

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

0 - 664

7-81-275

ОРЛОВА
Ольга Андреевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ
РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА ТРАНСФЕРМИЕВЫХ ЯДЕР
С БОМБАРДИРУЮЩИМИ ИОНАМИ С $A \geq 40$**

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1981

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук ст.н.с. ТЕР-АКОПЬЯН Г.М.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук ст.н.с. ПОПОВ Ю.П.

кандидат физико-математических наук ст.н.с. НОВИКОВ Ю.Н.

Ведущая организация:

Радиевый институт им. В.Г.Хлопина, Ленинград.

Защита состоится " " 1981 года в " " час.
на заседании Специализированного совета Д.047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1981 года.

Ученый секретарь Специализированного совета

ТАРАН Ю.В

Актуальность проблемы. Гипотеза о существовании области повышенной стабильности ядер с $Z \sim 114$ и $N \sim 184$ привлекает внимание многих исследователей. Многочисленные теоретические модели довольно хорошо согласуются с экспериментальными данными, но при экстраполяциях в область неизвестных ядер результаты расчетов отличаются большой неопределенностью. Таким образом, наблюдение сверхтяжелых элементов привело бы к значительному прогрессу в понимании строения атомных ядер.

В соответствии с существующими в настоящее время представлениями, единственным процессом, который в лабораторных условиях может привести к образованию сверхтяжелых ядер, являются ядерные реакции с тяжелыми ионами, причем наиболее перспективными представляются реакции полного слияния с последующим деэвозбуждением составного ядра путем испускания нескольких нейтронов. Возможность использования глубоконеупругих процессов также изучалась, однако исследования, проведенные в Дармштадте (ФРГ), показали, что многонуклонные реакции передачи, по-видимому, нельзя в настоящее время рассматривать как эффективный метод получения сверхтяжелых ядер.

В последние годы интенсивно развивался метод синтеза сильно делящихся ядер в реакциях слияния ионов Ag , Ti , Cg и т.д. с магическими ядрами, например, изотопами свинца. Уменьшение энергии возбуждения компаунд-ядра позволяет эффективно уменьшить вероятность его деления при переходе в основное состояние.

Этот метод может быть применен для синтеза сверхтяжелых элементов, если в качестве бомбардирующих ионов используются ядра ^{48}Ca в комбинации с тяжелыми изотопами Pu , Am , Cm . Эти комбинации являются, по-видимому, наиболее благоприятными и с точки зрения свойств продуктов реакций: они должны быть сравнительно близки к центру предполагаемой области стабильности.

Поиск сверхтяжелых ядер среди продуктов реакций представляет собой чрезвычайно сложную задачу, так как вероятность их образования должна быть мала и свойства их неизвестны. Поэтому значительный интерес представляют экспериментальные исследования, цель которых - получение новой информации о закономерностях образования и распада сравнительно слабо возбужденных составных ядер в трансформивной области, а также о свойствах распада новых нейтронодефицитных изотопов с $Z \geq 100$, барьеры деления которых по своей природе, по-видимому, должны быть в некоторой степени аналогичны предсказанным для сверхтяжелых ядер.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

Эти исследования в последнее время приобрели особую актуальность в связи с планированием целой серии экспериментов по синтезу новых элементов на недавно созданном мощном ускорителе — циклотроне тяжелых ионов У-400, а также с интенсивным развитием этого направления исследований в физических научных центрах Европы и США.

Цель работы заключалась в изучении закономерностей реакций полного слияния с ионами с $A \geq 40$ с точки зрения исследования возможности синтеза сверхтяжелых ядер в аналогичных реакциях, а также в проведении экспериментов по синтезу сверхтяжелых ядер в реакциях с ионами ^{48}Ca .

Научная новизна и практическая ценность

Проведено исследование ядерных реакций синтеза новых нейтронно-дефицитных изотопов. Показано, что реакции типа (HI, xn) с небольшой энергией возбуждения составного ядра (20–35 МэВ) могут быть применены для получения спонтанно-делящихся изотопов ^{242}Fm и ^{254}Cf , которые в данной работе наблюдались впервые, причем для изотопов Fm обнаружено изменение характера зависимости периода полураспада от числа нейтронов.

Изучались образование и распад слабозбужденных трансфермиевых составных ядер. Впервые в реакциях с тяжелыми ионами наблюдалось испарение из составного ядра одного нейтрона. Для ядра $^{254}\text{IO2}$ впервые измерена вилка на электронный захват.

Проведены опыты по синтезу изотопов элементов с $Z \geq 108$ в реакциях с ионами ^{48}Ca . Анализ экспериментальных данных о механизме реакций слияния и теоретических оценок свойств сверхтяжелых продуктов ($^{48}\text{Ca}, \text{xn}$) реакций позволил сделать вывод о том, что в опытах получены верхние границы времен жизни соответствующих нуклидов. Эти результаты имеют ценность для подготовки новых экспериментов по синтезу сверхтяжелых элементов.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения и пяти глав.

Введение является аннотацией работы. В нем указано на актуальность проблемы, сформулирована цель работы и приведены основные результаты, полученные автором.

Глава I посвящена рассмотрению основных представлений о закономерностях образования трансфермиевых ядер в реакциях слияния с тяжелыми ионами и свойствах радиоактивного распада этих ядер. Поперечное сечение реакций слияния определяется вероятностью двух процессов: образования составного ядра и его перехода в основное состояние. Кратко описаны модели, которые обычно используются для расчетных оценок.

