

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-96-141

На правах рукописи

ГЮЗЕЛЬ Тулин

ИЗУЧЕНИЕ КЛАСТЕРНОГО РАСПАДА ^{236}Pu
И РЕАКЦИИ СЛИЯНИЯ-ДЕЛЕНИЯ $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$
В ГЛУБОКО ПОДБАРЬЕРНОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ
С ПОМОЩЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ

Специальность: 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н. Флерова
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
С.П.Третьякова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Ю.П.Гангрский,
доктор физико-математических наук,
О.А.Юминов

Ведущее предприятие: Российский научный центр
Институт им. И.В.Курчатова

Защита диссертации состоится "14" июня 1996г. в "10" часов на
заседании специализированного совета Д 047.01.05 при Лаборатории
нейтронной физики им.И.М.Франка и Лаборатории ядерных реакций
им.Г.Н.Флерова Объединенного института ядерных исследований
(г.Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.
Автореферат разослан " "мая 1996г.

Ученый секретарь
специализированного совета

А.Г. Полеко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы:

С открытия кластерной радиоактивности тяжелых ядер прошло 11 лет, однако, до сих пор не ясно происходит ли этот процесс аналогично спонтанному делению или α -распаду. Не исключено, что существует какой-то общий механизм. Поэтому каждое новое исследование кластерной радиоактивности ядер является важным дополнением к существующей информации.

Для выяснения возможной связи вероятностей кластерного распада и спонтанного деления весьма ценным является накопление и уточнение данных по кластерному распаду ядер и поиск возможных корреляций между различными модами адронного распада.

Для понимания механизма кластерного распада представляется важным исследование реакции слияния обратной кластерному распаду в глубоко подбарьерной области энергий, когда взаимодействующими ядрами являются ядра аналогичные продуктам кластерного распада. Сечения слияния таких реакций чрезвычайно малы ($\leq 10^{-32}$ см²), однако, изучение глубоко подбарьерных реакций на ядрах Pb и Bi представляет особый интерес, так они являются дочерними ядрами при кластерном распаде ядер.

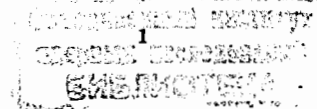
Целью настоящей работы является:

Совершенствование и разработка методов диэлектрических детекторов, которая позволяет провести

- Исследование кластерного распада и спонтанного деления изотопа ²³⁶Pu, имеющего достаточно высокую вероятность спонтанного деления;
- Измерение сечений деления компаунд ядер ²²⁴Th в реакции слияния-деления ¹⁶O+²⁰⁸Pb в глубоко подбарьерной области энергий.

В соответствии с указанной целью в диссертационной работе ставятся и решаются следующие задачи:

- разработка метода регистрации и идентификации ионов ²⁸Mg с энергией 70,2 МэВ с помощью специально разработанного диэлектрического детектора из фосфатного стекла;
- проведение калибровочных экспериментов с ускоренными ионами ²²Ne, ²⁴Mg, ²⁷Al, ²⁸Si с энергиями в диапазоне 1-5МэВ/а.е.м.



с целью исследования спектрометрических свойств детектора в условиях высокого фона альфа-частиц и осколков деления;

- исследование кластерного распада ^{236}Pu с эмиссией ионов ^{28}Mg в условиях фона альфа-частиц $\sim 10^{14}$ и осколков деления $\sim 10^6$;

- проведение калибровочных экспериментов по облучению слюдяного диэлектрического детектора ускоренными ионами в широком интервале масс и энергий ;

- разработка метода идентификации осколков деления ядер на фоне рассеянных ионов в интервале $Z \leq 27$ в слюдяных детекторах с помощью отжига ;

- оценка фоновых событий, вызываемых делением примесных делящихся элементов в мишенях и детекторах нейтронным полем, возникающим во время облучения тяжелыми ионами;

- измерение сечений деления составных ядер ^{224}Th , получаемых с помощью реакции $^{16}\text{O}+^{208}\text{Pb}$, с вероятностью $\leq 10^{-32}$ см² при интегральном потоке бомбардирующих ионов $\sim 10^{16}$ на мишень.

Научная новизна и практическая ценность работы:

1. Исследован кластерный распад и спонтанное деление ^{236}Pu . При использовании интенсивного источника плутония ($9,6 \times 10^{15}$) ядер, детекторов из фосфатного стекла и полусферической вакуумной камеры после 7-месячной экспозиции было зарегистрировано 15 событий эмиссии ^{28}Mg с энергией (67 ± 7) МэВ. Парциальный период кластерного распада составляет $(1,1 \pm 0,3) 10^{14}$ лет, а вероятность его относительно альфа-распада равна $(2,7 \pm 0,7) 10^{-14}$.

2. Уточнен парциальный период спонтанного деления ^{236}Pu , который составил $(1,25 \pm 0,12) 10^9$ лет. Полученное значение хорошо согласуется с данными систематики деления для четно-четных изотопов, но в 1,8 раза меньше ранее опубликованных экспериментальных данных.

3. Разработаны методы регистрации и идентификации продуктов кластерного распада с помощью специально разработанного состава фосфатного стекла. Установлен порог регистрации детектора, выбрана оптимальная геометрия облучения, химической обработки, при котором регистрируются

с вероятностью 90% ожидаемые ионы ^{28}Mg с $E \sim 70$ МэВ в условиях суммарного фона альфа-частиц и осколков деления вплоть до 10^{14} и 10^6 , соответственно. Достигнутое разрешение метода по заряду составляет $\Delta Z = \pm 0,2$, по массе $\Delta A = \pm 2$ и энергии $\Delta E = \pm 10\%$.

