

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи



КИБКАЛО Юрий Васильевич

ПРОЯВЛЕНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭФФЕКТОВ В
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ
ПРОЦЕССА ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

01.04.16 - Физика ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико - математических наук

К И Е В - 1995



00777385 (.)

Робота виконується в Інституті ядерних досліджень
НАН України

Научний консультант: доктор фізико-математических наук,
професор ЗАЙКА Николай Иванович

Офіціальні опоненти:

1. доктор фізико-математических наук
РАНЮК Юрий Николаевич (ННЦ ХФТИ, г. Харьков)
2. доктор фізико-математических наук, професор
ТОКАРЕВСКИЙ Владимир Васильевич (МНТЦ "Укритие")
3. доктор фізико-математических наук, професор
ХАРЧЕНКО Владислав Федорович (ИТФ НАН Украины)

Ведущая організація: Київський Національний Університет

Захист состоится 30 марта 1995 г. в 11:00 часов на за-
седании Специализированного ученого совета Д 01.68.01 Инсти-
тута ядерных исследований НАН Украины по адресу: 252028, г. Киев,
пр. Науки, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
ядерных исследований НАН Украины

Автореферат разослан 28 февраля 1995 г.

Ученый секретарь
Специализированного ученого совета
кандидат физико-математических наук

В. Чеснокова

ЧЕСНОКОВА В.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Процесс деления атомных ядер за свою более чем полувековую историю исследований дал много важной и интересной информации как в отношении своего практического использования так и для изучения широкого круга фундаментальных проблем ядерной физики, связанных прежде всего с познанием коллективных форм движения ядерной материи большой амплитуды. В этой связи несомненный интерес представляют детальные исследования распределений по массам, энергиям и зарядам осколков деления ядер. Именно эти характеристики несут в себе важную информацию о динамике процесса деления, о связи коллективных и одночастичных степеней свободы, механизме диссипации энергии при движении ядра от седловой точки к точке разрыва, о роли оболочечных эффектов и механизме ядерной вязкости в формировании основных свойств осколков деления.

Не смотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных этой теме, степень влияния свойств ядерной материи и структуры ядра на основные характеристики процесса деления мало исследованы. В связи с этим представляется наиболее актуальным проведение комплексных экспериментальных исследований процесса деления тяжелых ядер, образованных: в различных ядерных реакциях, в широком диапазоне энергий возбуждения с использованием различных методов, что позволяет получить наиболее полную информацию о характеристиках данного процесса, свободную от многих систематических ошибок, что несомненно будет стимулировать дальнейшее развитие теории ядра и ядерных реакций.

Степень исследования темы. Деление актинидных ядер при средних энергиях возбуждения имеет ряд особенностей. Уже при низких энергиях возбуждения наблюдается заметный вклад эмиссионного деления, т.е. деления после предварительного испускания одного или нескольких нейтронов. Интерпретация наблюдаемых распределений осколков деления в этом случае осложняется тем, что в эти распределения дают вклад различные делящиеся ядра, соответствующие разным этапам испарительного каскада.

Кроме того, при взаимодействии заряженных частиц средних энергий с тяжелыми ядрами наблюдается заметный, зависящий от энергии и типа падающих частиц, вклад в полное сечение реакций σ_d процессор с неполной передачей импульса составному ядру. Все это в конечном счете искажает ту информацию, которую мы получаем из анализа экспериментальных данных.

Настоящая работа посвящена исследованию энергетической зависимости сечений деления, массовых распределений осколков, относительного вклада симметричного и асимметричного способов деления при взаимодействии легких заряженных частиц с некоторыми актинидными ядрами в широком диапазоне энергий возбуждения. Особое внимание при этом уделялось исследованию вклада процессов, предшествующих образованию делящейся системы.

Для количественного описания сечений деления при средних энергиях возбуждения используются соотношения статистической теории, которая применима в тех случаях, когда большое число квантовых состояний становится энергетически доступным в седловой точке. При этом предполагается, что распределение K -состояний (K - проекция полного углового момента J на ось симметрии ядра) имеет Гауссовский вид, а дисперсия этого распределения K_0^2 непосредственно связана с температурой и эффективным моментом инерции ядра в седловой точке.

В случае деления актинидных ядер при средних энергиях возбуждения величина K_0^2 , выводимая непосредственно из анализа экспериментальных данных, усредняется по различным этапам испарительного каскада и широкому интервалу энергий возбуждения. Чтобы получить величину K_0^2 , соответствующую делению только исходного ядра, необходимо знать энергетическую зависимость этой величины для всех ядер, делящихся на разных этапах испарительной цепочки. Кроме того необходимо учитывать на каждом этапе конкуренцию между делением и эмиссией нейтронов.

Один из интересных и малоисследованных вопросов в физике деления связан с изучением роли оболочечных эффектов в формировании массовых распределений осколков деления тяжелых ядер. Асимметрия массовых распределений осколков при спонтанном и низкоэнергетическом делении актинидных ядер обычно связывается с проявлением оболочечной структуры как делящегося ядра

так и осколков в процессе движения от седловой точки к точке разрыва. Экспериментальные данные ряда работ указывают на существование, по крайней мере, двух независимых мод деления и различие формы барьеров для симметричного и асимметричного способов деления. В этом случае должен существовать спектр переходных состояний на каждом барьере и он должен сохраняться при спуске с седловой точки к точке разрыва. Если это так, то анизотропия угловых распределений должна быть различной для симметричного и асимметричного способов деления.

Анализ экспериментальных данных по делению актинидных ядер показывает, что при спуске делящегося ядра с седловой точки к точке разрыва на процесс формирования и разделения осколков кроме оболочечных эффектов существенное влияние оказывает также температура и полный угловой момент. Влияние полного углового момента на величину интегральных и дифференциальных сечений деления в настоящее время общепризнанно и хорошо исследовано, в то время как для описания распределения выходов продуктов по массам влиянием полного углового момента в большинстве случаев пренебрегается.

В настоящее время накоплен богатый экспериментальный материал по исследованию массовых, зарядовых и энергетических распределений осколков деления для большого числа актинидных ядер в широком интервале энергий возбуждения. Существующие теоретические модели объясняют только отдельные аспекты этих распределений и не могут претендовать на описание всего разнообразия явлений, влияющих на формирование осколков. В связи с этим в последние годы делаются попытки систематизировать массовые распределения осколков деления с помощью эмпирических соотношений. Эта процедура позволяет проследить основные закономерности изменения формы распределения осколков в зависимости от массы, заряда, энергии возбуждения и полного углового момента делящегося ядра. Основными недостатками этих работ является то, что с помощью эмпирических соотношений описываются в основном одномерные распределения по массам, зарядам или числу нейтронов. Такой подход является ограниченным поскольку не позволяет создать реальную многомерную картину распределения осколков деления ядер.

Цель работы заключалась в комплексном экспериментальном исследовании с использованием современных ускорителей и различных экспериментальных методик в широком интервале энергий возбуждения процесса деления актинидных ядер посредством измерения и анализа дифференциальных и интегральных сечений деления, распределения продуктов деления по массам, зарядам и кинетическим энергиям; создании феноменологических моделей для систематизации экспериментальных данных и изучения основных закономерностей изменения наблюдаемых характеристик в зависимости от массы, заряда, энергии возбуждения и полного углового момента делящегося ядра; получении информации о динамике процесса деления и роли оболочечных эффектов при формировании основных свойств осколков деления.

Научная новизна и практическое значение работы.

• Впервые проведены измерения:

- дифференциальных и интегральных сечений деления ядер ^{232}Th , ^{235}U и ^{238}U α -частицами и ионами ^3He в интервале энергий 40 - 80 МэВ;
- массовых распределений осколков деления ядер ^{235}U и ^{238}U α -частицами в интервале энергий 20 - 80 МэВ;
- кумулятивных выходов и угловой анизотропии ряда выделенных продуктов для симметричного и асимметричного способов деления ядер ^{232}Th α -частицами с энергией 27,2 МэВ и ^{237}Np дейтронами с энергией 13,6 МэВ.