Рассмотрен метод синтеза трансфермиевых ядер в реакциях с ионами

тяжелее Ar. Его основное преимущество связано с возможностью получения составных ядер, имеющих небольшую энергию возбуждения ($E_{\text{мин}}^* \sim 20\text{--}25$ МэВ) благодаря применению в качестве мишени магических ядер Pь или Bi. Переход таких составных ядер в основное состояние происходит преимущественно после испускания всего 2–3 нейтронов. Так как в области трансфермиевых ядер главный процесс, уменьшающий выход продуктов реакций слияния — деление составного ядра, можно полагать, что уменьшение числа испущенных нейтронов на единицу приводит к увеличению поперечного сечения на фактор $(\Gamma_n/\Gamma_f)^{-1}$, который может иметь величину до 10^2 . В реакциях с ионами Ar, Ti, Cr и т.д. был впервые синтезирован ряд изотопов с $Z = 100, 102, 104, 106$ и 107 .

В этой главе рассмотрены, кроме того, зависимости барьеров деления и периодов полураспада трансфермиевых ядер от числа нейтронов N и атомного номера Z и методы их расчета, а также полученные в результате теоретических оценок предсказания повышенной стабильности относительно спонтанного деления ядер с $Z \sim 114$ и $N \sim 184$. Для получения таких сверхтяжелых ядер может быть также применен метод синтеза в реакциях полного слияния с бомбардирующими ионами тяжелее аргона.

В опытах, целью которых был синтез сверхтяжелых элементов в реакциях с ионами Ar, Zn, Ge, Kг неизвестные нуклиды не наблюдались, приведены верхние границы поперечных сечений изучавшихся реакций.

При планировании новых опытов в этом направлении: при выборе оптимальных комбинаций мишень-частица, энергии бомбардирующих ионов, способов детектирования продуктов реакций и т.д., — большое значение имеют данные о закономерностях образования в реакциях слияния спонтанно делящихся изотопов трансфермиевых элементов и свойствах их радиоактивного распада.

В главе II описана экспериментальная методика, применявшаяся при изучении синтеза трансфермиевых ядер в реакциях слияния с тяжелыми ионами.

Рассматриваются конструкции мишенных узлов, позволяющие использовать интенсивные потоки ускоренных ионов при облучении изотопов свинца и висмута — элементов, обладающих высокой летучестью, а также радиоактивных элементов в тех случаях, когда требовалось облучать мишени из Pu, Am, Cm и Ra. В опытах, где представляла интерес регистрация долгоживущих продуктов реакций, использовалась неподвижная наклонная мишень с рабочим слоем, нанесенным на подложку, охлаждаемую водой. Если необходимо было обеспечить вылет из мишени ядер отдачи для регистрации спонтанного деления продуктов (HI, xn) реак-

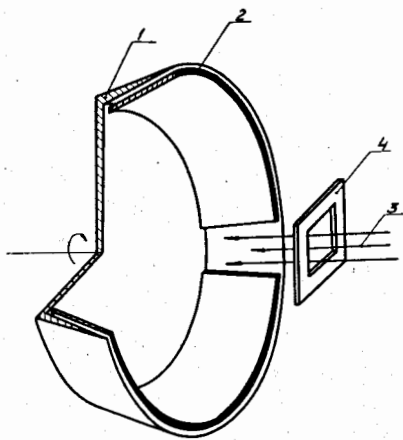


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с вращающейся наклонной мишенью для облучения изотопов свинца: 1 - вращающийся конус, на внутреннюю поверхность которого нанесен рабочий слой мишени, 2 - слюдяные детекторы осколков спонтанного деления, 3 - пучок ионов, 4 - коллиматор.

попадания в атмосферу или в камеру ускорителя ^{226}Ra или продуктов его распада.

В этой же главе кратко рассмотрено применение радиохимического выделения продуктов реакций для устранения источников фона при регистрации спонтанного деления или альфа-распада долгоживущих ядер.

Детектирование осколков спонтанного деления осуществлялось с помощью твердотельных трековых детекторов: след, лавсановой пленки или специальных фосфатных стекол. Для регистрации альфа-распада использовался альфа-спектрометр с Si (Au) полупроводниковыми детекторами.

В главе III описаны эксперименты по изучению реакций слияния

ций во время облучения, применялась вращающаяся мишень на тонкой подложке.

Специальная конструкция, позволявшая регистрировать короткоживущие продукты реакций, была разработана для облучения толстой свинцовой мишени. На рис. 1 дано ее схематическое изображение. Свинец наносился на внутреннюю коническую поверхность вращающегося алюминиевого цилиндра, расположенную под углом 12° к направлению пучка ионов. Таким образом, ядра отдачи останавливались на расстоянии всего $1-2,5 \text{ мг/см}^2$ от поверхности мишени, что создавало возможность эффективной регистрации осколков спонтанного деления продуктов реакций. Стабильность рабочего слоя обеспечивалась быстрым вращением (до 24000 об/мин) и достаточно высокой теплопроводностью подложки.

Для облучения ^{226}Ra была создана установка, схема которой дана на рис. 2. Ее конструкция практически полностью исключает возможность радиоактивного загрязнения окружающей среды вследствие

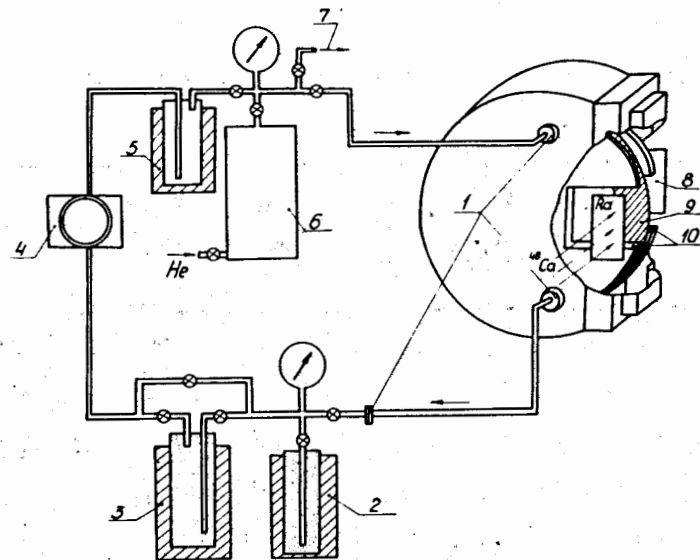


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для облучения радиевой мишени: 1 - фильтры, 2 - насос цеолитовый, 3 - ловушка радона, 4 - герметичный циркуляционный насос, 5 - ловушка масла, 6 - балластный объем, 7 - откатка, 8 - коллектор, 9 - сборник ядер отдачи, 10 - детекторы.