4. Для реакции слияние-деление $^{208}\text{Pb}+^{16}\text{O} \rightarrow ^{224}\text{Th} \rightarrow 2\text{ff}$ при использовании ускоренных на Тандеме пучков ^{16}O (Катания, Италия) и разработанного экспериментального метода, измерены сечения деления на уровне 1 нанобарна при энергии бомбардирующих ионов 68 МэВ, что на 15 МэВ ниже кулоновского барьера. Впервые для этой энергии было измерено сечение, которое на 5 порядков ниже, полученных ранее экспериментальных результатов с электронной техникой эксперимента.

5. Разработан метод регистрации осколков деления в слюде с использованием отжига, который позволил производить надежную идентификацию треков фрагментов деления в условиях рассеянных пучков ионов кислорода до 10^{16} на мишень.

6. Показана возможность с помощью метода диэлектрических детекторов достичь сечения реакции 1-10 пикобарн при более низких энергиях кислорода, что создает предпосылки для проведения реакций обратных кластерному распаду с эмиссией изотопов углерода.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод регистрации и идентификации продуктов кластерного распада с использованием фосфатного стекла специального состава с порогом чувствительности в интервале $dE/dx = 9-10$ МэВ/мг/см², способного регистрировать искомые ионы магния в условиях суммарного высокого фона альфа-частиц и осколков деления до 10^{14} и 10^6 , соответственно, с разрешением по заряду ± 1 , по массе ± 2 и энергии $\pm 10\%$.

2. Результаты исследования кластерного распада ядер ^{236}Pu . При использовании $9,6 \times 10^{15}$ ядер плутония, детекторов из фосфатного стекла и полусферической вакуумной камеры после 7-месячной экспозиции было зарегистрировано 15 событий эмиссии ^{28}Mg с энергией (65 ± 7) МэВ. Парциальный период кластерного распада составляет $(1,1 \pm 0,3) 10^{14}$ лет.

3. Результаты измерения парциального периода спонтанного

деления ^{236}Pu , который составил $(1,25 \pm 0,12)10^9$ лет. Полученное значение хорошо согласуется с данными систематики деления для четно-четных изотопов, но в 1,8 раз меньше ранее опубликованных данных.

4. Метод регистрации осколков деления слюдой мусковит с использованием после облучения отжига детекторов, что позволяет надежно идентифицировать треки фрагментов деления в условиях рассеянных ионов до 10^{16} на мишень и измерять сечения деления ядер до 10^{-36} см². Это создает предпосылки для изучения реакций слияния в глубоко подбарьерной области и обратных кластерному распаду.

5. Результаты измерения сечения реакции слияния-деления $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{224}\text{Th} \rightarrow 2\text{ff}$ с использованием слюдяных детекторов и метода отжига, а также ускоренных на Тандеме пучков ионов ^{16}O с энергией 78, 75, 73, 68 МэВ, что от 5 до 15 МэВ ниже кулоновского барьера слияния ядер. Для 68 МэВ получено сечение порядка 6 нанобарн, что на 5 порядков ниже полученных ранее экспериментальных результатов с использованием электронной техники.

6. Анализ результатов, демонстрирующий отклонение сечения деления составного ядра ^{224}Th от экспоненциального падения с уменьшением энергии ионов, что может свидетельствовать о влиянии структурных эффектов на сечение слияния в глубоко подбарьерной области взаимодействия двух сферических ядер.

Апробация работы. Результаты работы доложены на семинарах ЛЯР ОИЯИ; НИИЯФ МГУ, ИАЭ им. Курчатова, Конференции молодых ученых Стамбульского Университета.

Публикации. По результатам исследований, составивших основу диссертации, опубликовано 5 работ. Эти результаты получены автором в период 1994-1995г.г.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Диссертация содержит 98 страниц текста (включая рисунки); 25 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 80 пунктов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснованы актуальность и важность исследуемых в диссертации проблем, сформулирована цель работы, приведены основные результаты, изложены основные положения, которые выносятся на защиту, и приводится краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе рассмотрены некоторые вопросы, связанные с современным представлением механизма кластерного распада и возможностями экспериментального исследования этого нового вида спонтанного распада ядер. Открытие нового типа природной радиоактивности с эмиссией тяжелых ионов с $Z \geq 6$ показало, что оно занимает промежуточное положение между α -распадом и спонтанным делением, при этом, дочерним ядром должно быть дважды магическое ядро ^{208}Pb (или вблизи его). Теоретические представления механизма этого процесса сводятся к описанию его как явления подобного α -распаду или сильно асимметричному спонтанному делению[1]. Расчеты парциальных периодов кластерного распада по этим двум моделям не сильно отличаются между собой и от экспериментальных данных (1-2 порядка). К настоящему времени исследовано 24 изотопа в интервале $Z=87-96$ и наблюдается эмиссия тяжелых ионов ^{14}C , ^{20}O , $^{24-26}\text{Ne}$, $^{28-30}\text{Mg}$ и ^{32}Si [2]. Однако механизм процесса остается не ясным, поэтому изучение и уточнение данных кластерного распада для каждого изотопа представляет большой интерес.

