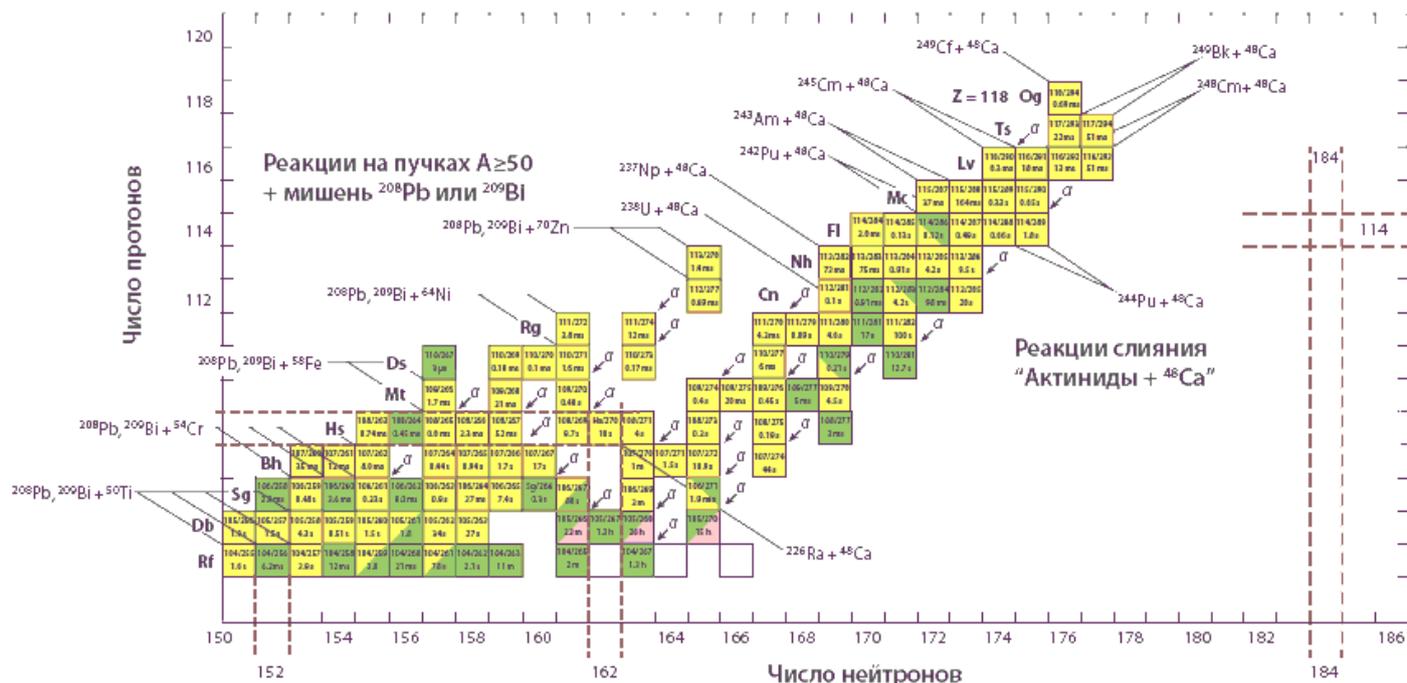


Рис 4 Известные сверхтяжелые элементы и реакции их образования.

Для их получения используются три основных метода:

1. Захват нейтронов
2. Реакции под действием альфа-частиц
3. Реакция под действием тяжелых ионов.

Захват нейтронов осуществляется путем облучения пучком нейтронов ядра, при большой плотности пучка ядро захватывает несколько нейтронов. С помощью этого метода были получены ядра с $Z = 94$ и 95 путем облучения урана ^{238}U , и постепенно по цепочке были получены ядра до $Z=98$. Были произведены удачные попытки синтеза фермия ($Z=100$) и эйнштейния ($Z=99$) при помощи термоядерного взрыва.

Но продвижение к элементам с большим зарядовым числом почти невозможно, так как полученные в результате захвата нейтронов изотопы имеют маленький период полураспада, и трансураны в основном распадаются альфа-распадом и спонтанным делением. Этим способом образуются тяжелые изотопы при взрыве Сверхновых.

Дальнейшее продвижение к большим зарядовым числам путем облучения альфа-частицами стало возможно при появлении ядерных реакторов большой мощности, так как на них возможно накапливать необходимое количество трансуранов и использовать их как мишени. С помощью этого метода были получены новые элементы, такие как менделевий ($Z=101$) и нобелий ($Z=102$). У этого метода получения новых элементов также есть проблемы: малое количество требуемых для мишеней трансурановых элементов, и маленькое время жизни изотопов, которое усложняет их идентификацию.

С открытием реакции холодного синтеза были получены трансурановые элементы с $Z = 107 - 112$. Метод заключается в том, что изотопы свинца и бериллия облучают изотопами с $Z = 22-30$, образовавшееся в результате ядро слабо нагрето, и остывает путем испускания всего одного нейтрона. Дальнейшее продвижение с помощью этого метода стало невозможно, из-за увеличения потенциального барьера между сталкивающимися ядрами. Поэтому был придуман другой метод.