• Впервые получена информация о вкладе неупругих процессов в полное сечение реакций при взаимодействии α -частиц с тяжелыми ядрами в интервале энергий 20 - 140 МэВ и показана необходимость учета этих процессов при анализе экспериментальных данных по делению тяжелых ядер.

• Впервые получена энергетическая зависимость дисперсии K -состояний в седловой точке и показано, что при энергиях возбуждения 40 - 45 МэВ происходит существенное уменьшение

влияния оболочечных эффектов и при более высоких энергиях процесс деления актинидных ядер определяется жидкокапельным барьером.

- Впервые получена энергетическая зависимость отношения выхода осколков и разницы в высоте барьеров для симметричного и асимметричного деления ядер ^{235}U и ^{238}U α -частицами в интервале энергий 20 - 80 МэВ и показано существование этих мод деления во всем исследованном интервале энергий возбуждения.
- Предложен новый подход к анализу массовых распределений осколков с учетом полного углового момента делящегося ядра и показано, что на процесс формирования и разделения осколков существенно влияет не только температура, но и полный угловой момент ядра, что должно способствовать развитию наших представлений о динамике процесса деления тяжелых ядер.
- Предложены новые квазифеноменологические соотношения для описания формы массовых распределений осколков деления с учетом кластерной структуры ядер и независимых выходов осколков деления актинидных ядер на основе двумерного Гауссовского распределения, что открывает новое направление в систематизации экспериментальных данных и изучении закономерности изменения формы массовых распределений осколков в зависимости от характеристик делящегося ядра.

Достоверность результатов, полученных в диссертации вытекает из того, что:

- Работа выполнена на высоком экспериментально-методическом уровне с использованием нескольких экспериментальных методов:
 - для измерения характеристик деления тяжелых ядер в интервале энергий α -частиц до 27,2 МэВ и дейтронов 13,6 МэВ на циклотроне У-120;

- для измерения характеристик деления тяжелых ядер в интервале энергий α -частиц 40 - 100 МэВ на изохронном циклотроне У-240;
 - для исследования характеристик вынужденного деления актинидных ядер методом полупроводниковой γ -спектроскопии.
- Выполнено комплексное экспериментальное исследование процесса деления тяжелых ядер, образованных в разных ядерных реакциях, с использованием разных ускорителей и различных методик в широком интервале энергий возбуждения, что позволило получить наиболее полную информацию для данного процесса, свободную от многих систематических ошибок.
 - Проведено сравнение полученных в диссертации результатов с расчетами в рамках существующих теоретических моделей и экспериментальными данными других авторов, что позволило уточнить ряд теоретических положений и подтверждает адекватность выбранных подходов.

Апробация работы и публикации. Работы, вошедшие в диссертацию, выполнялись по Республиканским планам важнейших работ по естественным и общественным наукам, плану фундаментальных исследований ГКИТ Украины и ведомственному плану НАН Украины.

Основные результаты работ, представленные в диссертации, докладывались на Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (1982 - 1990); Международной конференции по ядерно-физическим исследованиям, посвященной 50-летию осуществления в СССР реакции расщепления атомного ядра (Харьков, 1982), Всесоюзной конференции по нейтронной физике (Киев, 1983); Всесоюзном совещании по физике деления ядер (Обнинск, 1984); 15-м Международном симпозиуме по ядерной физике. Деление ядер. (Гауссиг, 1985); Международной конференции, посвященной 50-летию деления ядер (Ленинград, 1989); Всесоюзном семинаре по точным измерениям в ядерной спектроскопии (Ужгород, 1990); Міжнародній конференції, присвяченій 75-річчю ітворення Академії Наук України (Ужгород, 1993); IV

международной школе по ядерной физике (Киев, 1994); на семинарах в Центральном институте физики ГКАЭ СРР (Вухарест, 1983); Институте ядерной физики Польского агентства по атомной энергии (Краков, 1986); Институте ядерной физики ЧСАН (Ржеж, 1989); на семинарах и ежегодных научных конференциях ИЯИ НАН Украины, а также отражены в 25 научных публикациях.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 221 страницу машинописного текста, включающих в себя 39 рисунков, 12 таблиц и список цитируемой литературы из 160 наименований.

Конкретный личный вклад автора в получение научных результатов. При личном участии автора

1. Разработаны экспериментальные методики для измерения угловых, массовых и энергетических распределений осколков деления тяжелых ядер варяженными частицами на циклотронах У-120 и У-240, которые позволяли регистрацию и анализ продуктов деления ядер как непосредственно на выведенном пучке варяженных частиц так и кумулятивных выходов нейтронов методом полупроводниковой γ -спектроскопии.
2. Получены экспериментальные данные по дифференциальным и интегральным сечениям и массовые распределения осколков деления ряда актинидных ядер, образованных в реакциях с α -частицами и ионами ${}^3\text{He}$ в интервале энергий возбуждения до 100 МэВ.
3. Предложен метод определения вклада неупругих процессов в полное сечение реакции при взаимодействии варяженных частиц с тяжелыми ядрами в интервале энергий 20 - 140 МэВ, основанный на сравнении результатов расчетов полного сечения реакций по оптической модели и сечения образования составного ядра из анализа полного сечения деления ядер.
4. С учетом вышеприведенного метода выполнен анализ угловых распределений осколков деления ряда актинидных ядер и получена энергетическая зависимость дисперсии распределения K -состояний в седловой точке делящегося ядра в интер-

вале энергий возбуждения до 140 МэВ, что позволило локализовать интервал энергий возбуждения (40 - 45 МэВ), где происходит существенное уменьшение влияния оболочечных эффектов и процесс деления актинидных ядер при более высоких энергиях определяется жидко-капельным барьером.

5. На основании анализа массовых распределений осколков деления ядер ^{235}U и ^{236}U α -частицами получена энергетическая зависимость разницы в высоте барьеров симметричного и асимметричного способов деления в интервале энергий возбуждения 20 - 80 МэВ, что позволило сделать вывод о существовании, по крайней мере, двух указанных мод деления во всем исследованном интервале энергий возбуждения.
6. На основании анализа угловой анизотропии ряда выделенных продуктов деления ядер ^{236}U и ^{239}Pu , образованных в реакциях с α -частицами и дейтронами при близких энергиях возбуждения, показано, что угловая анизотропия для осколков симметричного и асимметричного деления в пределах ошибок измерений одинакова.
7. Предложен новый подход к анализу массовых распределений осколков деления с учетом полного углового момента ядра. В рамках этого подхода проведен анализ массовых распределений осколков деления ядер ^{236}U , ^{239}Pu и ^{240}Pu , образованных в реакциях с разными легкими частицами, и показано, что на процесс формирования осколков существенно влияет не только температура, но и полный угловой момент делящегося ядра.
8. Предложено новое квазифеноменологическое описание массовых распределений осколков деления с учетом кластерной структуры ядер, что позволило воспроизвести форму массовых распределений осколков спонтанного деления и деления тепловыми нейтронами для 15 ядер в интервале от ^{229}Th до ^{258}Fm , а также для деления ^{240}Pu α -частицами с энергиями 20 - 80 МэВ.
9. Предложено новое феноменологическое описание независимых

выходов осколков деления актинидных ядер, что позволило хорошо воспроизвести форму двумерных распределений осколков деления ^{235}U тепловыми нейтронами в зависимости от заряда и числа нейтронов.