Все излучатели кластеров в области ядер тяжелее свинца испускают альфа-частицы с вероятностью, превышающей вероятность кластерного распада в 10^8-10^{16} раз. В области ядер с атомными номерами $Z \leq 92$ вероятность кластерного распада соизмерима с вероятностью спонтанного деления либо превосходит ее. Для ядер с $Z > 92$ имеющиеся экспериментальные данные указывают, что вероятность кластерного распада по отношению к вероятности спонтанного деления резко падает. Для выяснения возможной связи вероятностей кластерного распада и спонтанного деления представляется ценным получение надежных данных по кластерному распаду ядер с высокой вероятностью спонтанного деления. Одним из таких ядер является ядро ^{236}Pu , у которого парциальный период α -распада равен 2,85 года, а спонтанного деления $\sim 10^9$ лет. Первые данные по кластерному распаду этого ядра, но с очень малой статистикой (всего 2 события) были получены в работе[3], а по спонтанному делению в работах[4,5].

Для получения информации о ядерных процессах, приводящих к кластерному распаду ядер, представляется важным изучение слияния двух ядер, аналогичных получающимся при кластерном распаде. Рассмотрена возможность проведения реакции, обратной кластерному распаду, т.е. реакции слияния налетающего иона кластерного типа с дважды магическим ядром ^{208}Pb . Для изучения

чувствительности этого метода была выбрана реакция $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$, которая приводит к составному ядру ^{224}Th , образование которого можно определять по фрагментам его деления. Расчет показывает, что при кластерном распаде ^{224}Th ожидаемая кинетическая энергия иона ^{16}O составляет 43,17 МэВ. Простой расчет показывает, что в обратной кластерному распаду реакции необходимо достичь слияния при $E(^{16}\text{O}) = 46,5$ МэВ, т.е. в глубоко подбарьерной области энергий. Кулоновский барьер для реакции $^{208}\text{Pb} + ^{16}\text{O}$ составляет 83 МэВ, а барьер деления исследуемого ядра ^{224}Th $V_f = 7,2$ МэВ [10]. Это означает, что во всем энергетическом районе энергии возбуждения $E^* > V_f$, главной модой распада составного ядра ^{224}Th является деление. С этой точки зрения зависимость сечения слияния от энергии такая же, как и для сечения деления. Поэтому в данном случае целесообразно измерять сечение деления в подбарьерной области энергий. Изучение закономерности изменения сечения от энергии значительно более низких кулоновского барьера может дать информацию о ядерных состояниях связанных с кластерным распадом.

Во второй главе представлено описание и анализ разработанных ранее методов регистрации кластерного распада и спонтанного деления [6] с помощью диэлектрических детекторов. Показаны их преимущества и недостатки в сравнении с электронными методами регистрации ионов и осколков деления в условиях высокого фона альфа-частиц (до 10^{14} на см^2) и рассеянных ионов (до 10^{16} на см^2). Обсуждается геометрия постановки эксперимента для получения высокой эффективности регистрации событий кластерного распада и спонтанного деления с помощью фосфатного стекла и слюды мусковит. Проведены калибровочные эксперименты с различными типами ускоренных с энергией 1-6 МэВ/а.е.м. ионов с $Z \geq 6$ в условиях близких к рабочим; выбраны оптимальные режимы химической обработки для надежной идентификации событий; уточнены пороги регистрации используемых детекторов, которые составили для фосфатного стекла 9-10 МэВ/мг/см², а для регистрации слюды ~ 12 МэВ/мг/см². Исследован метод реплик, используемый для измерения длины протравленных треков и приведены идентификационные характеристики используемых детекторов из фосфатного стекла. Показано, что используемое фосфатное стекло способно идентифицировать ионы с разрешением по заряду с $\Delta Z = \pm 0,2$, по массе - $\Delta A = \pm 2$ и энергии $\Delta E = \pm 10\%$.

Для надежной идентификации осколков деления от фоновых продуктов реакции апробирован метод отжига слюдяных детекторов. Показано, что нагревание облученных детекторов удаляет полностью латентные треки продуктов ядерных взаимодействий ядер кислорода с энергией < 5 МэВ/а.е.м. с ядрами слюды при 460°C в течение 6 час. и позволяет проводить эксперименты с сечением реакций, вплоть до $10^{-32} - 10^{-36} \text{ см}^2$.