ускоренных ионов ^{40}Ar и ^{50}Ti с ядрами $^{204-207}\text{Pb}$, приводящих к образованию новых нейтронодефицитных изотопов фермия и курчатовия, а также опыты по синтезу в реакции $^{233}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$ спонтанно делящегося изотопа ^{250}Io /1/.

Эксперименты проводились на выведенном пучке циклотрона У-300 ЛЯР ОИЯИ. Для облучения изотопов свинца использовалась конструкция с вращающейся мишенью (рис. 1). Условия опытов даны в табл. I.

В результате облучения ионами ^{40}Ar мишени, обогащенной изотопом ^{204}Pb , наблюдался распад известных изотопов ^{244}Fm ($T_{1/2} = 3,3 \text{ мс}$) и ^{246}Fm ($T_{1/2} = 1,2 \text{ с}$) - продуктов реакций слияния ^{40}Ar с ядрами ^{206}Pb - ^{208}Pb , содержащимися в мишени, а также излучатель с более коротким временем жизни. Был проведен опыт по облучению ионами ^{40}Ar мишени из ^{206}Pb (табл. I), что позволило оценить период полураспада неизвестного излучателя. Полученная величина равна $T_{1/2} = 0,8 \pm 0,2 \text{ мс}$.

При идентификации этого излучателя можно было сразу исключить из рассмотрения легкие изотопы $^{239}, ^{238}\text{Cf}$, так как при энергии ^{40}Ar вблизи кулоновского барьера вероятность соответствующих реакций мала.

ТАБЛИЦА I

Условия экспериментов, целью которых был синтез изотопов ^{242}Fm , $^{250}\text{I02}$ и ^{254}Ku .

Ядерная реакция	Энергия ионов (МэВ)	Измерявшийся интервал периодов полураспада (мс)	Интегральный поток ионов	Число событий	Период полураспада (мс)
$^{233}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$	120	0,1 - 2,5	$4 \cdot 10^{16}$	60	$0,25 \pm 0,05$
$^{206}\text{Pb} + ^{40}\text{Ar}$	225	0,2 - 5,0	$1,9 \cdot 10^{16}$	78	4
$^{204}\text{Pb} + ^{40}\text{Ar}$	225	0,1 - 2,5	$5,3 \cdot 10^{16}$	208	$0,8 \pm 0,2$
		0,2 - 5,0	$2,5 \cdot 10^{16}$	88	
$^{206}\text{Pb} + ^{40}\text{Ar}$	203-225	0,2 - 5,0	$2,4 \cdot 10^{16}$	12	0,8
				24	4
$^{206}\text{Pb} + ^{50}\text{Ti}$	245	0,1 - 2,5	$2,4 \cdot 10^{15}$	15	$0,5 \pm 0,2$
		0,3 - 7,5	$1,7 \cdot 10^{15}$	13	
$^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ti}$	255	0,3 - 7,5	$1,5 \cdot 10^{15}$	1	-

Таким образом, нужно было рассмотреть две реакции: $^{204}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 2n)^{242}\text{Fm}$ и $^{204}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 3n)^{241}\text{Fm}$. Были проведены опыты по получению изотопа ^{242}Fm в реакции $^{206}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 4n)$. В этих опытах для уменьшения фона от спонтанного деления ^{244}Fm , продукта (2n) реакции, облучалась тонкая ($0,6 \text{ мг/см}^2$) свинцовая мишень при энергии ионов ^{40}Ar 225-203 МэВ. В этих условиях реакция $^{206}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 5n)^{241}\text{Fm}$ наблюдаться не могла из-за малой величины поперечного сечения, но активность с периодом полураспада 0,8 мс наблюдалась. Она могла, таким образом, быть получена только в реакциях $^{206}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 4n)^{242}\text{Fm}$ или $^{206}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 3n)^{243}\text{Fm}$, однако сравнение ее выходов на мишенях, обогатенных ^{204}Pb и ^{206}Pb , позволило прийти к выводу, что в наших опытах наблюдался изотоп ^{242}Fm ($T_{1/2} = 0,8 \pm 0,2 \text{ мс}$).

Изотоп ^{254}Ku ($T_{1/2} = 0,5 \pm 0,2 \text{ мс}$) был синтезирован в реакции $^{206}\text{Pb}(^{50}\text{Ti}, 2n)$. Его идентификация проведена на основании анализа

расчетных функций возбуждения реакций $^{206}\text{Pb}(^{50}\text{Ti}, xn)$, который позволил исключить из рассмотрения реакции $^{206}\text{Pb}(^{50}\text{Ti}, 4n)$, а также $^{206}\text{Pb}(^{50}\text{Ti}, 3n)$.