В работах, выполненных в содружестве с другими авторами, автору диссертации принадлежит личное участие в постановке задач, разработке методик измерения, участие в подготовке и проведении измерений, обработке экспериментальных данных, интерпретации и анализе полученных данных в рамках существующих теоретических моделей и подготовке текстов публикаций.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введении кратко освещено состояние вопросов, обоснована актуальность выбранной темы, определена цель работы и сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приведено описание структуры диссертации и дана информация об апробации и публикации результатов научных исследований.

Первая глава посвящена обсуждению круга вопросов, связанных с экспериментальными установками и методиками, использованными для проведения измерений на циклотронах У-120 и У-240 и получения достоверных данных по делению актинидных ядер.

Получение экспериментальных данных по делению актинидных ядер при энергиях возбуждения до ~ 25 МэВ осуществлялось на многоцелевой установке на циклотроне У-120 ИЯИ НАН У. Пучок α -частиц с энергией 27,2 МэВ фокусировался в центр первой камеры, где размещался набор стандартных алюминиевых поглотителей, предназначенных для изменения энергии α -частиц. После прохождения поглотителей пучок фокусировался вторым квадратным дублетом во вторую камеру, в центре которой располагалась исследуемая мишень, и далее по ходу пучка располагалась золотая мишень. Мониторинг пучка осуществлялся по упругому рассеянию α -частиц на золоте двумя полупроводниковыми детекторами. Один из этих мониторов использовался для контроля энергии и энергетического разброса в пучке α -частиц после прохождения поглотителей.

Измерения в энергетическом диапазоне α -частиц 40 - 100 Мэв были выполнены на выведенном пучке изохронного циклотрона У-240. Пучок α -частиц с помощью системы транспортировки выводился в экспериментальное помещение и фокусировался двумя парами квадрупольных линз на галлимитор, который располагался перед камерой рассеяния. После прохождения исследуемой мишени в центре реакционной камеры попадал на мониторинговую мишень в камере-анализаторе и затем тормозился на удаленном цилиндре Фаралея. Регистрация продуктов реакций проводилась детекторами, которые размещались как внутри реакционной камеры, так и снаружи камеры-анализатора. Контроль пучка по ионопроводу и его формирование с помощью щелей и диафрагм осуществлялись в криостатных.

Наряду с использованием прямых методов регистрации осколков деления ядер с помощью полупроводниковых детекторов использовался метод исследования реакции деления по γ -излучению продуктов, предварительно накопленных при определенных условиях в фольгах коллекторах. Установка для исследования вынужденного деления ядер по γ -излучению продуктов размещалась в многоцелевой камере и состояла из системы формирования первичного луча на мишени и реакционной камеры. Реакционная камера изготавливалась двух конструкций длиной 50 мм и 20 мм. В первом случае осколки вбиваются в накопители, расположенные на торце и на внутренней цилиндрической поверхности камеры, во втором - только на торцевой поверхности. Конструкции камер допускают продольное их соединение вдоль оси пучка и позволяют измерять угловое распределение осколков или интегральный выход осколков при различных энергиях падающих на мишень частиц.

Измерения γ -спектров осколков деления проводились на спектрометрическом комплексе, состоящем из кристаллического Ge(Li) детектора объемом 150 см³ фирмы "ORTEC", позволяющем проводить первичную обработку γ -спектров (слаживание, нахождение центра тяжести пиков, площадей пиков с вычетом фона, временные поправки и т.д.). Относительное энергетическое разрешение спектрометра составляло 0,4% для линии ⁶⁰Co - 1332 эВ. Абсолютная эффективность регистрации γ -квантов в зависимости

от энергии определялась при помощи набора стандартных источников ОСГИ и с использованием γ -излучения радиоактивных: нуклидов в пеночках распадов осколков спонтанно-деящегося ^{252}Cf . Статистическая погрешность определения абсолютной эффективности не превышала 3%.

При выполнении данной работы использовались мишени из обогащенных изотопов ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{236}U , ^{237}Np , ^{239}Pu . В качестве материала для подложек мишеней использовались ^{12}C и ^{27}Al . Выбор этих элементов обусловлен с одной стороны - относительно малым атомным весом, что необходимо для обеспечения низких величин выхода нейтронов в реакциях с заряженными частицами, а с другой стороны - достаточной механической прочностью таких подложек, что обеспечило длительную сохранность мишеней в процессе измерений.

При выполнении данной работы применялись полупроводниковые детекторы двух типов. Для регистрации α -частиц использовались кремниевые поверхностно-барьерные детекторы толщиной до 2 мм, энергетическое разрешение которых было не хуже 1,2% для 5 МэВ α -частиц. Для регистрации осколков деления использовались прострельные поверхностно-барьерные детекторы толщиной 30 - 50 мкм с энергетическим разрешением 0,5 - 1% для 5 МэВ α -частиц. Применение тонких детекторов обеспечивало полную дискриминацию спектра осколков от фона α -частиц, поскольку пробег осколков полностью укладывался в толщине детектора, а потери энергии α -частицами не превышали 6 - 8 МэВ.

При измерениях для повышения надежности получаемых данных и эффективности использования рабочего времени применялась многоканальная система регистрации и накопления данных. Она позволяла регистрировать одновременно спектры от 8 детекторов, 6 из которых непосредственно регистрировали спектры осколков деления. В спектрометрическом канале осуществлялись функции основного усиления, отсеки низкоэнергетического фона и шумов детекторов, а также отбор совпадающих событий во времени. Усиленные и предварительно собранные по амплитуде и времени сигналы поступали для накопления и дальнейшей обработки на информационно-вычислительный комплекс, реализованный как модульная система, работающая в линию.

В данной главе также обсуждаются вопросы, связанные с методикой измерения и абсолютизации интегральных и дифференциальных сечений реакций, массовых и энергетических распределений осколков деления. Приводятся оценки погрешностей для полученных экспериментальных данных.

Во второй главе обсуждаются вопросы, связанные с исследованием угловых распределений осколков деления актинидных ядер. Изучение интегральных и дифференциальных сечений деления ядер оваряженными частицами является одним из основных источников получения информации о различных свойствах делящихся ядер. Для количественного описания сечений деления при средних энергиях возбуждения используются соотношения статистической теории, в которой предполагается, что распределение K -состояний (K - проекция полного углового момента J на ось симметрии ядра) имеет гауссовский вид, а дисперсия этого распределения K_0^2 непосредственно связана с температурой t и эффективным моментом инерции ядра J_{eff} в седловой точке

$$K_0^2 = J_{eff} \cdot t / h^2. \quad (1)$$

Угловое распределение осколков деления ядер

$$W_M^J \sim \int_0^E d\epsilon \int_0^J dk [T_J(\epsilon) \rho_i(E_i, k) \cdot P_{MK}^J] \quad (2)$$

пропорционально сумме (или интегралу) по k и ϵ , которая содержит три фактора: (а) коэффициенты проницаемости $T_J(\epsilon)$ для прохождения через переходное состояние с коллективной энергией ϵ в делятельной моде; (б) плотность уровней в переходном состоянии $\rho_i(E_i, k)$; (в) распределение вероятности деления ядра P_{MK}^J .

Анализ этих сечений в широкой области энергий возбуждения делящихся ядер дает возможность исследовать степень влияния оболочечных эффектов на статистические и динамические свойства ядер. В частности позволяет проследить особенности хода энергетической зависимости анизотропии угловых распределений осколков деления и, следовательно, величины K_0^2 , которая служит важным источником получения сведений о переходных свойствах ядер в сильнодеформированном состоянии.

Для получения параметров входного канала реакции при энергии α -частиц ≤ 30 МэВ было использовано два метода анализа экспериментальных данных. В первом, значения коэффициентов проницаемости T_l , полученные из расчетов по оптической модели (ОМ), аппроксимировались простым соотношением Хилла-Уиллера для проницаемости параболического барьера (ПБ). Параметры оптического потенциала находились из анализа экспериментальных данных по упругому рассеянию α -частиц. Во втором, проводился анализ экспериментальных данных по полным сечениям деления с учетом вклада эмиссионного деления в приближении ПБ.

