

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-2002-275

На правах рукописи
УДК 593.173

ПОКРОВСКИЙ
Игорь Владимирович

**МУЛЬТИМОДАЛЬНАЯ ПРИРОДА
ДЕЛЕНИЯ НАГРЕТЫХ ЯДЕР**

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

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

Дубна 2002

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флёрова
Объединённого института ядерных исследований, Дубна

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
профессор

М.Г. Иткис

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

Ю.П. Гангрский

доктор физико-математических наук

А.А. Говердовский

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 2003 года в
" ____ " часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.06
при Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка и
Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флёрова Объединённого
института ядерных исследований по адресу:
141980, г. Дубна, Московская обл., Объединённый институт
ядерных исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 2002 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета:



Попеко А.Г.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Изучение мультимодальной природы деления ядер является важной и интересной областью современных исследований в ядерной физике. Интерес к этой области вызван необходимостью понимания природы формирования массово-энергетических распределений (МЭР) осколков деления, зачастую оказывающихся суперпозицией МЭР двух или более взаимно-независимых процессов. Попытка разделить и количественно описать вышеуказанные процессы даёт возможность понимания влияния ядерных структур на саму природу деления ядра. Фактически одновременно с открытием самой реакции ядерного деления было установлено, что при низких энергиях возбуждения тяжёлые ядра-актиниды в диапазоне масс с $A \sim 230-256$ делятся преимущественно на две неравные части (с соотношением масс образующихся осколков примерно 3:2). За прошедшие годы было выяснено, что происхождение асимметрии деления связано с оболочечным строением делящегося ядра и ядер-осколков. Большой объём экспериментальных данных сформировал абсолютно чёткую картину зависимостей массовых и энергетических распределений осколков деления от энергии возбуждения и нуклонного состава, и был решён вопрос о перестройке оболочечной структуры ядра с увеличением энергии, завершающейся асимптотическим переходом ядра к состоянию, описываемому капельной моделью, что наилучшим образом демонстрирует трансформация двугорбой кривой массового распределения осколков в одnogорбое симметричное распределение с ростом начальной энергии возбуждения делящегося ядра. Однако, следует заметить, что если для сверхтяжёлых ядер симметричное деление обуславливается оболочечными эффектами, то для лёгких – преобладанием макроскопической, капельной составляющей в потенциальной энергии. В то же время, если утверждение об

универсальности и преобладании симметричного типа деления сильно нагретых ядер не имеет исключений, то утверждение об асимметрии деления холодных ядер справедливо лишь в ограниченной области трансактинидных ядер. Так, слева и справа от этой области массовые распределения осколков деления достаточно холодных ядер становятся преимущественно симметричными. Первым теоретическим обоснованием возможности асимметричного деления ядер в области Pb явились расчёты В.В. Пашкевича, где потенциальная энергия деформации рассчитывалась на основе оболочечной поправки. Эти расчёты предсказали не только возможность асимметричного деления таких ядер, но и явились первым теоретическим указанием на существование долинной структуры поверхности потенциальной энергии вдоль координаты масс-асимметричной деформации. Такой подход к описанию МЭР осколков получил название концепции специфических мод деления. Как в экспериментальных, так и в теоретических работах выделяют 4 основные моды. В терминологии Бронзы это: *super long* – симметричная долина S , “дно” которой всегда лежит на $A_{CN}/2$; *standard I* – долина деления, обусловленная влиянием сферической оболочки в тяжёлом осколке со средней массой 132-134 (Z и N близки к магическим числам 50 и 82 соответственно); *standard II* – долина, связанная с формированием в тяжёлом осколке деформированной оболочки вокруг $A \approx 140$ ($Z \approx 54-56$, $N \approx 86$); *super short* – мода, проявляющаяся только тогда, когда одновременно лёгкие и тяжёлые осколки близки по нуклонному составу к дважды магическим ядрам.