Третья глава посвящена исследованию кластерного распада ядер ^{236}Pu с эмиссией ионов магния. Первые данные по распаду этого ядра с вылетом ^{28}Mg были получены в работе [3] при использовании источника, содержащим в начале измерений $1,3 \times 10^{15}$ ядер плутония, из которых 66% составлял изотоп ^{236}Pu , а 34% ^{238}Pu . В этом эксперименте за 690 дней измерений с помощью полиэтилентерефталата было зарегистрировано только два трека ядер магния с энергией 70 ± 3 МэВ. Вероятность кластерного распада по отношению к α -распаду составила $\approx 10^{-14}$, а по отношению к спонтанному делению $\approx 1,5 \times 10^{-5}$. В настоящей работе изучение кластерного распада ^{236}Pu и его спонтанного деления проводилось с более интенсивным источником ^{236}Pu , который был получен на циклотроне Исследовательского Центра в Орлеане (Франция) путем облучения ^{238}U протонами с энергией 34 МэВ в результате реакции $^{238}\text{U}(p,3n)^{236}\text{Np} \rightarrow (\beta^-) ^{236}\text{Pu}$. Приготовление источника в Радиохимической лаборатории Института Ядерной Физики в Орсе (Франция) описано в работе [6]. После химического выделения плутоний был нанесен электролизом на платиновую подложку диаметром 11 мм. Интенсивность источника к началу измерений составляла $9,6 \times 10^{15}$ ядер ^{236}Pu . Примесь атомов ^{238}Pu была 46% по весу (1,5% по α -активности). Для регистрации кластеров использовались фосфатные стекла. Калибровка детекторов проводилась на циклотроне У-400 в ОИЯИ (Дубна) и на тандеме в Леньяро (Италия) ионами ^{22}Ne , ^{24}Mg , ^{27}Al , ^{28}Si с энергиями в диапазоне 1 - 5 МэВ/нуклон. Травились детекторы в 48% HF при температуре 35 °C. Идентификация треков проводилась путем измерения избирательности травления $S = V_T / V_M$ и остаточного пробега R_r . Для наблюдения кластерного распада ^{236}Pu использовалась полусферическая вакуумная камера диаметром 16 см, в центре которой был установлен источник. Внутренняя поверхность полусферы была покрыта трековыми детекторами, общая площадь которых составляла 402 см². Эффективность

регистрации составляла 86% от 2л. В камере в течение всей экспозиции поддерживался вакуум. За 216 дней экспозиции было зарегистрировано 15 случаев кластерного распада. Результаты измерений представлены на рис.1, а на микрофотографии рис.2 вид треков кластеров и осколков деления в фосфатном стекле. Из-за малой длины треков кластеров при использовании данного стекла с высокой плотностью ($2,9 \text{ г / см}^3$) массовое число определяется с точностью не лучше, чем ± 2 . Представленные на рис.1 результаты измерений не противоречат ожидаемым для ^{28}Mg , и то, что наиболее вероятным кластером в случае распада ^{236}Pu является ^{28}Mg , испускание которого приводит к ^{208}Pb , следует из величины энергетического баланса $Q[8]$. Из измерений полного пробега иона следует, что энергия зарегистрированных нами частиц ^{28}Mg равна $65 \pm 7 \text{ МэВ}$, что достаточно хорошо согласуется со значением $70,2 \text{ МэВ}$, полученным из величины Q для данного канала распада $^{236}\text{Pu}[8]$. Вероятность наблюдения одного трека Mg, Si от кластерного распада примеси ^{238}Pu в нашем источнике составляет $\approx 10^{-3}$, а одного трека магния за счет его образования в тройном спонтанном делении не превышает $\approx 10^{-2}$ [9]. Порог регистрации использованного фосфатного стекла при выбранном режиме травления исключал из регистрации ионы Ne, которые образовывались за счет кластерного распада ^{232}U , накопленного в источнике при альфа-распаде ^{236}Pu . Полный поток α -частиц на детекторы в данном опыте был $1,4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Вероятность кластерного распада ^{236}Pu с эмиссией ^{28}Mg по отношению к α -распаду составляет $(2,7 \pm 0,7) \times 10^{-14}$, что хорошо согласуется с данными работы [5]. Парциальный период кластерного распада равен $(1,1 \pm 0,3) 10^{14}$ лет. В этом эксперименте было зарегистрировано $6,85 \times 10^3 \text{ см}^{-2}$ осколков спонтанного деления, что дает соответствующий парциальный период полураспада $(1,13 \pm 0,13) \times 10^9$ лет. Эта величина в $\approx 1,8$ раз меньше, чем значение приведенное в работах [4,5]. Вклад от спонтанного деления ^{238}Pu составляет $\approx 10^{-3}$ треков, от спонтанного деления дочерних продуктов α -распада изотопов плутония и вынужденного деления фоновыми нейтронами пренебрежимо мал. Результаты настоящей работы совпадают в пределах ошибок с полученными в работе [3] по парциальному периоду полураспада ^{236}Pu $T_{1/2} = (1,36 \pm 0,20) \times 10^9$ лет. Методы получения плутония, изготовления источников, геометрия облучения и детекторы были разными.

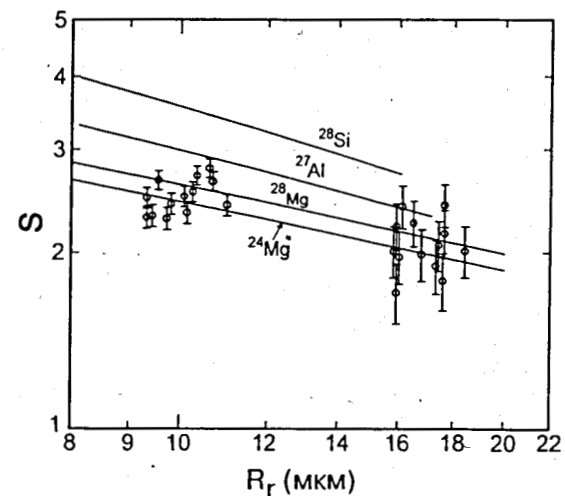


Рис.1 Зависимость избирательности травления $S=V_t/V_m$ от остаточного пробега R_r . Сплошные линии - результаты калибровки ускоренными тяжелыми ионами. Точки-результаты измерения на двух этапах травления избирательности процесса и остаточного пробега треков ионов кластерного распада ^{236}Pu .