Изотоп $^{250}\text{I02}$ был получен в реакции $^{233}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$. В опыте использовалась тонкая мишень ($1,1 \text{ мг/см}^2 \text{ U}_2\text{O}_3$). Вылетевшие из мишени ядра отдачи попадали на тонкий вращающийся алюминиевый сборник, переносивший продукты реакций к сплошным детекторам осколков деления. Условия опыта даны в табл. I. Наблюдался спонтанно делящийся излучатель с периодом полураспада $0,25 \pm 0,05 \text{ мс}$, который идентифицирован как изотоп $^{250}\text{I02}$ - продукт (5n) реакции. Рассмотрение расчетных функций возбуждения реакций $^{233}\text{U}(^{22}\text{Ne}, xn)$ показывает, что реакция $^{233}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 5n)^{250}\text{I02}$ должна иметь максимальный выход. Правда, при данных экспериментальных условиях сравнимый выход может иметь (4n) реакция, однако ее продукт - известный изотоп $^{251}\text{I02}$ испытывает, в основном, альфа-распад ($T_{1/2} = 0,8 \text{ с}$). Свойства других изотопов I02 элемента, фермия и менделевия, которые, в принципе, могли быть получены в этом эксперименте, также известны, все они имеют существенно большие времена жизни и являются альфа-излучателями. Анализ свойств спонтанно делящихся изомеров также позволяет исключить их из рассмотрения.

Сравнение измеренных периодов $T_{1/2}$ изотопов ^{242}Fm , $^{250}\text{I02}$ и ^{254}Ku с оценками периодов их альфа-распада показывает, что для этих нуклидов основным каналом распада является спонтанное деление. На рис. 3 представлена систематика периодов полураспада $T_{1/2}^{\text{с.д.}}$ для четно-четных ядер с $Z \geq 100$. Можно видеть, что время жизни изотопа $^{250}\text{I02}$ на три порядка величины меньше, чем соседнего четного ядра $^{252}\text{I02}$. Это, по-видимому, является следствием закономерности, связанной со стабилизирующим влиянием подболочки $N = 152$.

Значение измеренного в опытах периода полураспада ^{254}Ku не противоречит наблюдавшейся для более тяжелых изотопов курчатовия монотонной зависимости вероятности спонтанного деления ядер от числа нейтронов. Интересно отметить, что период ^{242}Fm только в 4 раза короче периода ^{244}Fm , таким образом, резкое уменьшение величин $T_{1/2}^{\text{с.д.}}$ для четных изотопов фермия с $N < 152$ уступает место более плавной зависимости, характерной для курчатовия. Это, возможно, является следствием изменения формы барьера деления, в частности, уменьшения высоты второго максимума, который определяет повышенную стабильность изотопа фермия с $N = 152$. Для изотопов ^{244}Fm и ^{242}Fm а также всех известных изотопов курчатовия, времена жизни, таким образом, зависят только от проникаемости первого барьера и имеют величину порядка миллисекунды.

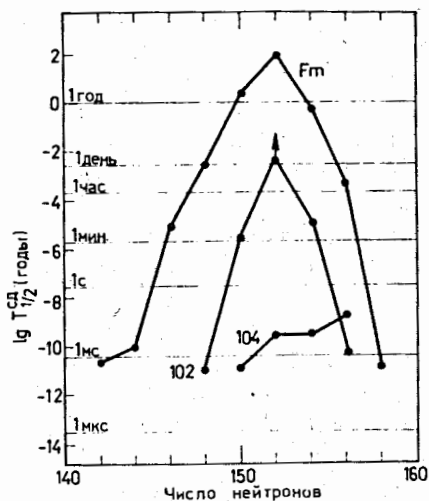


Рис. 3. Систематика периодов спонтанного деления четно-четных изотопов с $Z = 100-104$.

Итак, показано, что реакции типа (HI, xn) , в которых энергия возбуждения составных ядер сравнительно невелика (20–35 МэВ), могут быть применены для синтеза нейтронодефицитных изотопов элементов, барьеры деления которых, по-видимому, в значительной степени аналогичны предсказанным для ядер вблизи центра "острова стабильности" ($Z = 114, N = 184$).

Глава IV посвящена изучению реакций ионов ^{48}Ca с ядрами Ti , Pb и Bi , в которых образуются слабо возбужденные составные ядра ^{253}Ti , ^{256}Pb и ^{257}Bi /2,3/. В опытах регистрировались долгоживущие изотопы калифорния и фермия, продукты распада ядер, образовавшихся в реакциях слияния.

Изотопы ^{246}Cf , ^{254}Fm , а также ^{252}Fm и ^{255}Fm , для которых измерены суммарные выходы,

идентифицировались как по энергии альфа-частиц, так и по периоду полураспада. Условия опытов и результаты измерений даны в табл. II. В пятой колонке таблицы приведены экспериментальные интегральные поперечные сечения, просуммированные по всем возможным испарительным каналам, ведущим к образованию данного изотопа:

$$\Sigma_{\text{эксп.}} = \frac{N\lambda t_0}{k_1 k_2 (1 - e^{-t_0}) e^{-t_1} (1 - e^{-t_2})} \frac{dn}{dE}$$

где N – число импульсов в пике, λ – постоянная распада наблюдаемого изотопа, I – интегральный поток ионов, k_1 – химический выход, k_2 – эффективность счета альфа-частиц, t_0 – время облучения, t_1 – время, прошедшее от конца облучения до начала измерения, t_2 – время измерения, $\frac{dn}{dE}$ – величина, равная числу атомов мишени в слое, в котором энергия пучка ионов уменьшается на 1 МэВ.

Эксперименты проведены при энергиях бомбардирующих ионов ^{48}Ca , близких к кулоновскому барьеру, поэтому предполагалось, что весь экспериментально измеренный выход изотопов Fm и Cf связан с различными каналами девозбуждения составного ядра. Для расчета соответствующих поперечных сечений был использован метод, основанный на

ТАБЛИЦА II
Условия экспериментов по изучению взаимодействия ионов ^{48}Ca с изотопами Pb , Bi и Ti .