Для детального понимания механизма деления и процесса формирования осколков необходимы обширные и точные экспериментальные данные о зависимостях МЭР осколков от энергии возбуждения, нуклонного состава и углового момента, а также о зависимостях испускаемых нейтронов и γ -квантов от массы и энергии осколков, т. к. именно в этих зависимостях заложена косвенная информация об изучаемых свойствах ядерного вещества в предельно

деформированном состоянии. Использование лёгких заряженных частиц не даёт возможностей для изучения области ядер с $213 < A < 225$ вследствие отсутствия пригодных для экспериментального исследования ядер-мишеней с $Z = 84 - 87$ ввиду их нестабильности. При этом именно в этой области ядер должен происходить переход от преимущественно симметричного к преимущественно асимметричному делению с утяжелением ядер и ожидаются значительные изменения в свойствах деления, вызываемые небольшими изменениями в нуклонном составе и энергии возбуждения. Переход от масс-симметричного к масс-асимметричному делению вследствие изменения барьера деления и времени спуска делящегося ядра с седла до точки разрыва для разных делительных мод может оказывать существенное влияние как на распределения масс, энергий и зарядов образующихся осколков, так и на пре-, пост-делительные множественности испускаемых при этом нейтронов, а также на множественность и энергию образующихся γ -квантов. Единственной возможностью экспериментальной проверки вышуканных положений является использование реакций с тяжёлыми ионами.

Основной целью работы является исследование мультимодальной природы деления ядер, что включает в себя:

— Разработку экспериментальной методики, позволяющей регистрировать продукты реакций взаимодействия тяжёлых ионов с ядрами с хорошим массовым, энергетическим и позиционным разрешением и высокой эффективностью с одновременной регистрацией эмиссии нейтронов и γ -квантов в совпадении с осколочноподобными продуктами исследуемых реакций.

— Применение разработанной методики для проведения экспериментов по изучению характеристик деления тяжёлых ядер ($Z^2/A > 32$), образованных в реакциях с тяжёлыми ионами.

— Разработку методики обработки и анализа экспериментальных данных и её применение для получения физической информации о конкурирующих модах деления.

Научная новизна и практическая ценность работы:

Создана высокоэффективная система регистрации осколочноподобных продуктов ядерной реакции на основе микроканальных пластин, обладающая высоким временным и позиционным разрешением. Созданная на основе время-пролётной методики система регистрации осколочноподобных продуктов реакции может быть использована для решения широкого класса задач, связанных с изучением массово-энергетических распределений (МЭР). В частности, помимо ФЛЯР ОИЯИ, система использовалась в Южной Национальной Лаборатории и в Национальной Лаборатории Леньяро Национального Института Ядерной Физики Италии, в Центре Ядерных Исследований (Страсбург, Франция) и в Ускорительной Лаборатории Университета г. Ювяскюля (Финляндия) для изучения различных аспектов процесса деления ядер, образованных в реакциях с ионами от p до ^{86}Kr .

Разработанная методика обработки данных может быть использована в аналогичных экспериментах

С использованием созданной системы регистрации и на основе разработанной методики обработки данных впервые изучены характеристики деления ядер в переходной области $Ra - Th$.

Полученные в результате анализа экспериментальных данных количественные оценки выхода асимметричного деления в зависимости от нуклонного состава и энергии возбуждения делящегося ядра могут быть использованы при подготовке и планировании экспериментов, посвящённых решению подобного рода задач.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Разработка и применение экспериментальной методики регистрации осколочноподобных продуктов ядерных реакций, а также эмиссии нейтронов и γ -квантов, сопровождающей процесс деления.

2. Разработка и применение методики обработки и анализа экспериментальных данных.

3. Результаты исследований массово-энергетических распределений (МЭР) осколков деления ядра ^{226}Th , а именно обнаружение в делении данного ядра четырёх независимых делительных мод.

4. Результаты исследований эмиссии нейтронов и γ -квантов, сопровождающей деление составного ядра ^{226}Th , свидетельствующие о зависимости характеристик указанных процессов от способа деления ядра.

5. Результаты исследований сечений деления и МЭР осколков деления ядер $^{216,218,220}\text{Ra}$ и ^{221}Ac , образованных в реакциях с ионами ^{12}C , позволившие установить зависимость выхода асимметричной компоненты от энергии возбуждения и нуклонного состава делящегося ядра.