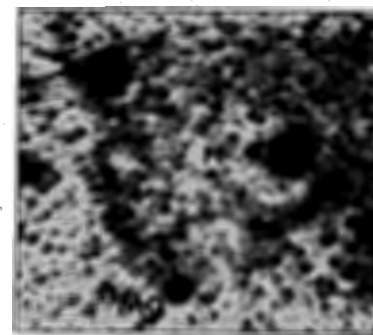


Рис.2 Микрофотографии треков осколков деления (большие) и иона ^{28}Mg (маленький), вылетающих при распаде ^{236}Pu .

Причины расхождения с результатами работы [4,5] ($T_{1/2} = (2,09 \pm 0,06) \times 10^9$ лет) не ясны.

Полученные парциальных периодов кластерного распада и спонтанного деления хорошо согласуются с данными систематик, представленных на рис.5 и 6, что позволяет прогнозировать возможности изучения кластерного распада более тяжелых изотопов.

В четвертой главе экспериментально исследована возможность проведения реакций слияния ядер в глубоко подбарьерной области энергий. Для определения чувствительности разработанного метода регистрации выбрана реакция $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$, которая приводила к составному ядру ^{224}Th , образование которого можно определять по фрагментам его деления, используя в качестве детекторов слюду с последующим после облучения отжигом для удаления фоновых событий. Поскольку подбарьерное деление очень сильно зависит от энергии, были использованы пучки ^{16}O Тандема Ядерно-физического центра Италии, находящегося в г.Катании. Мишень из $270\text{мкг}/\text{см}^2$ ^{208}Pb (99,1% обогащения) на $\sim 30\text{мкг}/\text{см}^2$ углеродной подложке была помещена в центре камеры рассеяния, стенки которой покрывались слюдяными детекторами. Между детекторами и стенками камеры находился полиэтилентерефталат, который регистрировал треки осколков деления примесей урана в слюде под действием нейтронов, образующихся во время эксперимента. Возникающий во время эксперимента поток нейтронов определяли с помощью калиброванных источников ^{235}U и ^{238}U и диэлектрических детекторов, и он не превышал 10^8 нейтронов. Концентрацию делящихся примесных ядер в слюде и мишени измеряли радиографическим методом с помощью полимерных детекторов и нейтронных потоков микротрона ЛЯР ОИЯИ. Показано, что фон от примеси делящихся элементов в слюдяных детекторах, мишени и держателях, был меньше 10^{-3} событий на всю анализируемую поверхность детекторов (170см^2).

Сечение деления для реакции $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{224}\text{Th}$ было измерено для энергий 78, 75, 73 и 68 МэВ, которые находятся от 5 до 15 МэВ ниже кулоновского барьера слияния (83 МэВ). Треки осколков деления тория были подсчитаны в интервале задних углов от 90° до 164° и от 198° до 270° с помощью оптического микроскопа после отжига слюды при 460° в течение 6 часов и последующего 4 часового травления в 40% HF при комнатной температуре. Полученные данные сечения деления для соответствующих энергий и потоков ионов кислорода представлены в таблице 1.

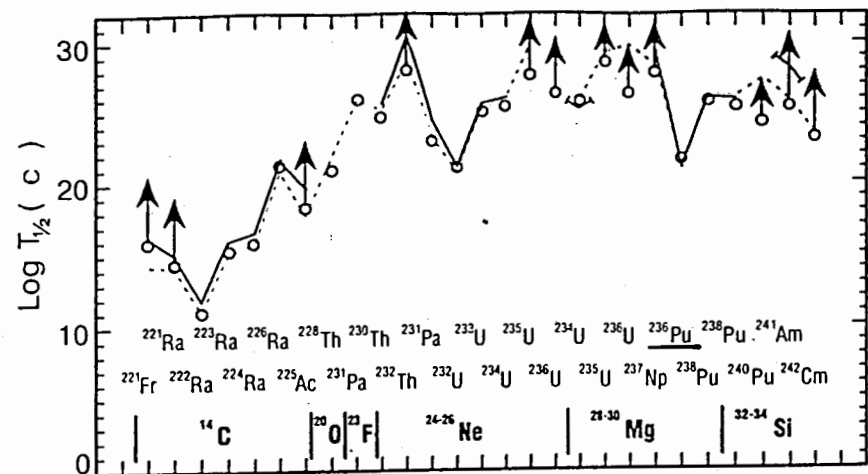


Рис 3 Экспериментальные данные парциального периода кластерного распада ядер тяжелее свинца (o), полученные к настоящему времени. Пунктирные линии - результаты расчета[8], твердые линии - теоретические результаты(1).

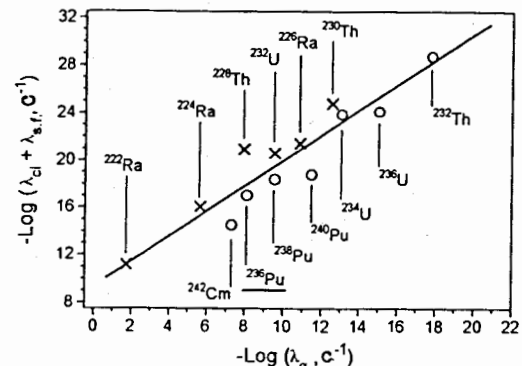


Рис.4 Зависимость суммарной вероятности кластерного распада и спонтанного деления указанных на рисунке ядер от вероятности их альфа-распада: точки (x)--случай $\lambda_{кл} > \lambda_{с.д.}$; (o) - случай $\lambda_{с.д.} > \lambda_{кл}$, где $\lambda_{кл}$ и $\lambda_{с.д.}$ - постоянные кластерного распада и спонтанного деления, соответственно.