Реакция	Интегральный поток ионов	Максимальная энергия ионов (МэВ)	Наблюдаемый изотоп	$\Sigma_{\text{эксп.}}$ (см ² . МэВ)
$\text{ест}_{\text{Ti}} + ^{48}\text{Ca}$	$8,1 \cdot 10^{15}$	223	^{246}Cf ^{252}Fm	$(1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-30}$ $(2,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-31}$
$^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$	$1,19 \cdot 10^{16}$	224	^{246}Cf ^{252}Fm ^{255}Fm	$(4,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-29}$ $(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-30}$
			^{254}Fm	$(4,2 \pm 0,8) \cdot 10^{-30}$
$^{209}\text{Bi} + ^{48}\text{Ca}$	$9,3 \cdot 10^{15}$	236	^{246}Cf ^{252}Fm ^{255}Fm	$(3,9 \pm 0,8) \cdot 10^{-31}$ $(9,3 \pm 1,6) \cdot 10^{-31}$

статистическом рассмотрении возбужденного составного ядра в ферми-газовом приближении для плотности уровней /2,3/. Выбор численных значений параметров расчета основывался на рассмотрении экспериментальных данных, полученных при изучении функций возбуждения реакций $^{206,207}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, xn)$, а также поперечных сечений (xn) реакций с тяжелыми ионами ($A \geq 40$) в области трансфермиевых составных ядер.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показало, что во всех случаях $\sigma_{\text{расч.}} / \sigma_{\text{эксп.}}$ лежит в пределах фактора 0,34–1,3. Это можно рассматривать как качественное согласие расчетных и экспериментальных величин, свидетельствующее о том, что при переходе от бомбардирующих ионов ^{40}Ar к ионам ^{48}Ca основные характеристики взаимодействия практически не изменяются.

Во всех трех реакциях составные ядра имели начальные состояния, по-существу, совпадающие по энергии возбуждения и угловому моменту, поэтому соотношения поперечных сечений различных каналов девозбуждения должны быть близки по величине. Таким образом, совокупность экспериментальных данных позволяет оценить роль основных испарительных каналов – $(1n)$, $(2n)$ и $(3n)$ (табл. III).

В реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ канал $(2n)$ практически полностью определяет выходы изотопов ^{254}Fm и ^{246}Cf , поэтому можно считать, что их отношение определяет вилку на электронный захват ядра ^{254}Pb . Она составляет 10%.

ТАБЛИЦА III

Результаты расчетов поперечных сечений наиболее вероятных каналов девозбуждения компаунд-ядер, образовавшихся при слиянии ионов ^{48}Ca с ядрами $^{205,207}\text{Tl}$, ^{208}Pb и ^{209}Bi .

Мишень	Наблюдаемый изотоп	Канал реакции	$\sigma_{\text{макс}}$ (расч) (см ²)	$\Sigma_{\text{расч}}$ (см ² · МэВ)
ест. ^{207}Tl	^{246}Cf	$3n$	$2,5 \cdot 10^{-31}$	$7,6 \cdot 10^{-31}$
		$\alpha, 1n$	$1,1 \cdot 10^{-31}$	
	^{252}Fm	$1n$	$3,5 \cdot 10^{-32}$	$1,9 \cdot 10^{-31}$
		$1p$	$4,0 \cdot 10^{-33}$	
^{208}Pb	^{246}Cf	$2n$	$2,1 \cdot 10^{-30}$	$1,4 \cdot 10^{-29}$
		$2n$	$2,1 \cdot 10^{-30}$	
	^{252}Fm	$1n$	$2,5 \cdot 10^{-31}$	$1,1 \cdot 10^{-30}$
		1α	$1,1 \cdot 10^{-31}$	
	^{255}Fm	$1n$	$2,5 \cdot 10^{-31}$	$1,1 \cdot 10^{-30}$
		1α	$1,1 \cdot 10^{-31}$	
^{209}Bi	^{246}Cf	$2n$	$2,1 \cdot 10^{-30}$	$1,5 \cdot 10^{-30}$
		$2n$	$2,1 \cdot 10^{-30}$	
	^{246}Cf	$3n$	$3,4 \cdot 10^{-32}$	$3,2 \cdot 10^{-31}$
		$3n$	$3,4 \cdot 10^{-32}$	
	^{252}Fm	$1n$	$6,8 \cdot 10^{-32}$	$1,3 \cdot 10^{-30}$
		αn	$3,7 \cdot 10^{-32}$	

В главе У описаны опыты, целью которых был синтез сверхтяжелых элементов в реакциях с бомбардирующими ионами ^{48}Ca /4-6/, а также опыты по синтезу 108 элемента в реакциях с ионами ^{58}Fe /7/.

При слиянии ядер ^{48}Ca с тяжелыми изотопами Pb , Am , Cm могут, в принципе, быть получены нуклиды с числом протонов $Z = 114-116$ и числом нейтронов $N = 172-178$, сравнительно близкие к предполагаемому центру области повышенной стабильности относительно спонтанного деления ($Z = 114$, $N = 184$). В то же время, благодаря тому, что ^{48}Ca — дважды магическое ядро с большим дефектом масс, энергия возбуждения составных ядер может быть невелика: $E_{\text{мин}}^* = 20-30 \text{ МэВ}$.

Расчетные времена жизни продуктов реакций (^{48}Ca , $2n$) и (^{48}Ca , $3n$) при облучении ядер ^{242}Pu , ^{243}Am , а также $^{246,248}\text{Cm}$ находятся в диапазоне от нескольких часов до нескольких лет, поэтому в опытах осуществлялось детектирование спонтанного деления и альфа-распада сравнительно долгоживущих ядер.