Апробация работы и публикации:

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на семинарах ЛЯР ОИЯИ, а также на следующих конференциях и совещаниях: 15-я и 16-я конференции Европейского Физического Общества (Ст.-Петербург, Россия, 17-23 апреля 1995 г. и Падова, Италия, 21 марта- 4апреля 1998 г.), 3-й международный симпозиум по ядерной физике (Тур, Франция, 2-5 сентября 1997 г.), 4-я и 5-я международные конференции по динамическим аспектам ядерного деления (Часта-Паперничка, Словакия, 19-23 октября, 1998 г. и 2001 г.), VII Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов «Ядерные оболочки – 50 лет» (Дубна, 21-24 апреля, 1999 г.).

Материалы, вошедшие в диссертацию, достаточно полно опубликованы в 12-ти печатных работах, приведенных в конце реферата.

Объём и структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, истории вопроса, трёх глав и заключения. Диссертация содержит 150 страниц машинописного текста, включающих в себя 3 таблицы, 66 рисунков и список литературы из 167 наименований.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Во введении определена актуальность и значимость изучаемых в работе проблем. Описана цель работы, её основные результаты, а также их научная и практическая ценность. Представлена информация о структуре диссертации, апробации работы, а также основные публикации, составившие содержание диссертации.

В истории вопроса дан краткий обзор предшествующих результатов исследования мультимодальности процесса деления, а также представлено теоретическое обоснование изучаемой проблемы. Там же описаны преимущества и недостатки выбранного в работе метода исследования – взаимодействия тяжёлых ионов с ядрами.

В первой главе описана применённая для измерений методика кинематических совпадений, основанная на время-пролётной методике (так называемые $2V$ - эксперименты). Приведено краткое описание и даны основные характеристики время-пролётного спектрометра на основе газовых счётчиков DEMAS, использовавшегося в первых сериях экспериментов. Анализ полученных результатов показал необходимость более глубокого изучения эмиссии нейтронов, сопровождающей исследуемый процесс деления. Такая возможность предоставляется при исследовании нейтронной эмиссии с перекрытием полного телесного угла (4π -геометрия). Однако, использование 4π -геометрии предъявляет

требования минимально возможного количества материала на пути нейтрона от мишени до регистрирующего его детектора во избежание возможных перерассеяний. Таким образом, часть экспериментальной установки, регистрирующая осколки деления, должна иметь минимально возможные размеры при минимальном количестве материала, необходимого для её изготовления. В то же время уменьшение габаритных размеров время-пролётного спектрометра ведёт к уменьшению его пролётной базы, что выражается в ухудшении его временного, а следовательно и массового, и энергетического разрешений. В связи с этим для дальнейших экспериментов был создан время-пролётный спектрометр на основе микроканальных пластин (МКП) CORSET.

Приведено детальное описание работы детектора на основе МКП и подробно описаны конструкции стартового и позиционно-чувствительного стопового детекторов временной отметки, а также показаны варианты их размещения в реакционной камере, конструкция и особенности которой также приведены в деталях. Описаны основные принципы нейтронной и γ -спектрометрии, а также конструкция, основные характеристики и способы калибровки модульного нейтронного детектора DEMON (DEtecteur MOdulaire de Neutrons) на основе жидкого сцинтиллятора NE213, использовавшегося для исследования нейтронной множественности и детектора на основе кристалла NaI, использовавшегося для исследования сопровождающей процесс деления эмиссии γ -квантов.

Приведена схема системы сбора данных, созданная на основе блоков стандарта КАМАК и компьютеров IBM PC, а также описан принцип её работы. Созданная система сбора данных является достаточно гибкой в плане использования различных программно-аппаратных средств, что очень важно в корреляционных экспериментах, когда количество измеряемых в эксперименте параметров может существенно изменяться.

Вторая глава посвящена методике обработки экспериментальных данных. Описаны методы улучшения временного разрешения спектрометра в режиме off-line и приведена конечная формула перевода получаемого в ходе эксперимента электронного номера канала во время пролёта, учитывающая все вводимые поправки:

$$T_{ns} = a(N_i) \{N_{ch} - T_0 + N_{drf}\} f(x) A_{ch} + \Delta T + b_i, \quad \text{где:}$$

a – электронный коэффициент перевода номера канала в измерянное время, в общем случае зависящий от номера канала;

N_{ch} – номер электронного канала для данного события;

T_0 – значение параметра «электронного нуля» для того же события;

N_{drf} – поправка на «электронный дрейф» для данной группы событий;

$f(x)$ – функция зависимости времени пролёта от амплитуды сигнала;

A_{ch} – значение амплитуды временного сигнала в каналах;

ΔT_j – временная поправка на распространение сигнала по поверхности МКП для конкретной j -й области МКП;

b_i – константа, определяемая калибровкой каждого из i детекторов.