Сравнение данных по полным сечениям реакций, полученные с помощью этих двух методов, показано на рис.1. Здесь видно, что при энергиях α -частиц выше кулоновского барьера эти данные хорошо согласуются, тогда как при более низких энергиях наблюдается существенное различие. При

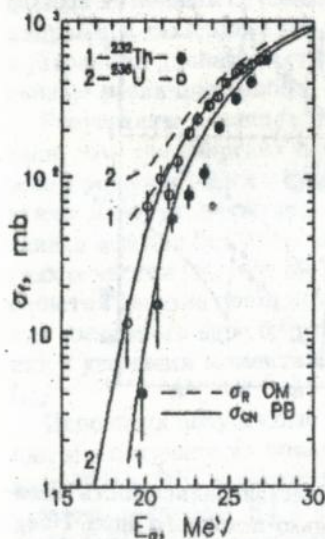


Рис.1.

чина этого расхождения обусловлена вкладом прямых процессов при взаимодействии α -частиц с тяжелыми ядрами при энергиях ниже кулоновского барьера. При анализе экспериментальных данных по упругому рассеянию с помощью ОМ эти процессы не отличимы от процессов, идущих через составное ядро. В случае анализа экспериментальных данных по полным сечениям деления с учетом вклада эмиссионного деления получаемые сечения образования составного ядра в гораздо меньшей степени подвержены переоценке из-за прямых процессов, поскольку такие процессы при энергиях α -частиц, не превышающих кулоновского барьера, приводят к возбуждению конечных ядер главным образом ниже барьера

деления и вероятность их распада по каналу деления пренебрежимо мала. Таким образом, последний метод позволяет отбирать

только те события при взаимодействии во входном канале, которые приводят к полному слиянию падающей частицы с ядром и образованию составного ядра.

На рис. 2 приведена энергетическая зависимость величины K_0^2 для делящихся ядер ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu и ^{243}Cm . Светлыми и темными точками показаны литературные данные из реакции (n, f) , темными треугольниками представлены данные из реакции (α, f) , полученные при определении параметров входного канала реакции по аналогу полных сечений деления в приближении ПВ.

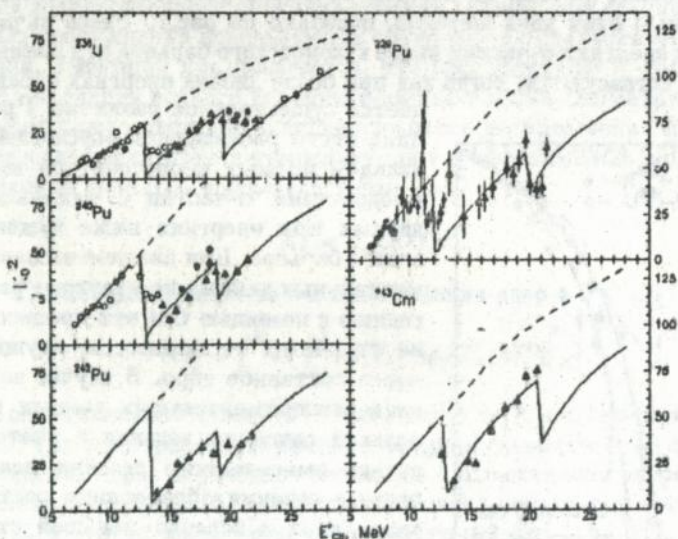


Рис. 2.

Штриховой кривой показана энергетическая зависимость величины A_0^2 , рассчитанная для деления только исходного ядра. Энергетическая зависимость величины $(K_0^2)_{\text{ср}}$, рассчитанная с учетом вклада деления ядер после предварительного испускания одного или двух нейтронов, представлена на этом рисунке сплошной ли-

ний. Расчеты энергетической зависимости величины K_0^2 проводились в рамках сверхтекучей модели ядра и не учитывалась энергетическая зависимость параметра делимости ядра. Здесь наблюдается хорошее согласие полученных нами значений K_0^2 из анализа α -частичных данных с теоретическими и нейтронными данными. При этом необходимо отметить, что для данных, полученных с ОМ параметрами входного канала, наблюдается существенное расхождение с этими данными.

Для определения параметров входного канала в интервале энергий α -частиц ≥ 30 МэВ в настоящей работе проведен анализ энергетической зависимости полного сечения реакций при взаимодействии α -частиц энергий 20 - 140 МэВ с ядрами, а также определены вклады в это сечение прямых процессов и слияния α -частиц с ядрами. Из-за отсутствия систематических экспериментальных данных по полным сечениям реакций при взаимодействии α -частиц с ядрами, а также сечений полного слияния и неупругих процессов в указанном диапазоне энергий нами использованы литературные данные различных работ.

Результаты анализов, проведенных в настоящей работе, показали, что при энергиях α -частиц ниже кулоновского барьера прямые процессы вносят существенный вклад в полное сечение реакции и могут искажать значения K_0^2 , получаемые из анализа канала деления без учета этого фактора. При более высоких энергиях α -частиц ($E_\alpha > 60$ МэВ) наблюдается уже существенный вклад событий деления после неупругих процессов и в сечение образования составного ядра будут давать вклад только парциальные сечения с угловыми моментами до некоторого критического значения l_{cr} .

Используя полученные выше параметры входного канала реакции мы получили из анализа дифференциальных сечений деления ядер ^{236}U и ^{238}U α -частицами и ионами ^3He энергетическую зависимость величины K_0^2 в интервале энергий возбуждения 35 - 110 МэВ. Эти данные приведены на рис.3, где также сплошными линиями показаны также наши расчеты величины K_0^2 по сверхтекучей модели для деления только исходного ядра в случае двугорбого барьера (1), с учетом эмиссионного деления (2) и для жидкокапельного барьера с учетом эмиссионного деления (3).

Здесь видно, что с учетом вклада прямых процессов, все экспериментальные значения K_0^2 в интервале энергий выше 44 МэВ хорошо описываются жидкокапельной кривой. Такой ход энергетической зависимости K_0^2 с учетом того, что было достигнуто хорошее описание этой зависимости в рамках двугорбого барьера

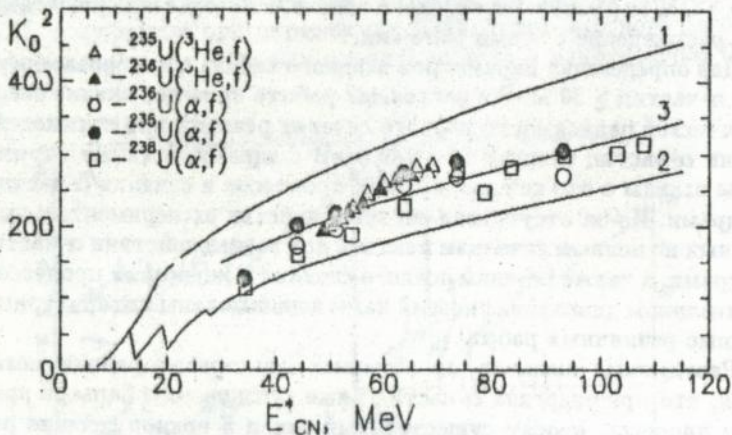


Рис.3.

деления в энергетической области < 30 МэВ, говорит о том, что в диапазоне энергий возбуждения 40 - 45 МэВ происходит уменьшение влияния оболочечных эффектов и седловая форма ядра постепенно сдвигается от формы, соответствующей второму барьеру, к жидкокапельной седловой форме. Этот экспериментальный факт подтверждает теоретические выводы и локализует интервал энергий возбуждения, где этот переход происходит.