Первые эксперименты по синтезу 114-ого проводились с мишенью из плутония - 244, также в качестве мишени был использован плутоний - 240. В качестве снаряда был выбран кальций -48. С помощью него также были получены все элементы с 112 по 118. Использование кальция - 48 обусловлено тем, что в ядре с большим количеством протонов сильно возрастает кулоновское отталкивание, и нужно его компенсировать ядерными силами, для этого отношение N/Z у снаряда и у мишени должно быть как можно больше. Также это дважды магическое ядро, что дает уменьшение энергии составного ядра, и у сливающихся ядер существует асимметрия зарядов, увеличивающая вероятность образования составного ядра при более низкой энергии возбуждения.

Но не все так хорошо, на долю кальция - 48 приходится 0,18 процента от всего природного кальция, его получение очень трудный и дорогостоящий процесс. Сначала кальций нагревают до высоких температур для получения ионов, и после отделяют их в вакууме магнитного поля. Для этого процесса нужно специальное оборудование, и поэтому в год кальция-48 производят около 10 грамм.

Но это не все трудности, с которыми сталкиваются при попытке синтеза сверхтяжелых элементов. Так для синтеза 117-ого элемента в качестве мишени используют берклий-249, период полураспада которого составляет 320 дней. Из-за такого малого периода полураспада возникает много трудностей, необходимо вести наработку в реакторе с очень высокой плотностью потока нейтронов, что возможно только в изотопном реакторе NIFR, Национальной лаборатории США в Ок-Ридже. Из-за ужатых сроков, и всеми проблемами, связанными с транспортировкой, безопасностью и оформлением различных бумаг, процесс затруднялся еще сильнее. В итоге в Москву в 2009 году было привезено 22 миллиграмма чистого берклия-249, его нанесли слоем толщиной 300 нанометров на титановую фольгу, и эта мишень была доставлена в ЛЯР ОИЯИ в Дубне.

В результате 70-ти дневного эксперимента было зарегистрировано пять одинаковых образований и распадов 117-ого элемента. Все пошло по расчетам и 117-ый элемент испускал альфа-частицу, трансформировавшись в 115 элемент. И такая цепочка шла через 113 до 111 элемента, который испытывал спонтанное деление с периодом полураспада около 26 секунд, что очень много для таких ядер и процессов.

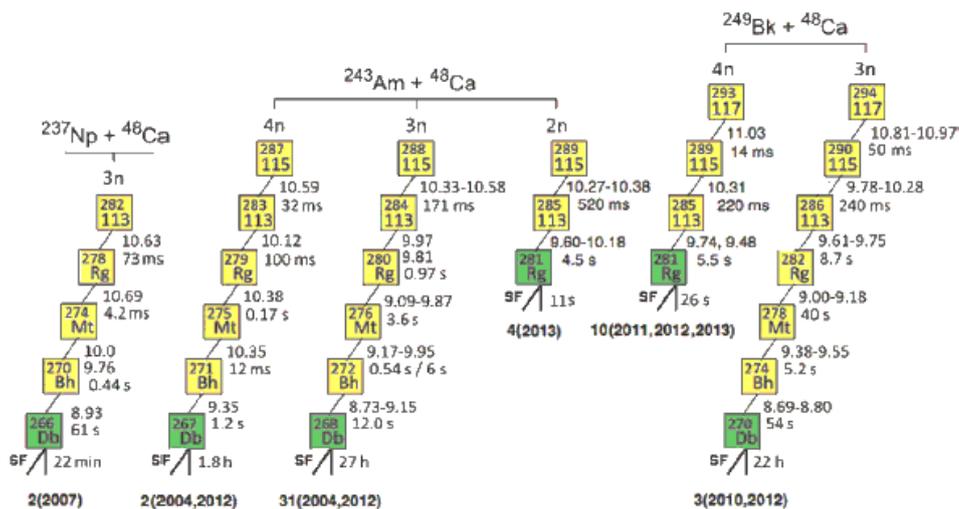


Рис.5 Цепочки распадов 113, 115 и 117 элементов. С указанием времени и энергия α -распада E_α в МэВ

Все это регистрировалось с помощью газонаполненного сепаратора. После попадания на мишень кальция-48, продукты реакции попадают в камеру с водородом под давлением 10^{-3} атмосфер. Уменьшается зарядовая дисперсия ядер отдачи, и становится легко отделить ядра от фоновых событий. После ядра отдачи попадают на детектор, который регистрирует время и координаты падения ядер, энергии продуктов и альфа-частиц. Магнитный сепаратор ядер отдачи уменьшал фон побочных продуктов

реакции в $10^5 - 10^7$ раз. После имплантации иона в детектор все последующие сигналы от регистрируемых частиц распада должны исходить из точки остановки имплантированного иона.