Описан алгоритм пособытийного перевода измеряемых в эксперименте параметров в физические величины, а также методы и результаты калибровки спектрометра.

Третья глава посвящена анализу и обсуждению полученных экспериментальных результатов.

В первом разделе третьей главы описано исследование характеристик деления изотопов Th . Эксперименты были проведены на пучках ^{18}O , выводимых из тандемных ускорителей TANDEM в LNS (Катанья, Италия) и VIVITRON в CRN (Страсбург, Франция). В первом случае в качестве детектирующей системы использовался время-пролётный спектрометр DEMAS-3, во втором – спектрометр CORSET. Показано, что МЭР осколков деления компаунд-ядра ^{226}Th , образованного в реакции $^{18}O + ^{208}Pb$ при энергии налетающего иона $E_{lab} = 78$ МэВ, измеренные в двух экспериментах, достаточно хорошо согласуются между собой. Незначительные отличия в данных

объясняются, по-видимому, сложностью корректного учета энергетических потерь в мишени и стартовом детекторе.

В этом же разделе приведена математическая модель описания МЭР осколков деления. При анализе использовались следующие предположения:

- МЭР осколков деления указанных ядер состоят из 3-х независимых мод: одной симметричной и двух асимметричных.

- Зависимость средней полной кинетической энергии от массы осколка для каждой моды и отношение квадрата средней полной кинетической энергии к дисперсии кинетической энергии для каждой моды могут быть представлены в виде:

$$\bar{E}_k(M) = \bar{E}_k(A/2)(1 - \mu^2)(1 + \alpha\mu^2), \quad \bar{E}_k^2(M) / \sigma_E^2(M) = const, \quad (1)$$

где $\mu = 1 - 2M/A$, а параметр α характеризует степень отклонения $\bar{E}_k(M)$ от параболической зависимости.

- Распределение полной кинетической энергии осколков с фиксированной массой для каждой моды может быть описано функцией Шарли:

$$f(E_k) = \frac{1}{\sigma_E} \left[\varphi(u) - \frac{\gamma_1}{6} \varphi^{III}(u) + \frac{\gamma_2}{24} \varphi^{IV}(u) \right], \quad (2)$$

где $u = \frac{E_k - \bar{E}_k}{\sigma_E}$, $\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-u^2/2)$,

$$\gamma_1(M) = \langle (E_k - \bar{E}_k(M))^3 \rangle / \sigma_E^3 - \text{коэффициент асимметрии,}$$

$$\gamma_2(M) = \langle (E_k - \bar{E}_k(M))^4 \rangle / \sigma_E^4 - 3 - \text{коэффициент эксцесса,}$$

характеризующие степень отклонения распределения от Гауссовой формы. При $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ распределение Шарли тождественно переходит в нормальное распределение. Вид соотношений (1) и (2) установлен на основе анализа большой совокупности экспериментальных данных о делении ядер в диапазоне от ^{186}Os до ^{235}U .

Вышеописанный метод разложения на компоненты был использован для анализа МЭР осколков деления ^{226}Th , полученных в двух независимых экспериментах. Результаты разложения МР представлены на рисунке 1 для обоих измерений.

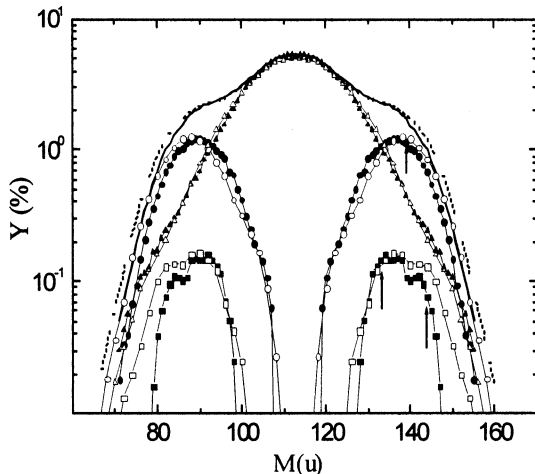


Рис. 1. Сравнение экспериментальных выходов масс $Y(M)$, измеренных в Страсбурге (толстая сплошная кривая) с измеренной в Катанье (штриховая кривая). Также сравниваются выходы отдельных мод деления (зачерненные значки – Страсбург, открытые значки – Катанья).