В третьей главе обсуждаются вопросы, связанные с исследованием распределений осколков деления актинидных ядер по массам и кинетическим энергиям. Изучение массовых распределений осколков при делении актинидных ядер позволяет получать важную информацию о механизме реакции деления и в первую очередь - процессе формирования осколков. При этом интересным и малоисследованным является вопрос о роли оболочечных эффектов

на различных стадиях процесса деления. Наиболее ярко оболочечная структура в сложных ядерных превращениях проявляется в асимметрии масс осколков деления актинидных ядер.

Систематические экспериментальные данные о массовых и энергетических распределениях осколков деления актинидных ядер получены до энергий 36 МэВ. В настоящей работе проведены такие исследования для ядер ^{235}Pu и ^{239}Pu в более широком энергетическом диапазоне (≤ 80 МэВ), где основные характеристики массовых распределений осколков могут испытывать существенные изменения. На рис. 4 представлена энергетическая зависимость сечений симметричного (σ^s) и асимметричного (σ^a) способов деления указанных ядер в широкой области энергий возбуждения

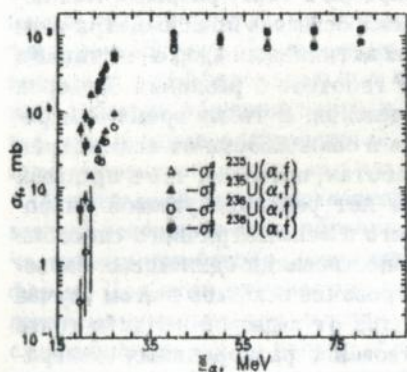


Рис. 4.

(≤ 80 МэВ). Эти данные получены разложением массовых распределений на симметричную и асимметричную компоненты с помощью пяти гауссианов. На рисунке видно, что энергетическая зависимость сечений деления для обоих ядер имеет одинаковый вид. При энергии возбуждения выше 45 МэВ сечения для двух способов деления становятся примерно одинаковыми. Если учесть, что при этих энергиях возбуждения оболочечные эффекты уже не играют

существенной роли в процессе деления, то можно говорить, по крайней мере, о двух равновероятных модах деления, которые наблюдаются на эксперименте во всем интервале энергий возбуждения.

Исправленные на вклад эмиссионного деления величины отношения симметричного к асимметричному выходам осколков для делящихся ядер ^{235}Pu и ^{239}Pu в интервале энергий до 80 МэВ использовались для определения по статистической модели разницы

в высоте барьеров деления указанных двух мод. Результаты расчетов показывают, что для этих делящихся ядер при энергиях возбуждения до 40 МэВ различие в высоте барьеров симметричного и асимметричного способов деления составляет около 1,5 МэВ, что хорошо согласуется с литературными данными. При более высоких энергиях барьеры для указанных двух мод деления близки по величине.

В настоящее время существуют различные представления о механизме формирования массовых распределений осколков деления тяжелых ядер. В одних случаях делается попытка объяснить этот механизм различием высот барьеров для симметричного и асимметричного способов деления, в других влиянием оболочечной структуры осколков деления вблизи точки разрыва или динамикой спуска делящегося ядра с барьера к точке разрыва. Как показано выше, сравнение выходов масс осколков при симметричном и асимметричном способах деления актинидных ядер α -частицами разных энергий не противоречит гипотезе о различии барьеров деления для указанных двух мод деления. В то же время измерение угловой анизотропии осколков в зависимости от асимметрии деления, проведенное во многих работах, показало, что в пределах экспериментальных погрешностей нет различия угловой анизотропии для осколков симметричного и асимметричного способов деления, что может говорить о существовании одинаковых барьеров для двух мод деления и формирование осколков в этом случае должно происходить при спуске ядра от седловой точки к точке разрыва. Таким образом, существование разноречивых экспериментальных данных не позволяет сделать однозначный вывод о механизме формирования массовых распределений осколков деления.

С целью исследования этого вопроса нами были проведены измерения кумулятивных выходов и угловой анизотропии осколков деления ^{232}Th α -частицами с энергией 27,2 МэВ и ^{237}Np дейтронами с энергией 13,6 МэВ. Анализ экспериментальных данных, полученных в настоящей работе, показал хорошее согласие с результатами других работ. При этом необходимо отметить, что угловая анизотропия для осколков, соответствующих симметричному и асимметричному способам деления, в пределах ошибок из-

мерений одинакова, что не позволяет обнаружить эффект, связанный с различием формы барьера деления для этих двух мод деления.

В четвертой главе рассматриваются вопросы, связанные с исследованием зависимости массовых распределений осколков деления от энергии возбуждения и полного углового момента делящегося ядра. Асимметрия массовых распределений осколков при спонтанном и низкоэнергетическом делении актинидных ядер обычно связывается с проявлением оболочечной структуры как делящегося ядра так и осколков в процессе движения ядра от седловой точки к точке разрыва. Детальный анализ экспериментальных данных показывает, что при формировании угловых, массовых и энергетических распределений осколков существенную роль играет спектр переходных состояний над барьером деления, основными характеристиками которых являются коллективная энергия и полный угловой момент делящегося ядра. Зависимость интегральных и дифференциальных сечений деления от полного углового момента общепризнанна и хорошо исследована, в то время как при анализе распределений осколков по массам и кинетическим энергиям влиянием его полностью пренебрегается.

В настоящей работе показано, что массовые распределения осколков для делящихся ядер, образованных в реакциях с разного типа частицами при близких энергиях возбуждения, имеют различную форму. При этом отмечается, что дисперсия массовых распределений минимальна при делении ядер γ -квантами и затем растет с увеличением массы частиц, т.е. с ростом переданного углового момента во входном канале реакции.

В данной главе предлагается метод анализа массовых распределений осколков деления актинидных ядер с учетом полного углового момента делящегося ядра. Здесь предполагается, что при спуске ядра с седловой точки к точке разрыва коллективная энергия и полный угловой момент делящегося ядра играют существенную роль в формировании осколков и, следовательно, массовое распределение осколков, наблюдаемое на эксперименте, должно быть просуммировано по спектру переходных состояний в седловой точке

$$Y(A) \sim \sum_{J=0}^{J_{max}} (2J+1) T_J Y_J(A), \quad (3)$$

где $(2J+1)T_J$ - парциальное сечение образования составного ядра, $Y_J(A)$ - массовое распределение осколков для переходного состояния делящегося ядра с полным угловым моментом J .

Для определения зависимости параметров, характеризующих массовые распределения осколков деления ядер, от энергии возбуждения и переданного углового момента в данной работе был проанализирован большой объем экспериментальных данных для делящихся ядер ^{236}U , ^{239}Pu и ^{240}Pu , образованных в реакциях с γ -квантами, нейтронами, дейтронами, α -частицами и ионами ^3He .

На рисунке 5 представлена зависимость дисперсии массовых распределений осколков и отношения выходов для симметричного и асимметричного способов деления ядра ^{236}U , образованного в реакциях с α -частицами и нейтронами во входном канале, от энергии возбуждения и среднего углового момента. Из сравнения данных, представленных на этом рисунке, видно, что форма массовых распределений осколков в основном определяется вносимым угловым моментом, а не энергией возбуждения составного ядра. Изменение как дисперсии массовых распределений осколков так и отношение выходов осколков симметричного способа деления к асимметричному носит линейный характер в данном интервале изменения полного углового момента делящегося ядра.