Для устранения источников фона проводилось выделение сверхтяжелых продуктов реакций, основанное на предсказаниях их физических и химических свойств. Схема радиохимической переработки сборника ядер отдачи дана на рис. 4.

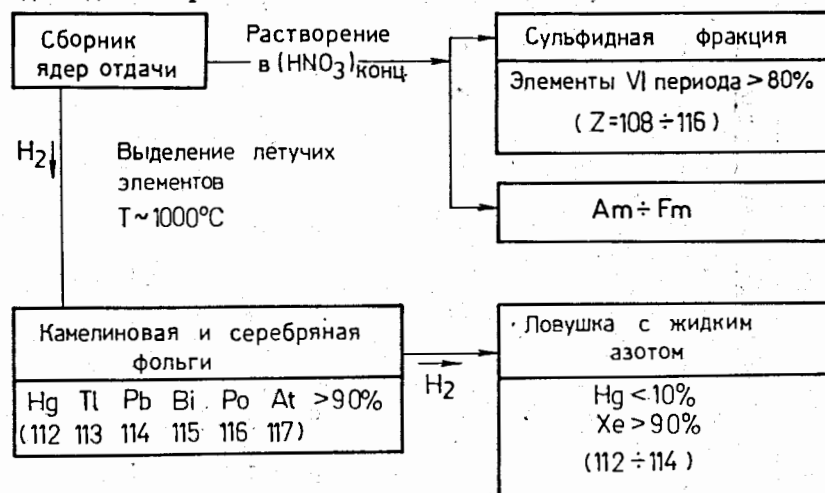


Рис. 4. Схема радиохимической переработки сборника ядер отдачи в опытах по синтезу сверхтяжелых элементов.

Затем измерялась активность полученных образцов относительно спонтанного деления и их альфа-активность. Никаких неизвестных излучателей обнаружено не было. Верхние границы поперечных сечений образования соответствующих изотопов даны в табл. IV.

Вследствие большой неопределенности в оценках свойств распада сверхтяжелых ядер представляло интерес проведение опытов по поиску среди продуктов реакций сравнительно короткоживущих спонтанно делящихся нуклидов. Для изучения была выбрана реакция $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$, так как в этом случае практически полностью отсутствует фон, обусловленный спонтанным делением долгоживущих ядер. В этом опыте также определен лишь верхний предел поперечного сечения образования изотопов с $T_{1/2}^{\text{сп.д.}} > 100 \text{ мс}$, $\sigma < 3 \cdot 10^{-35} \text{ см}^2$.

При рассмотрении возможностей синтеза сверхтяжелых ядер привлекает внимание комбинации мишень-ион, где, в принципе, могут образовываться некоторые нейтронодефицитные изотопы. Если предположить, что альфа-распад этих изотопов и их дочерних продуктов более вероятен, чем спонтанное деление, в результате цепочки последовательных альфа-распадов должны получаться ядра, свойства которых хорошо

ТАБЛИЦА IV
 Результаты опытов по изучению реакций монов ^{48}Ca с мишенями из Pu , Am и Cm ,

Химическая фракция	Продукты реакций	Вид распада	Времена жизни	Пределы поперечных сечений (см^2)			
				^{246}Cm	^{248}Cm	^{243}Am	^{242}Pu
Летучие металлы	II2-II6	спонтанное деление	I час - I год	$2 \cdot 10^{-35}$	$2 \cdot 10^{-34}$	$1,5 \cdot 10^{-35}$	10^{-35}
		α -распад $7 \leq E_{\alpha} \leq 9 \text{ МэВ}$	2 часа-10 дн.	$5 \cdot 10^{-34}$	$5 \cdot 10^{-33}$	$5 \cdot 10^{-34}$	$2,5 \cdot 10^{-34}$
Сульфиды тяжелых металлов	I08-III	спонтанное деление	10 час-I год	$2 \cdot 10^{-35}$	$2 \cdot 10^{-34}$	$1,5 \cdot 10^{-35}$	10^{-35}
		α -распад $7 \leq E_{\alpha} \leq 9 \text{ МэВ}$	10 час.-10 дн.	$2 \cdot 10^{-34}$	$2 \cdot 10^{-33}$	$2 \cdot 10^{-34}$	10^{-34}
Тяжелые благородные газы	II2-II6	спонтанное деление	I час-I год	$2 \cdot 10^{-35}$	$2 \cdot 10^{-34}$	$2 \cdot 10^{-35}$	10^{-35}
Cf - Fm	^{254}Cf	спонтанное деление	60,5 дн.	$2,4 \cdot 10^{-31}$		$7 \cdot 10^{-34}$	$2 \cdot 10^{-34}$
	^{246}Cf	α -распад $E_{\alpha} = 6,76 \text{ МэВ}$	35,7 часа	$3,6 \cdot 10^{-28}$		$3 \cdot 10^{-31}$	10^{-32}
	^{252}Fm	α -распад $E_{\alpha} = 7,04 \text{ МэВ}$	22,8 часа	$5,1 \cdot 10^{-32}$		10^{-33}	10^{-33}

известны. Например, в реакциях $^{233}\text{U} (^{48}\text{Ca}, 2n)^{279}\text{U}$ и $^{231}\text{Pa} (^{48}\text{Ca}, 3n)^{276}\text{U}$ цепочки альфа-распадов могли бы привести к дочерним ядрам ^{255}Fm и $^{256}\text{Md} \xrightarrow{\epsilon} ^{256}\text{Fm}$. Соответствующие опыты были нами выполнены, однако эти ядра обнаружены не были, $\sigma (^{255}\text{Fm}) < 7 \cdot 10^{-35} \text{см}^2$, $\sigma (^{256}\text{Fm}) < 5 \cdot 10^{-35} \text{см}^2$.