Видно, что для моды стандарт I вместо узкого симметричного распределения $Y_1(M)$ со средней массой $M \approx 133$ мы в обоих случаях получили широкое, несимметричное и двугорбое распределение с $M \approx 137$. Такое поведение стандарта I, по-видимому, вызвано не погрешностями эксперимента, а особенностями деления ядра ^{226}Th , а именно проявлением делительной моды стандарт III. В отличие от (S1) и (S2), эта мода обусловлена оболочечными эффектами не в тяжёлом осколке, а околосферической нейтронной оболочкой $N \approx 50$ в лёгком осколке. Экстраполяция положения средней массы и числа нейтронов моды S3 из области актинидных ядер к ^{226}Th даёт значения массы тяжёлого осколка $m \approx 144$ и число нейтронов в лёгком осколке $N_L \approx 49,3$. Ожидаемые из вышеописанных соображений положения пиков для мод (S1 – 133), (S2 – 139) и (S3 – 144) показаны на рис. 1 стрелками. Как видно из рисунка, эти значения близки к полученным в результате данного анализа максимумам в выходах

соответствующих мод, что позволяет сделать вывод о существенной роли моды S3 в формировании МЭР осколков ^{226}Th .

В этом же разделе приведены результаты исследования эмиссии γ -квантов из осколков деления ^{226}Th . На рисунке 2 показаны наиболее характерные МЭР осколков (зачернённые значки), измеренные при энергии налетающего иона $E_{\text{lab}} = 78 \text{ МэВ}$, что соответствует начальной энергии возбуждения $E^* = 26 \text{ МэВ}$, и $E_{\text{lab}} = 144 \text{ МэВ}$ ($E^* = 87 \text{ МэВ}$). Видно, что для энергии $E_{\text{lab}} = 144 \text{ МэВ}$ форма МР близка к гауссовской, а зависимости полной кинетической энергии осколков деления (E_k) и её дисперсии ($\sigma_{E_k}^2$) от массы – гладкие параболические, что свидетельствуют о практически полном затухании оболочечных эффектов и МЭР осколков в этом случае содержат только одну S-моду деления. Зависимости множественности испускаемых γ -квантов (M_γ) и их относительной энергии (E_γ) от массы осколка показаны в нижней части рис. 2. Видно, что для меньшей энергии зависимость $M_\gamma(M)$ достаточно сильно отличается от той же для более высокой энергии не только абсолютной величиной $\langle M_\gamma \rangle$, что обусловлено увеличением температуры T и углового момента l

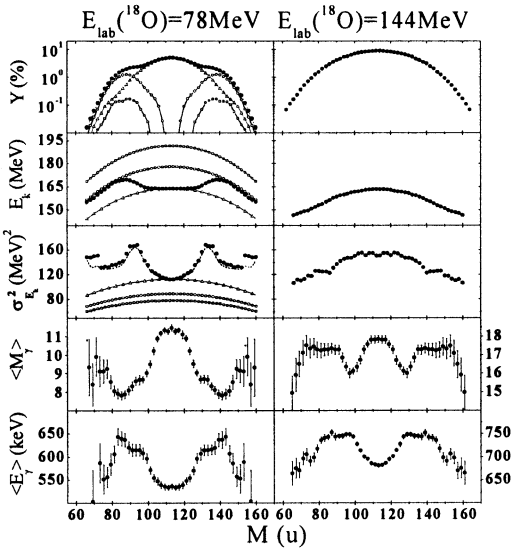


Рис. 2. *Сверху-вниз:*

Экспериментальные МЭР осколков для энергий $E_{\text{lab}} = 78$ и $E_{\text{lab}} = 144 \text{ МэВ}$.