В данной главе проанализированы массовые распределения осколков деления ядер ^{236}U , ^{239}Pu и ^{240}Pu , образованных в реакциях с равными частицами во входном канале при близких энергиях возбуждения, переданный угловой момент при этом менялся примерно в два раза. Анализировалась только тяжелая группа осколков, чтобы не усложнять анализ необходимостью учета изменения выхода симметричной моды деления с ростом передаваемого углового момента. Зависимость дисперсии массовых распределений осколков от полного углового момента и температуры делящегося ядра, полученная в настоящей работе при температуре делящегося ядра, равной 0.58, 0.73 и 0.74 МэВ, близка к линейной. Достигнуто довольно хорошее согласие между экспериментальными и расчетными данными, что говорит о необходимости учета влия-

ния полного углового момента делящегося ядра при описании массовых распределений осколков деления ядер.

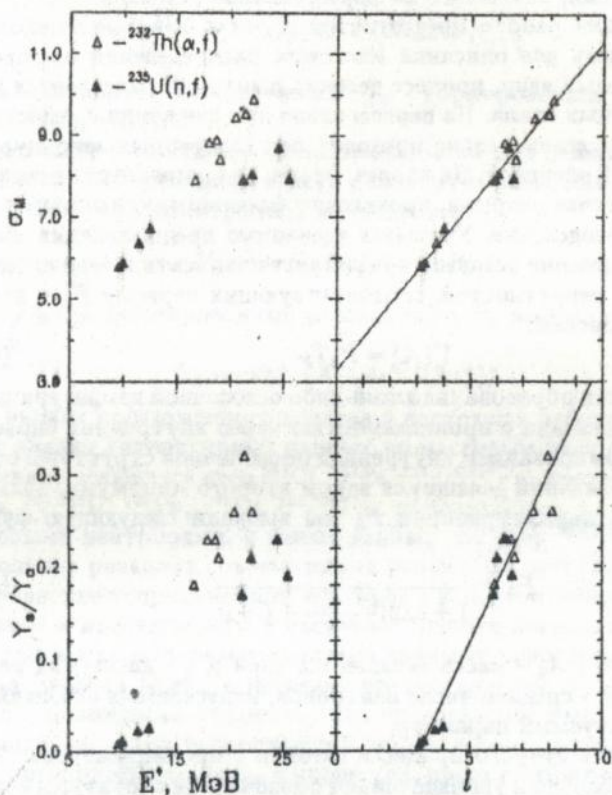


Рис. 5.

В пятой главе предлагаются кваифеноменологические модели для описания распределения осколков деления ядер по массам и зарядам.

В настоящее время накоплен богатый экспериментальный материал по исследованию массовых, зарядовых и энергетических распределений осколков деления для большого числа актинидных

ядер в широком интервале энергий возбуждения. Существующие теоретические модели объясняют только отдельные аспекты этих распределений и не могут претендовать на описание всего разнообразия явлений, влияющих на формирование осколков.

В настоящей работе предлагается простая квазиэноменологическая модель для описания массовых распределений осколков деления тяжелых ядер, процесс деления в которой разцеляется на два независимых этапа. На первом этапе при движении к седловой точке ядро последовательно проходит ряд кластерных конфигураций, с близкой энергией. На втором этапе, во время спуска с седловой точки к точке разрыва, происходит формирование осколков, а потом и их разделение. Учитывая сделанные предположения массовое распределение осколков предлагается записать в виде произведения двух вероятностей, соответствующих первому P_A и второму T_F процессам.

$$Y(A) = P_A T_F. \quad (4)$$

Вероятность образования какой-либо осколочной конфигурации может быть связана с проницаемостью через внутренний барьер деления и формированием внутренней оболочечной структуры осколков при прохождении делящегося ядром второго минимума. Таким образом, для параметризации P_A мы выбрали следующую функцию

$$P_A = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{(A - \bar{A}_0)^2}{2\sigma_A^2} + C_{PA}\right]}, \quad (5)$$

где $\bar{A}_0 = \frac{A_0 - \bar{\nu}}{2}$; A_0 - масса делящегося ядра; σ_A - дисперсия распределения; $\bar{\nu}$ - среднее число нейтронов, испускаемых осколками; C_{PA} - варьируемый параметр.

Вероятность второго процесса связана с проницаемостью через внешний барьер и упорядочением оболочечной структуры осколков при спуске с седловой точки к точке разрыва. Поскольку делящееся ядро на внешнем барьере имеет асимметричную форму, то T_F должна иметь также форму, аналогичную (2), но при этом ограничивать выход продуктов симметричного деления в диапа-

поче масс $\bar{A}_0 \mp \Delta A$

$$T_F = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{[(A - \bar{A}_0) - \Delta A]^2}{2\sigma_F^2} + C_{TF}\right]}, \quad (6)$$

где σ_F - дисперсия распределения C_{TF} - нормировочная константа а $\Delta A = (A_H - A_L)/2$.

Поскольку существуют две основные моды при делении актинидных ядер, то необходимо ввести дополнительный член, учитывающий вклад от симметричной компоненты

$$Y(A) = C_A P_A T_F + C_S P_S, \quad (7)$$

где C_A и C_S - нормировочные константы, а P_S имеет гауссовскую форму

$$P_S = \exp\left[-(A - \bar{A}_0)^2 / (2\sigma_A^2)\right]. \quad (8)$$

В рамках предложенного подхода в настоящей работе был проведен анализ литературных данных по массовым распределениям спонтанно делящихся ядер ^{252}Cf , ^{253}Es , $^{254,256,258}\text{Fm}$, составных ядер ^{230}Th , $^{231,236}\text{U}$, ^{240}Pu , ^{255}Es , $^{256,258}\text{Fm}$, образованных в реакциях с тепловыми нейтронами, и наших данных для ядер $^{239,240}\text{Pu}$, образованных в реакциях с α частицами различных энергий.

Сравнение теоретического описания с использованием пяти гауссианов и предлагаемого в настоящей работе показало, что степень согласия с экспериментальными данными приблизительно одинакова (ошибка лежит в пределах статистической погрешности). Однако, необходимо отметить, что предлагаемое выражение для описания массовых распределений осколков деления строилось на некоторых предположениях о процессах, происходящих в делящемся ядре и влияющих на формирование массовых распределений осколков, имеет вдвое меньшее число варьируемых параметров и хорошее согласие с экспериментальными данными, полученное при этом, свидетельствует о применимости данного метода к описанию массовых распределений осколков деления тяжелых ядер.

В той же главе предлагается феноменологическое описание независимых выходов осколков деления актинидных ядер. В настоящее время делаются попытки систематизации этих распределений

с помощью эмпирических соотношений. Основными недостатками таких работ является то, что с помощью эмпирических соотношений описываются в основном одномерные распределения осколков по массам, зарядам или числу нейтронов.

Для описания независимых выходов легкой или тяжелой групп осколков деления в настоящей работе предлагается использовать двумерное распределение Гаусса:

$$Y(Z, N) = \frac{1 + G}{2\pi\sigma_Z\sigma_N\sqrt{1 - \rho^2}} \exp\left[-\frac{Q_{L,H}}{2(1 - \rho^2)}\right], \quad (9)$$

где

$$Q_{L,H} = \frac{(Z - Z_{L,H})^2}{\sigma_Z^2} - \frac{2\rho(Z - Z_{L,H})(N - N_{L,H})}{\sigma_Z\sigma_N} + \frac{(N - N_{L,H})^2}{\sigma_N^2}. \quad (10)$$

Здесь Z, N - число протонов и нейтронов осколка деления, $Z_{L,H}, N_{L,H}$ - наиболее вероятные значения Z и N для легкой и тяжелой групп соответственно, σ_Z, σ_N - дисперсия распределений по Z и N , ρ - коэффициент корреляции, $G = (-1)^Z(1 - \rho^2)$ - параметр, учитывающий эффект спаривания.

В работе показано, что распределение осколков асимметричного деления ^{235}U по заряду и числу нейтронов хорошо описывается предлагаемым соотношением.