Контроль вещества мишени осуществлялся с помощью многоэлементного рентгенофлуоресцентного анализа [11].

Для анализа применимости различных моделей для описания подбарьерного деления не хватает экспериментальных данных, особенно, в случае взаимодействия сферических ядер.

Для анализа сечений деления применялась статистическая модель, в которой для универсальности используется минимальное количество физических предположений и параметров, что, естественно, несколько огрубляет модель, но позволяет делать более однозначные выводы. В данной работе расчеты сечений слияния были проведены а) в приближении Wong [12]; б) в обычном приближении перевернутой параболы с ядерным потенциалом в форме I_0 [] со следующими параметрами: $V_0 = 40$ МэВ, $d = 0,6$, $r_0 = 1,22$ Фм; в) с введением параметра и подбором трех параметров из условий наилучшего согласия с экспериментальными данными (*) (таблица 2); г) методом связанных каналов с использованием стандартной программы CCFUS [13]. В таблице 2 приведены экспериментальные данные [14] и расчетные значения сечений слияния по этим моделям. На рисунке 8 представлены экспериментальные результаты данной работы и [15-17], а также расчетные значения сечений деления ядер ^{224}Th . Можно видеть хорошее согласие данных почти во всем районе энергий. Однако в районе энергий кислорода менее 72 МэВ поведение сечения деления отклоняется от экспоненциального падения, которое свидетельствует о том, что вероятно структурные эффекты имеют влияние на сечение слияния в глубоко подбарьерной области взаимодействия двух сферических ядер. Проведенный анализ позволяет описать сечение слияния для более низких энергий, а чувствительность метода позволяет измерить сечения до 10^{-36} см², что на 12 порядков меньше геометрического сечения ядерного взаимодействия. Интерес к дальнейшим исследованиям в этом районе объясняется надеждой получить дополнительную информацию о ядерных состояниях ответственных за кластерный распад ядер.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные автором в диссертационной работе:

1. Проведены детальные исследования регистрационных свойств диэлектрических детекторов из фосфатного стекла и слюды мусковит, облученных ускоренными ионами в широком диапазоне

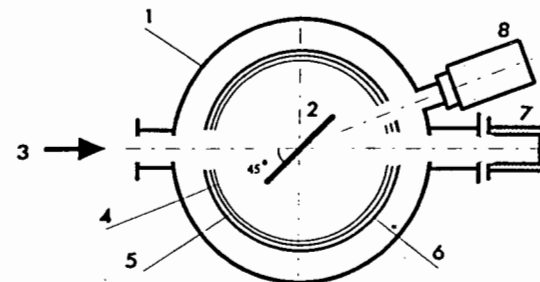


Рис.5 Схема установки для проведения измерения сечения деления составного ядра ^{224}Th в реакции $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$: 1 - камера рассеяния; 2 - мишень ^{208}Pb ; 3 - пучок ионов; 4 - слюдяные детекторы; 5 - 185мкм полиэтилентерефталат; 6 - держатель детекторов; 7 - цилиндр Фарадея; 8 - телевизионная камера для наблюдения за местоположением пучка ионов на мишени.

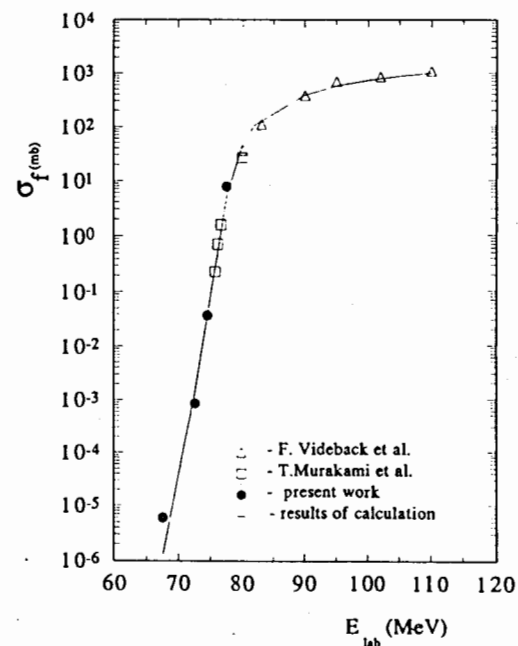


Рис.6 Зависимость сечения деления составного ядра ^{224}Th , получающегося в реакции $^{208}\text{Pb} + ^{16}\text{O}$, от энергии налетающего иона кислорода.