Возможно, что для одного или нескольких ядер - членов цепочки альфа-распада, включая исходный изотоп - продукт реакции $(^{48}\text{Ca}, xn)$, основной канал распада - спонтанное деление. Поэтому были проведены эксперименты, где регистрировались спонтанно делящиеся ядра с $T_{1/2} > 3$ мс при облучении ионами ^{48}Ca мишеней из ^{231}Pa и ^{232}Th . В этих опытах следы осколков спонтанного деления не наблюдались, $\sigma < (3-4) \cdot 10^{-35} \text{см}^2$.

В этой же главе описаны опыты по синтезу изотопов 108 элемента в реакциях $^{226}\text{Ra} + ^{48}\text{Ca} /6/$ и $^{207,208}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe} /7/$. Условия и результаты этих опытов даны в табл. У. Здесь также определены верхние границы поперечных сечений соответствующих реакций.

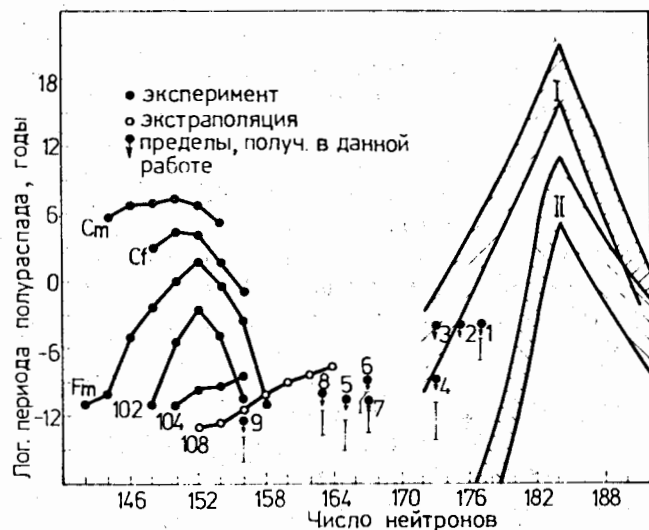
ТАБЛИЦА У

Результаты экспериментов по синтезу 108 элемента.

Реакция	Объект наблюдения	Энергия ионов (МэВ)	Интегральный поток ионов	Число событий	$T_{1/2}$ (с) теор.	$T_{1/2}$ (с) эксп.	σ (см^2)
$^{207}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe}$	спонт. дел.	285-306	$6,5 \cdot 10^{16}$	0	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}	$< 2 \cdot 10^{-35}$
$^{208}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe}$	спонт. дел.	285-306	$2,4 \cdot 10^{17}$	6	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$< 3 \cdot 10^{-35}$
$^{226}\text{Ra} + ^{48}\text{Ca}$	спонт. дел.	225-235	$4,5 \cdot 10^{16}$	0	10	10^{-3}	$< 3 \cdot 10^{-35}$
$^{226}\text{Ra} + ^{48}\text{Ca}$	^{255}Fm	225-235	$4,5 \cdot 10^{16}$	0			$< 10^{-34}$

Если справедливо предположение о существовании области повышенной стабильности ядер с $Z \sim 114$ и $N \sim 184$, и изотопы сверхтяжелых элементов могут быть получены в реакциях слияния с ионами ^{48}Ca , то, очевидно, они не наблюдались либо потому, что вероятность их образования ниже пределов чувствительности избранной методики, либо их времена жизни короче, чем предполагалось при постановке опытов.

На рис. 5 можно видеть, что расчетные значения времен жизни сверхтяжелых ядер, полученные разными авторами, отличаются на несколько порядков величины. На этом же рисунке даны верхние пределы времен



Фиг. 5. Систематика периодов спонтанного деления четно-четных изотопов с $Z = 100-104$ и теоретические оценки для сверхтяжелых ядер. Области I и II соответствуют расчетам макро-микроскопическим методом с использованием модифицированного потенциала Ямавы (I) и с использованием модифицированного осцилляторного потенциала (II). Представлены верхние пределы, полученные в экспериментах, где исследовались реакции слияния ионов ^{48}Ca с ^{248}Cm (1), ^{246}Cm (2), ^{242}Pu (3), ^{243}Am (4), ^{231}Pa (5), ^{233}U (6), ^{232}Th (7), ^{226}Ra (8), а также $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ (9).

жизни изотопов с нечетным числом нейтронов, которые определялись быстротой действия наших экспериментальных методик, а также граничные оценки времен жизни четно-четных ядер. Можно видеть, что эти оценки, по-существу, не противоречат результатам теоретических расчетов. Таким образом, предположение, что продукты изучавшихся реакций имеют короткие времена жизни, и использовавшаяся в наших опытах методика была недостаточно быстросействующей, представляется вполне вероятным. Этому предположению, по-видимому, не противоречат и результаты сравнения экспериментальных верхних границ поперечных сечений с величинами, полученными на основе известных данных о механизме реакций слияния, т.к. в целом расчетные оценки выше пределов, достигнутых в экспериментах.

Нельзя, конечно, исключить, что реакции слияния с тяжелыми ионами имеют некоторые особенности, приводящие при увеличении массы

взаимодействующих нуклидов к уменьшению вероятности образования составных ядер с низкой энергией возбуждения.