В заключении излагаются основные результаты, полученные в диссертации, которые можно суммировать следующим образом:

1. Созданы экспериментальные методики для измерения угловых, массовых и энергетических распределений осколков деления тяжелых ядер:
 - (а) для измерения дифференциальных сечений упругого рассеяния α -частиц и получения характеристик процесса деления актинидных ядер при энергиях до 27,2 МэВ на циклотроне У-120;
 - (б) для измерения дифференциальных сечений упругого рассеяния α -частиц и получения характеристик процесса деления актинидных ядер в интервале энергий 40 - 100 МэВ на циклотроне У-240;

- (с) для исследования характеристик вынужденного деления актиноидных ядер методом полупроводниковой γ -спектроскопии.
2. Впервые получены следующие экспериментальные данные:
- (а) полные сечения деления при взаимодействии α -частиц в интервале энергий 20 - 80 МэВ с ядрами ^{232}Th , ^{235}U и ^{238}U ;
 - (б) угловые распределения осколков деления при взаимодействии α -частиц в интервале энергий 40 - 80 МэВ с ядрами ^{235}U и ^{238}U ;
 - (с) угловые распределения осколков деления при взаимодействии ионов ^3He в интервале энергий 40 - 60 МэВ с ядрами ^{235}U и ^{238}U ;
 - (д) массовые распределения осколков деления ядер ^{235}U и ^{238}U α -частицами в интервале энергий 20 - 80 МэВ;
 - (е) кумулятивные выходы изотопов ^{91}Y , ^{97}Nb , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{105}Rh , ^{112}Ag , ^{115}Cd , ^{126}Sb , ^{127}Sb , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{132}Te , ^{135}Xe , ^{140}La , ^{143}Ce при делении ^{232}Th α -частицами с энергией 27,2 МэВ и ^{237}Np дейтронами с энергией 13,6 МэВ;
 - (ф) анизотропия выделенных изотопов ^{105}Rh , ^{112}Ag , ^{115}Cd , ^{131}I , ^{132}Te , ^{133}I , ^{143}Ce при делении ^{232}Th α -частицами с энергией 27,2 МэВ и ^{237}Np дейтронами с энергией 13,6 МэВ;
3. Проведен анализ полных сечений деления ядер ^{232}Th , ^{235}U и ^{238}U α -частицами в интервале энергий 20 - 140 МэВ по оптической модели (ОМ) и в приближении параболического барьера (ПБ). Получена информация о вкладе неупругих процессов в полное сечение реакций при взаимодействии α -частиц с тяжелыми ядрами в этом интервале энергий. Показано, что в области энергий α -частиц ниже кулоновского барьера ($E_\alpha < 23$ МэВ) неупругие процессы не приводят к делению, поскольку энергия возбуждения ядра в этих реакциях не превышает высоты барьера деления, но приводят к повышению сечения

сечений образования составного ядра, вычисляемых по оптической модели. При более высоких энергиях налетающих частиц ($E_\alpha > 60$ МэВ) вклад делений после неупругих процессов становится уже существенным и может исказить извлекаемую из анализа экспериментальных данных информацию о характеристиках процесса деления. Таким образом, для корректного описания получаемых данных при средних энергиях возбуждения необходимо учитывать механизмы процессов, предшествующих образованию делящегося ядра.

4. Проведен анализ угловых распределений осколков деления ядер ^{236}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu и ^{243}Cm , образованных в реакциях с α -частицами и ионами ^3He , в интервале энергий возбуждения до 140 МэВ. Учет вклада неупругих процессов во входном канале позволил корректно получить в этом интервале энергетическую зависимость дисперсии К-состояний (K_0^2) в седловой точке. Показано, что в интервале энергий возбуждения (40 - 45 МэВ) происходит значительное уменьшение влияния оболочечных эффектов и седловая форма делящегося ядра постепенно сдвигается от формы, соответствующей второму барьеру деления, к жидкокапельной седловой форме, что подтверждает выводы, сделанные в ряде теоретических работ, и локализует интервал энергий, где этот переход происходит.
5. Проведен анализ массовых распределений осколков деления ядер ^{235}U и ^{236}U α -частицами в интервале энергий возбуждения 20 - 80 МэВ. Получена энергетическая зависимость отношения выходов осколков и разницы в высоте барьеров для симметричного и асимметричного способов деления. Показано, что различие в величине барьеров деления коррелирует с изменением влияния оболочечных эффектов на основании чего делается вывод о существовании, по крайней мере, двух указанных мод деления во всем исследованном интервале энергий возбуждения.
6. Проведен анализ кумулятивных выходов и угловой анизотропии ряда выделенных продуктов деления ядер ^{236}U и ^{239}Pu , образованных в реакциях с α -частицами и дейтронами при

близких энергиях возбуждения. Наблюдается хорошее согласие этих данных, полученных методом полупроводниковой γ -спектроскопии, с экспериментальными данными, полученными другими методами. Показано, что угловая анизотропия для осколков, соответствующих симметричному и асимметричному способам деления, в пределах ошибок измерений одинакова.

7. Предложен новый подход к анализу массовых распределений осколков с учетом полного углового момента делящегося ядра. В рамках предложенного метода проведен анализ массовых распределений осколков деления ядер ^{236}U , ^{239}Pu и ^{240}Pu , образованных в реакциях с различными легкими частицами при близких энергиях возбуждения. Показано, что на процесс формирования и разделения осколков существенное влияние оказывает не только температура, но и полный угловой момент делящегося ядра, что должно способствовать развитию наших представлений о динамике процесса деления.
8. Предложено новое кваифеноменологическое описание массовых распределений осколков деления с учетом кластерной структуры ядер. Данный подход позволил хорошо воспроизвести форму массовых распределений осколков спонтанного деления и тепловыми нейтронами для 15 актинидных ядер в интервале от ^{229}Th до ^{258}Fm , для ^{240}Pu в интервале энергий α -частиц 20 - 80 МэВ, что открывает новое направление в систематизации экспериментальных данных и установлении закономерностей изменения массовых распределений осколков в зависимости от характеристик делящегося ядра.
9. Предложено новое феноменологическое описание независимых выходов осколков деления актинидных ядер на основании двумерного гауссовского распределения. Данный метод позволил воспроизвести с высокой точностью форму изотопных распределений осколков в интервале $Z 31 + 43$ и $52 + 56$ при делении ^{235}U тепловыми нейтронами, что открывает новое направление в исследовании многомерных распределений осколков деления ядер.

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

1. Зайка Н.И., Кибкало Ю.В., Мохнач А.В., Немец О.Ф., Семенов В.С., Токарев В.П., Шмарин П.Л. Упругое рассеяние α -частиц с энергией 19 - 27 МэВ на актинидных ядрах. ЯФ, 1979, Т.29, С.1449-1452.

2. Кибкало Ю.Р. Полные сечения реакций при взаимодействии вращающихся частиц с ядрами. УФЖ, 1980, Т.25, С.1574-1575.

3. Зайка Н.И., Кибкало Ю.В., Мохнач А.В., Семенов В.С., Токарев В.П., Шмарин П.Л. Энергетическая зависимость анизотропии при делении актинидных ядер α -частицами с энергией 19 - 27 МэВ. ЯФ, 1980, Т.21, С.43-46.

4. Зайка Н.И., Кибкало Ю.В. Деление актинидных ядер при средних энергиях возбуждения. ЯФ, 1982, Т.35, С.583-590.

5. Зайка Н.И., Кибкало Ю.В., Токарев В.П. Деление актинидных ядер α -частицами энергий 20 - 100 МэВ. ЭЧАЯ, 1983, Т.42, С.189-193.

6. Зайка Н.И., Кибкало Ю.В., Токарев В.П., Шитюк В.А. Энергетическая зависимость анизотропии осколков деления и K_0^2 некоторых актинидных ядер. В кн. Нейтронная физика, М., ЦНИИ Атоминформ, 1984, Т.1, С.309-313.