Таблица 1

Энергия, МэВ	Интервал потерь энергии ^{16}O в мишени, МэВ	Поток ^{16}O , ионы	Сечение деления ^{224}Th , мб
78*	77.8 – 77.0	$1.4 \cdot 10^{14}$	7.8 ± 0.1
75	74.8 – 74.2	$1.35 \cdot 10^{15}$	$(3.7 \pm 0.1) \cdot 10^{-2}$
73	72.8 – 72.4	$4.1 \cdot 10^{15}$	$(8.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$
68	67.8 – 67.2	$5.6 \cdot 10^{15}$	$(6 \pm 3) \cdot 10^{-6}$

*Данные были получены при использовании $300 \text{ мкг/см}^2 \text{ } ^{208}\text{Pb}$ на 40 мкг/см^2 алюминиевой подложке.

Таблица 2

σ деление (Mb)						
E_{LS} (МэВ)	Эксперимент	CCFUS 1)		Wong *)	Z,P,V *)	Igo
		непарные	парные			
67.5	$6 \cdot 10^{-6}$	10^{-7}	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$
72.5	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
74.5	$4.2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	—	—	10^{-1}
75.5	$3 \cdot 10^{-1}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$2.3 \cdot 10^{-1}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$
77.5	8.0	$7 \cdot 10^{-1}$	5.7	$1.5 \cdot 10^{-1}$	3	3.6
80	40.0	18	57	5.8	30	43
82	100.0	88	123	58	84	125

1) ^{16}O $\beta_2 = 0.06$ $E_2 = 4.1$
 $\beta_3 = 0.1$ $E_3 = 2.6$
 ^{208}Pb $\beta_2 = 0.4$ $E_2 = 6.9$
 $\beta_3 = 0.5$ $E_3 = 6.1$

*) Расчет выполнен в работе Шилова В.М.
 $V_b = 75.4 \text{ МэВ}$ $\Delta E = 3.6 \text{ МэВ}$
 $hw = 3.95$

Параметр DV = -10.

масс и энергий, а также осколками деления. Показано, что порог чувствительности фосфатного стекла находится в интервале ионизационных потерь энергии $\approx 9\text{-}10 \text{ МэВ/мг/см}^2$, а слюды - порядка 12 МэВ/мг/см^2 . Эффективность регистрации осколков деления составляет $(92 \pm 4)\%$, а для ионов она определяется избирательностью травления.

2. Разработан метод регистрации и идентификации продуктов кластерного распада с использованием фосфатного стекла. Выбран оптимальный режим облучения, химической обработки в 40% HF для $\sim 100\%$ регистрации ионов ^{28}Mg с $E \sim 70 \text{ МэВ}$ в условиях высокого суммарного фона альфа-частиц и осколков деления вплоть до $\sim 10^{14}$ и 10^6 , соответственно. В этих условиях достигнуто разрешение по заряду ± 1 , массе ± 2 и энергии $\pm 10\%$.

3. Исследован кластерный распад ядер ^{236}Pu с эмиссией ионов ^{28}Mg . Использование интенсивного источника ($9.6 \cdot 10^{15}$ ядер), сферической вакуумной камеры и специальных диэлектрических детекторов из фосфатного стекла позволило зарегистрировать и идентифицировать 15 событий ионов ^{28}Mg с энергией $67 \pm 7 \text{ МэВ}$ в условиях фона альфа-частиц $5 \cdot 10^{14}$ и осколков деления $3 \cdot 10^6$. Парциальный период кластерного распада составил $(1.1 \pm 0.3) \cdot 10^{14}$ лет.

4. Измерен парциальный период спонтанного деления ^{236}Pu , который составил $(1.25 \pm 0.12) \cdot 10^9$ лет. Полученное значение хорошо согласуется с данными систематики деления для четно-четных изотопов, но в 1,8 раза меньше ранее опубликованных экспериментальных данных.

5. Разработан метод регистрации осколков деления слюдой мусковит с использованием отжига облученного детектора, который позволил надежно идентифицировать треки фрагментов деления в условиях рассеянных пучков ионов до 10^{16} на мишень.

6. Впервые измерены сечения реакции слияния-деления $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{224}\text{Th} \rightarrow 2\text{ff}$ с использованием слюды мусковит и ускоренных на Тандеме пучков ионов ^{16}O с энергией 75, 73, 68 МэВ, что от 8 до 15 МэВ ниже кулоновского барьера слияния ядер. Разработанный метод регистрации событий позволил спуститься на 8 порядков вниз от геометрического сечения взаимодействия тяжелых ионов с ядрами.

7. Проведен анализ результатов исследования реакции $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$, который показал, что при энергиях кислорода $E_{\text{лаб}} \leq 72 \text{ МэВ}$ поведение сечения деления отклоняется от

экспоненциального падения. Это может свидетельствовать о влиянии структурных эффектов на сечение слияния в глубоко подбарьерном случае взаимодействия двух сферических ядер.