Множественность γ -квантов M_γ и их относительная энергия E_γ как функции массы осколка

делящегося ядра, но и, главное, структурными особенностями. Так, в ней чётко выделяются три области масс. Первая – симметричное деление с $M = A/2 \pm 8$ с повышенной $\langle M_\gamma \rangle \cong 11,4$, вторая – провал с минимумом при $M_H \sim 129$, и третья – более глубокий минимум для масс вокруг $M_H \cong 140$ с $\langle M_\gamma \rangle \cong 8$. Для энергии $E_{lab} = 144$ МэВ свойства МЭР осколков соответствует жидкокапельному приближению без каких-либо структурных оболочечных проявлений, однако в зависимости $M_\gamma(M)$ всё равно наблюдается провал с минимумом для масс $M_H \sim 129$, а глубокий минимум при $M_H \cong 140$ исчезает. В зависимостях $E_\gamma(M)$ наблюдается обратная картина.

Отметим, что экспериментально измеренная M_γ соответствует суммарному эффекту как от первичных осколков, если они уже имеют структуру возбуждённых состояний, близкую к конечным (асимметричные моды), так и от самих конечных осколков с их внутренней квазичастичной и ротационной степенями свободы, даже если эти осколки имеют один и тот же нуклонный состав. Для энергии $E_{lab} = 144$ МэВ любые осколки в точке разрыва сильно нагреты и деформированы, их внутренняя структура не существенна и поэтому в зависимости $M_\gamma(M)$ провалы при $M_H \sim 129$ (и им ответных) можно связать с околomagической структурой конечных осколков ($Z_H \sim 50$, $N_H \sim 80$ и $N_L \sim 50$). Для всех других масс осколков структуры не наблюдается, так как их нуклонный состав далёк от магических чисел. Для энергии $E_{lab} = 78$ МэВ при $M_H \sim 129$ тоже проявляется эффект конечных осколков. А вот происхождение глубокого минимума при $M_H \sim 139$ мы связываем с проявлением околосферической формы первичного тяжёлого осколка в точке разрыва. Аргументом в пользу такого предположения является ещё и то, что при делении ^{226}Th доминирующей асимметричной модой является S2 (рис. 1) и она имеет максимальный выход как раз на массах $M_H \sim 139$, что отвечает дну долины в потенциальной энергии для этой моды.

В этом же разделе приведены результаты исследования нейтронной эмиссии, сопровождающей деление ^{226}Th . Для описания полученных в ходе эксперимента нейтронных спектров нами использовался так называемый фит трёх источников, испускающих нейтроны: компаунд-ядро, движущееся со скоростью центра масс, и два полностью ускоренных осколка, движущиеся с измеренными скоростями \bar{v}_1 и \bar{v}_2 . Предполагалось, что нейтроны из этих источников испускаются изотропно (в системе центра масс данного источника) и последовательно в соответствии с распределением Максвелла. Для получения зависимости нейтронной множественности от масс-асимметрии осколков весь набор данных был разбит на три части, одна из которых соответствовала симметричному делению, а две других – асимметричному. Численные результаты, полученные как следствие применения разбиений, представлены в таблице:

Таблица. *Параметры мультипараметрового фита для разных областей МЭР осколков деления ^{226}Th*

	<u>All events</u>		$\langle m \rangle = 89$		$\langle m \rangle = 113$		$\langle m \rangle = 137$	
	$E^* = 26$	$E^* = 38$	$E^* = 26$	$E^* = 38$	$E^* = 26$	$E^* = 38$	$E^* = 26$	$E^* = 38$
v_{pre} <i>Er.</i>	1.62 ± 0.12	2.32 ± 0.09	1.85 ± 0.24	2.53 ± 0.22	1.52 ± 0.16	2.59 ± 0.14	1.94 ± 0.25	2.24 ± 0.22
v_{post} <i>Er.</i>	3.08 ± 0.05	3.38 ± 0.04	2.19 ± 0.11	2.51 ± 0.11	3.11 ± 0.07	3.21 ± 0.06	2.13 ± 0.11	2.78 ± 0.11
v_{tot} <i>Er.</i>	4.70 ± 0.13	5.70 ± 0.10	4.04 ± 0.27	5.04 ± 0.25	4.63 ± 0.17	5.80 ± 0.15	4.07 ± 0.27	5.02 ± 0.25