Планирование новых работ в области синтеза сверхтяжелых ядер требует, таким образом, с одной стороны, дальнейшего изучения механизма слияния сложных ядер и процессов дезвозбуждения составных систем, с другой – совершенствования методов расчета барьеров деления, периодов полураспада и других характеристик трансфермиевых ядер с учетом экспериментальных данных. Тем не менее, нам представляется целесообразным проведение опытов по исследованию реакций $\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ и $\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ с применением более чувствительной методики при условии регистрации более короткоживущих нуклидов.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. В реакциях слияния с ионами ^{40}Ar , ^{50}Ti и ^{22}Ne синтезированы новые спонтанно делящиеся изотопы ^{242}Fm ($T_{1/2} = 0,8 \pm 0,2$ мс), $^{250}\text{102}$ ($T_{1/2} = 0,25 \pm 0,05$ мс) и ^{254}Ku ($T_{1/2} = 0,5 \pm 0,2$ мс), получены оценки поперечных сечений в максимуме функций возбуждения для реакций:

$$^{206}\text{Pb}(^{50}\text{Ti}, 2n)^{254}\text{Ku} - \sigma_{\text{макс}} = 7 \cdot 10^{-33} \text{ см}^2,$$

$$^{204}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, 2n)^{242}\text{Fm} - \sigma_{\text{макс}} = 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}^2,$$

$$^{233}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 5n)^{250}\text{102} - \sigma_{\text{макс}} = 1,5 \cdot 10^{-33} \text{ см}^2.$$

2. Измерены выходы некоторых продуктов реакций слияния ^{48}Ca с ядрами ^{208}Pb , ^{209}Bi и $^{203,205}\text{Tl}$. Полученные данные проанализированы с помощью модифицированной расчетной программы ALICE, основанной на рассмотрении возбужденного составного ядра в рамках статистической модели. Определены поперечные сечения реакций:

$$^{205}\text{Tl}(^{48}\text{Ca}, \text{In}) - \sigma_{\text{макс}} = 3,5 \cdot 10^{-32} \text{ см}^2,$$

$$^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n) - \sigma_{\text{макс}} = 6,0 \cdot 10^{-30} \text{ см}^2,$$

$$^{209}\text{Bi}(^{48}\text{Ca}, 3n) - \sigma_{\text{макс}} = 3,4 \cdot 10^{-32} \text{ см}^2.$$

Для одного из продуктов реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ – изотопа $^{254}\text{102}$ обнаружена 10% вилка на электронный захват.

3. Проведены опыты по синтезу в реакциях с ионами ^{48}Ca долгоживущих ($T_{1/2} > 1$ часа) изотопов сверхтяжелых элементов с $Z = 114-116$ и нейтронодефицитных изотопов с $Z = 110-112$ ($T_{1/2}^{\text{с.д.}} > 0,3$ мс), полученные верхние границы поперечных сечений составляют $10^{-34} - 10^{-35} \text{ см}^2$.

Проведены также эксперименты по синтезу спонтанно делящихся изотопов 108 элемента в реакции $^{226}\text{Ra} + ^{48}\text{Ca}$ с быстросействием экспериментальной методики 1 мс и в реакциях $^{207,208}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe}$ с быстросействием 0,1 мс, верхние границы поперечных сечений $\sigma < 10^{-35} \text{ см}^2$.

Анализ результатов экспериментов с учетом известных данных о механизме реакций позволяет считать, что в опытах с ионами ^{48}Ca получены граничные оценки времен жизни соответствующих нуклидов.

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. G.M.Ter-Akopyan, A.S.Iljinov, Yu.Ts.Oganessian, O.A.Orlova, G.S.Poreko, S.P.Tretyakova, V.I.Chepigin, B.V.Shilov and G.N.Flerov, Nuclear Physics A255, 509 (1975).
2. O.A.Orlova, X.Брухертзайфер, Ю.А.Музыка, Ю.Ц.Оганесян, Б.И.Дустыльник, Г.М.Тер-Акопян, В.И.Чепигин, Чой Вал Сек, Ядерная физика т. 30, вып.3(9), 618 (1979); ОИЯИ Р7-12061, Дубна, 1978.
3. Ю.Ц.Оганесян, O.A.Orlova, Г.М.Тер-Акопян, Ю.А.Музыка, А.А.Плеве, Б.И.Дустыльник, В.И.Чепигин, Г.Н.Флеров, Physics and Chemistry of Fission 1979, Proc. Int. Conf., IAEA Vienna, 1980, vol. I, I29.
4. Yu.Ts.Oganessian, H.Bruchertseifer, G.V.Buklanov, V.I.Chepigin, Choi Val Sek, B.Eichler, K.A.Gavrilov, H.Gaeggeler, Yu.S.Korotkin, O.A.Orlova, T.Reetz, W.Seidel, G.M.Ter-Akopian, S.P.Tretyakova, I.Zvara, Nuclear Physics A294, 213 (1978); JINR E7-10750, Dubna, 1977.
5. Г.М.Тер-Акопян, X.Брухертзайфер, Г.В.Букланов, O.A.Orlova, А.А.Плеве, В.И.Чепигин, Чой Вал Сек, Ядерная физика т. 29, вып. 3, 608 (1979); ОИЯИ E7-10722, Дубна, 1977.
6. Ю.Ц.Оганесян, Г.М.Тер-Акопян, А.А.Плеве, В.И.Чепигин, O.A.Orlova, В.Зайдель, Ю.А.Селицкий, В.Б.Фунштейн, X.Брухертзайфер, O.Константинеску, М.Шварценберг, К.А.Гаврилов, С.С.Коваленко, К.А.Петржак, ОИЯИ Р7-12054, Дубна, 1978.
7. O.A.Orlova, А.А.Плеве, Г.М.Тер-Акопян, С.П.Третьякова, В.И.Чепигин, Е.А.Черепанов, ОИЯИ Р7-12042, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 апреля 1981 года.