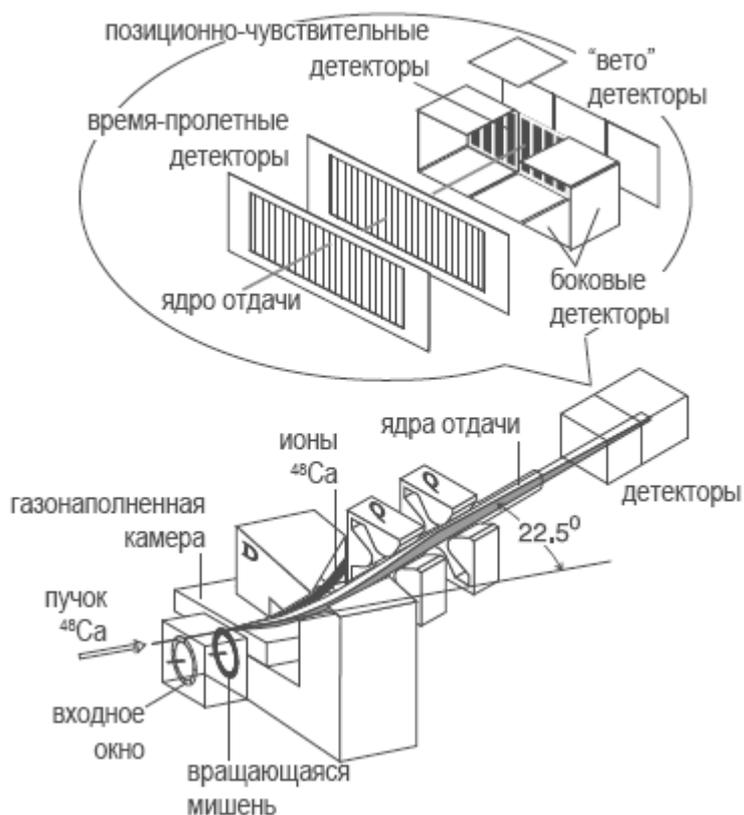


Рис.6 Схема сепаратора

Эта методика позволяет с большой точностью установить связь между продуктами распада и самим сверхтяжелым. Поэтому любые случайности с зарегистрированным пять раз распадом 117-ого элемента исключены. Были попытки провести этот же эксперимент, но с более низкой энергией ионов кальция-48 для того, чтобы была эмиссия только трех нейтронов, но не было зарегистрировано ни одной цепочки.

Для дальнейшего продвижения к 119 и 120 элементам не удастся найти мишень для кальция - 48 в достаточных количествах. В 1985 году была попытка бомбардировки мишени из эйнштейния -254 ядрами кальция -48, но не было зарегистрировано ни одного атома. Для положительного результата нужна большая мишень, что является почти невозможным.

В 2008 году в ОИЯИ пробовали получить 120 -й элемент в реакции слияния плутония -244 и железа - 58, но не удалось. В 2016 году Хоффман описал результатов экспериментов с хромом -54 и кюрием - 248, но он также не удался, достоверных событий не было обнаружено.

Для синтеза 119 элемента планируется использовать реакцию титана - 50 и берклия -249. Но пока что не удавалось получить достаточно хороший пучок, с хорошей интенсивностью.

Заключение

В таблица Д.И. Менделеева, опубликованной в 1871 году, было всего 64 элемента. С развитием технологии и продвижением в науке началась эра открытия новых элементов. Совместные усилия многих ученых и организаций привило к тому, что максимальное число протонов в ядре уже превысило ожидаемое $Z = 114$, что дает повод дальше направлять силы в изучение сверхтяжёлых элементов. Также рост периода полураспада для $Z = 113 - 116$ дает основание для существования острова стабильности в этой области. Для достижения центра острова стабильности необходимо использовать ионы с большим отношением N/Z , и также учитывать, что нынешнее регистрационное оборудование не предназначено для регистрации ядер с большим периодом полураспада. Над этим уже ведутся работы. Дальнейшее продвижение в область сверхтяжёлых позволит не только расширить таблицу Менделеева, но и позволит лучше изучить эту неизведанную область, что расширит наше знание об окружающем мире.

Список литературы:

- 1) Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики 1985
- 2) Бор О., Моттelson Б. Структура атомного ядра. М.: Мир. 1971
- 3) URL : <http://nuclphys.sinp.msu.ru>
- 4) Хайд Э., Перлман И., Сиборг Г. Ядерные свойства тяжелых элементов. Вып. 1. Трансурановые элементы. М.: Атомиздат, 1967
- 5) Флеров Г.Н. Новейшие элементы таблицы Менделеева. Перспективы и химические проблемы поисков сверхтяжелых элементов. Препринт ОИЯИ Р15-4315. Дубна. 1969.
- 6) Karol P.J., Barber R.C., Sherrill B.M. et al // Pure Appl. Chem. 2016. 88. P. 139.
<http://dx.doi.org/10.1515/pac-2015-0502>
- 7) Друин В.А., Демин А.Г., Харитонов Ю.П., и др // Ядер. Физика. 1971.
- 8) URL: <http://cdfc.sinp.msu.ru/>.
- 9) Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Moody K. J. // Ядерная физика. 2001. 64. С. 1427
- 10) В.А.Кравцов, Массы атомов и энергии связи ядер.Атомиздат.1974.