8. Показана возможность при использовании разработанного метода регистрации событий измерить сечения деления составного ядра ^{224}Th в реакции $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ вплоть до 1 пикобарна в области более низких энергий, что создает предпосылки для проведения реакций слияния обратных кластерному распаду в глубоко подбарьерной области энергий.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. Юссонуа М., Ле Ду Ж.Ф., Труберт Д., Бонетти Р., Гуглиельметти А., Гузель Т., Третьякова С.П., Михеев В.Л., Головченко А.Н., Пономаренко В.А. "Кластерный распад ^{236}Pu и корреляции вероятностей α -распада, кластерного распада и спонтанного деления тяжелых ядер", Письма в ЖЭТФ, 1995, т.62, вып.9, с.685-689
2. Oganessian Yu.Ts., Itkis M.G., Kozulin E.M., Pustynnik V.I., Tretyakova S.P., Calabretta L., Guzel T. "Investigation of fusion - fission reaction for $^{208}\text{Pb} + ^{16}\text{O}$ at subbarrier energies", Краткие сообщения ОИЯИ, 1996, №1, с.10.
3. Гюзель Т., Пономаренко В.А., Третьякова С.П. "Трековые детекторы из фосфатного стекла", Сообщение ОИЯИ, Дубна, 1996, с. 10, P 13-96-116
4. Tretyakova S.P., Oganessian Yu.Ts., Akyuz T., Saltoglu T., Bolcal C., Guzel T., Saritepe P., Merkina K.I., Belov A.G., Ponomarenko V.A. "Investigations of fissionable elements in the Turkish fluorites" Сообщение ОИЯИ, Дубна, 1996, с.7, E14-96-158.
5. Гюзель Т., Третьякова С.П. "Регистрационные свойства слюды мусковит". Сообщение ОИЯИ, 1996, Дубна, 1996, P13-96-163.

Цитируемая литература

1. Замятнин Ю.С., Михеев В.Л., Третьякова С.П., Фурман В.И., Кадменский С.Г., Чувильский Ю.М. "Кластерная радиоактивность - достижения и перспективы. Эксперимент и теория." ЭЧАЯ, 1990, т.21, вып.2, с.537-594
2. Третьякова С.П., Бонетти Р., Гуглиельметти А., Михеев В.Л., Оглоблин А.А., Труберт Д., Швецов И.К., Юссонуа М., Головченко А.Н., Пономаренко В.Н. "Исследование кластерного распада ^{232}Th , ^{230}U , ^{236}Pu , ^{242}Cm ". Известия АН РФ, 1996, т.60, 87-96.
3. Ogloblin A.A., Venikov N.I., Lisin S.K., Pirozhkov S.V., Pchelina V.A., Rodionov Yu.F., Semochin U.M., Shabrov V.A., Shvetsov I.K., Shubko V.M., Tretyakova S.P., Mikheev V.L. "Detection of radioactive ^{236}Pu decay with emission of ^{28}Mg nuclei". Phys. Let. B., 1990, v.235, N1,2, p.35-39

4. Селицкий Ю.А., Фунштейн В.В., Яковлев В.А. "Периоды спонтанного деления Pu-236,238,240,242". Тезисы докл. 38-го Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Баку, 1988, Л.: Наука, 1988, с.131
5. Holden N.E. "Ground State spontaneous fission half-lives from thorium to fermium". Proc.Int.Conf. "50 Years with Nuclear Fission", Gaithersburg/Washington, April 25-28, 1989. Eds. S.W.Behrens and A.D.Carlson, publ. by the American Nucl. Society, p.465
6. Третьякова С.П. "Диэлектрические детекторы и использование их в ядерной физике" ЭЧАЯ, 1992, т,23, с.364-429
7. Arlisson G., Hussonnois M., Trubert D, Le Du J.F.,Lederer C.M. "Levels of ^{232}U fed in ^{236}Pu α -decay" Phys. Rev., 1994, 49C, 6, 2963-2970.
- 8 Poenaru D.N., Schnabel D., Greiner W. et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables 48, 1991, 231.
9. Gonnenwein F., Borsig B., Nast-Linke U. et al. Proc. 6-th Inst. Conf. on Nuclei far from Stability and 9-th Inst. Conf. on Atomic Masses and Fundamental Constans, Bernkastel-Kues, Germany, 1992, Eds. R. Neugart and A. Wohr, 10P Publ.Ltd, 1993, p.453
10. Vandenbosch R., in Heavy Ion Fusion Reactions,Proceedings of the Tsukuba International Symposium, Sept.1984, ed. by K.Furuno and T.Kishimoto(World-Scientific,Singapore,1985); Nuclear Fission, N4, 1973.
11. Журавлева Е.Л. "Экспрессная методика многоэлементного рентгено-флуоресцентного анализа с использованием изотопных источников возбуждения и полупроводникового детектора" Сообщение ОИЯИ 14-86-358, Дубна 1980
12. Wong C.Y. " Fusion threshold energy in heavy -ion reactions". Phys. Lett.42B, 1972, p.766
13. Dasso C.H. and Landowhe S., Winther A. "Channel-coupling effects in heavy-ion fusion reactions", Comput. Phys. Commun. 46, 1987, p.187
14. Shilov V.M., "Complete fusion and binary reactions in heavy ion collisions at the coulomb barrier", In Proc. 15 Nucl. Phys. Divisional Conf. (LEND-95), St. Petersburg(Russia), April 18-22, 1995, ed. by Yu.Oganessian, W.von Oertzen, R.Kalpakchieva, World Scientific. Singapore, p.460,1995.
15. Morton C.R. et al., "Resolution of the anomalous fission fragment anisotropies for the $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ reaction", Phys. Rev. C52, 1995, p.243

16. Videback Fet al., "Elastic scattering, transfer reactions, and fission induced by ^{16}O ions on ^{181}Ta and ^{208}Pb ", Phys. Rev. 15C, 1977, N3, 954-971.
17. Murakami T. et al., "Fission probes of sub-barrier fusion cross section enchancements and spin distribution broadening", Phys. Rev., 34C, 1986, N4, 1353-1365.