7. Зайка Н.И., Кибкало Ю.В., Токарев В.П., Иткин М.Г., Камнев И.А., Мульгин С.И., Окслович В.Н., Игнатюк А.Р., Смиренин Г.Н. Эффект углового момента в делении доактинидных ядер. В кн. Нейтронная физика, М., ЦНИИ Атоминформ, 1984, Т.2, С.31-36.

8. Зайка Н.И., Кибкало Ю.В., Токарев В.П., Шитюк В.А. Учет параметров входного канала и смещенного деления при анализе данных по делению актинидных ядер ($E_\alpha \leq 100$ МэВ). ЯФ, 1984, Т.39, С.548-555.

9. Зайка Н.И., Кибкало Ю.В., Токарев В.П. Дисперсии распределений проекций углового момента при взаимодействии ядер с α -частицами. ЯФ, 1985, Т.41, С.1454-1459.

10. Зайка Н.И., Кибкало Ю.В., Токарев В.П., Шитюк В.А. Особенности массовых и энергетических распределений осколков при делении ^{235}U и ^{236}U α -частицами средних энергий (< 80 МэВ). ЯФ. 1985. Т.42. С.304-311.

11. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Токарев В.П., Шитюк В.А., Грубинцев Е.Н., Иткис М.Г., Мульгин С.И., Околович В.Н., Русанов А.Л., Толстиков В.Н. Энергетическая зависимость характеристик деления актинидных ядер ионами ^3He энергий 40 - 60 МэВ. УФЖ, 1988, Т.33, С.809-813.

12. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Парлаг О.А., Сикора Д.И., Токарев В.П., Шитюк В.А. Массовые и энергетические распределения осколков деления ядер ^{232}Th α -частицами с энергиями 21 - 26.4 МэВ. УФЖ. 1989. Т.34. С.493-498.

13. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Лендел А.И., Парлаг О.А., Сикора Д.И., Шитюк В.А. О возможностях и точности измерений характеристик продуктов деления ядер методом полупроводниковой γ -спектроскопии. Вопросы точности γ ядерной спектроскопии, 1990, Вильнюс, с.143-148.

14. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Лендел А.И., Парлаг О.А., Сикора Д.И., Шитюк В.А. Кумулятивные выходы осколков при делении ^{232}Th α -частицами с энергией 27,2 МэВ. УФЖ. 1992. Т.37. С.327-329.

15. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Лендел А.И., Парлаг О.А., Сикора Д.И., Токарев В.П., Шитюк В.А. О возможности и точности определения угловых распределений осколков деления выделенных масс методом полупроводниковой гамма-спектроскопии. Измерительная техника. 1993. №1. С.59-61.

16. Заика М.И., Кибкало Ю.В., Лендел О.И., Парлаг О.О., Сикора Д.И., Токарев В.П., Шитюк В.А. Кутові розподіли уламків виділених мас при поділі ^{236}U та ^{239}Pu . УФЖ, 1994, Т.39, С.35-37.

17. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Токарев В.П., Шитюк В.А., Шмарин П.Л. Взаимодействие α -частиц энергий 80 и 100 МэВ с ядрами ^{235}U и ^{236}U . Препринт КИЯИ-82-13, Киев, 1982, С.4-7.

18. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Токарев В.П., Шитюк В.А. Исследование деления актинидных ядер α -частицами с энергией 40-80 МэВ. Препринт КИЯИ-83-12, Киев, 1983, С.6-14.

19. Кибкало Ю.В. Феноменологическое описание независимых выходов осколков при делении ^{235}U тепловыми нейтронами. Препринт КИЯИ-87-27, Киев, 1987.

20. Zaika N.I., Kibkalo Yu.V., Tokarev V.P. The peculiarities of actinide nucleus fission at < 150 MeV excitation. Int. Conf. "Fiftieth

anniversary of nuclear fission", Leningrad, USSR, 1989, P.69-70.

21. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Лендел А.И., Парлаг О.А., Сикора Д.И., Токарев В.П. Исследование массовых и угловых распределений осколков вынужденного деления актинидных ядер методом полупроводниковой γ -спектроскопии. Сб.: Доповіді ювілейної конференції ІЕФ-93, присвяченої 75-річчю Академії наук України. Ужгород. 1993. С.196-199.

22. Заика Н.И., Кибкало Ю.В., Токарев В.П., Лендел А.И., Парлаг О.А., Сикора Д.И. Угловой момент и массовые распределения осколков деления ядер. Сб.: Доповіді ювілейної конференції ІЕФ-93, присвяченої 75-річчю Академії наук України. Ужгород. 1993. С.192-195.

23. Кибкало Ю.В., Устинов А.И. Квазифеноменологическое описание массовых распределений осколков деления ядер. Сб.: Доповіді ювілейної конференції ІЕФ-93, присвяченої 75-річчю Академії наук України. Ужгород. 1993. С.200-203.

24. Kibkalo Yu.V., Ustinov A.I. New approach to parametrization of fission fragment mass distribution. Collective Nuclear Dynamics, The fourth KINR international school on nuclear physics, Kiev, 1994, P.415-419.

25. Zaika N.I., Kibkalo Yu.V., Tokarev V.P. Actinide nuclei fission at medium excitation energies. Collective Nuclear Dynamics, The fourth KINR international school on nuclear physics, Kiev, 1994, P.399-404.

Кібкало Ю.В. Прояв оболонкових ефектів в експериментальних характеристиках процесу поділу ядер.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук із спеціальності 01.04.16 - фізика ядра та елементарних частинок, Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, 1995.

Захищається 25 наукових робіт, які містять результати експериментальних досліджень інтегральних та диференціальних перерізів, а також масові розподіли уламків поділу деяких актинідних ядер в інтервалі енергій збудження до 100 МеВ. Встановлено, що в інтервалі енергій збудження 40 - 45 МеВ відбувається значне зменшення впливу оболонкових ефектів і процес поділу актинідних ядер при вищих енергіях визначається рідиннокрапельним бар'єром. Запропоновано новий підхід до аналізу масових розподілів уламків поділу з урахуванням повного кутового моменту ядра. Запропоновано нові феноменологічні підходи до опису масових та зарядових розподілів уламків поділу ядер.

Kibkalo Yu.V. Display of shell effects in the experimental characteristics of nuclear fission process.

Thesis for doctor of science in physics and mathematics on speciality 01.04.16 - physics of nucleus and elementary particles, Institute for Nuclear Research of the Ukrainian National Academy of Sciences, Kiev, 1995.

25 scientific works are defended where there are given results of the experimental investigations of integral and differential cross sections and fragment mass distributions for fission of some actinide nuclei in energy interval up to 100 MeV. It is shown that the shell effects influence decreased in the excitation energy interval 40 - 45 MeV and fission process is defined by the liquid drop barrier at more large excitation energy. A new approach is proposed for analysis of fission fragment mass distributions accounting for total angular momentum of fission nucleus. New phenomenological approaches for description of fragment mass and charge distributions are proposed.

Ключові слова: поділ ядер, перерізи поділу, розподіли уламків поділу, оболонкові ефекти, бар'єри поділу, кутовий момент, заряджені частинки, актинідні ядра.

КИБКАЛО Юрий Васильевич

ПРОЯВЛЕНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭФФЕКТОВ В
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ
ПРОЦЕССА ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

(Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук)

Подписано в печать: 13.02.95. Формат 60×90/16. Бум. офс. Офс. печ.
Усл. печ. л. 2,0 Тираж 100 экз. Заказ 13

СКТБ с ЭИ Института ядерных исследований НАН Украины
252028, Киев-28, проспект Науки, 47.

AB 31.961

AB 31.961