Наибольший интерес в таблице представляют результаты, касающиеся поведения предделительной нейтронной множественности (v_{pre}) в зависимости от массы осколка. Так, в случае начальной энергии возбуждения $E^* = 26$ МэВ v_{pre} в совпадении с событиями асимметричного деления оказывается на ~ 0.35 нейтрона выше, чем та же множественность в совпадении с событиями симметричного деления. Заметим, что при ранее проводившихся экспериментальных

исследованиях ν_{pre} как функции масс-асимметрии осколков деления для различных ядер, образованных в реакциях с тяжёлыми ионами, было обнаружено, что ν_{pre} либо не зависит от M , либо уменьшается с ростом масс-асимметрии. Однако, следует заметить, что исследования в этих работах проводились при достаточно высоких энергиях возбуждения (77 МэВ и выше), когда влияние оболочечных эффектов практически не наблюдается. В нашем случае при $E^* = 38$ МэВ ν_{pre} уже в совпадении с событиями симметричного деления так же оказывается в среднем на ~ 0.2 нейтрона выше. Таким образом, полученная нами зависимость $\nu_{pre}(M)$ в случае меньшей энергии возбуждения может быть объяснена только с точки зрения влияния оболочечных эффектов и может быть интерпретирована в том смысле, что либо время деления асимметричным способом больше, либо в случае асимметричного деления время, требуемое на испускание одного нейтрона, меньше. Однако, рассмотрение только структуры поверхности потенциальной энергии для интерпретации подобного явления явно недостаточно, т. к. сама поверхность изменяется с эмиссией каждого предделительного нейтрона и в данном случае необходимы динамические вычисления.

Второй раздел третьей главы посвящён исследованию характеристик деления изотопов $^{216,218,220}Ra$, ^{221}Ac образованных в реакциях с ионами ^{12}C . В частности, представлен экспериментальный материал по сечениям деления и образования испарительных остатков. Показано, что относительная вероятность α -распада по отношению к делению при равном начальном возбуждении компаунд-ядер Ra и ^{224}Th оказывается более чем на порядок величины выше в случае Ra .

При исследовании МЭР осколков деления были экспериментально наблюдаемы три моды деления. Они отчетливо прослеживаются как в массовых, так и в энергетических распределениях осколков, их свойства хорошо укладываются в ранее

известные закономерности поведения мод деления. Так, делительные моды можно идентифицировать по величине полной кинетической энергии (E_k): для симметричной $\langle E_k \rangle_s \cong 157$ МэВ, для асимметричных стандарт II и стандарт I – $\langle E_k \rangle_{a0} \cong 169.7$ МэВ и $\langle E_k \rangle_{a1} \cong 180$ МэВ соответственно.

Вклад асимметричной компоненты оценивался с помощью моделирования двумерных матриц осколков симметричного деления и вычитания их из экспериментальных. Отношение числа событий, являющееся результатом вышеуказанного вычета к числу событий в смоделированной матрице симметричной компоненты показано на рисунке 3 как функция конечной энергии возбуждения делящегося ядра, посчитанной с учётом испускания предделительных нейтронов. Видно, что выход асимметричной компоненты тем меньше, чем выше энергия возбуждения составного ядра и чем меньше нейтронов оно содержит, что находится в согласии с данными, ранее полученными для деления изотопов *Th*.

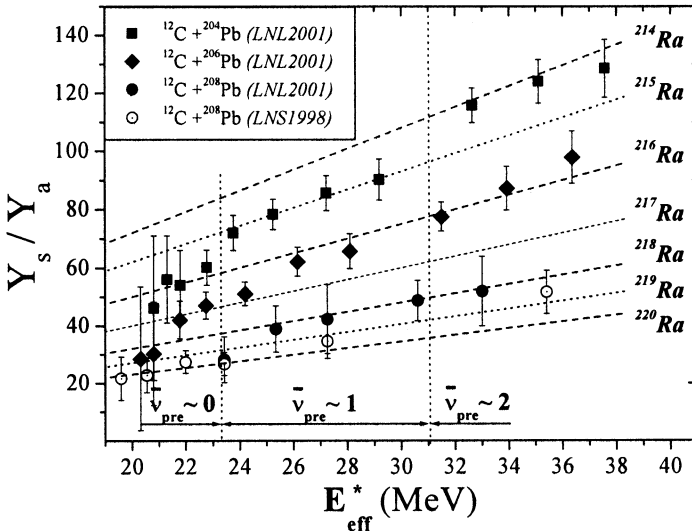


Рис. 3 Зависимость отношения выходов симметричного и асимметричного деления от реальной энергии возбуждения

Вертикальные пунктирные линии на рис. 3 указывают диапазоны энергии возбуждения, в которых согласно систематике с наибольшей вероятностью происходит деление ядра без испускания или с испусканием одного или двух предделительных нейтронов. Хорошо видно, что при переходе из диапазона в диапазон наблюдается заметный скачок в значении Y_s/Y_a для всех трёх ядер Ra . Данный факт может быть объяснён только с точки зрения проявления шансовой структуры в делении. Иными словами, по достижении некоторого возбуждения с наибольшей вероятностью начинают делиться уже не ^{216}Ra , ^{218}Ra , ^{220}Ra ядра, а ^{215}Ra , ^{217}Ra и ^{219}Ra , а при дальнейшем его росте делятся уже ^{214}Ra , ^{216}Ra и ^{218}Ra соответственно. Таким образом, на величину Y_s/Y_a в большей степени начинает влиять не рост энергии возбуждения ядра, а изменение его нуклонного состава, а с ним и изменение структуры поверхности потенциальной энергии деформации. Мы описали зависимости Y_s/Y_a на рис. 3 семейством расходящихся прямых, каждая из которых соответствует делению конкретного изотопа Ra . Объяснением подобного поведения зависимости $Y_s/Y_a(E^*)$ может служить разность в высотах барьеров асимметричного и симметричного деления $E_f^a - E_f^s$, которая для более нейтронодефицитного ядра оказывается большей.

Обратимся теперь к вопросу о том, какие ядерные оболочки ответственны за формирование асимметричной компоненты в делении компаунд-ядер Ra . Для ответа на этот вопрос нами были построены МР асимметричной компоненты, полученные как проекция на ось М вышеуказанных двумерных матриц-вычетов. Так, на рисунке 4 точками показаны МР асимметричной компоненты для трёх компаунд-ядер Ra при близком начальном возбуждении порядка $E_{init}^* \sim 30$ МэВ. При детальном рассмотрении рис. 4 видно, что как в случае лёгкого, так и тяжёлого осколка левый склон МР оказывается лежащим приблизительно в одной области масс, тогда как правый склон МР с увеличением массового числа делящегося ядра смещается

в область больших масс. Полученные МР были описаны с помощью двух гауссианов по методу наименьших квадратов без наложения начальных условий. В результате описания было получено, что для всех трёх компаунд-ядер *Ra* один из пиков МР в случае тяжёлого осколка лежит в области $M \approx 132$, а в случае лёгкого осколка – в области $M \approx 78$. Таким образом, можно сделать вывод о том, что природой асимметричного деления компаунд-ядер *Ra* является формирование двух сферических оболочек, одна из которых ($Z \sim 50$ и $N \sim 82$) формируется в тяжёлом осколке, а вторая ($Z \sim 28$ и $N \sim 50$) – в лёгком. Следует заметить, что деформированная оболочка Standard II при данном способе описания МР не проявляется, т. к. оказывается лежащей в области масс, ответных лёгкому осколку с $M \approx 78$. Однако более широкое распределение данной асимметричной компоненты может объясняться именно её влиянием.

Возвращаясь к данным о полученных нами значениях отношений выходов симметричного и асимметричного деления (Y_s/Y_a), мы нанесли полученные для пяти исследованных в работе ядер ($^{216,218,220}\text{Ra}$, ^{221}Ac и ^{226}Th) значения Y_s/Y_a на полученную в более ранних работах для ядер от ^{204}Pb до ^{234}U при $E_{sp}^* = 9-10$ МэВ зависимость этой величины от массового числа делящегося ядра (A_{CN}) (верхняя часть

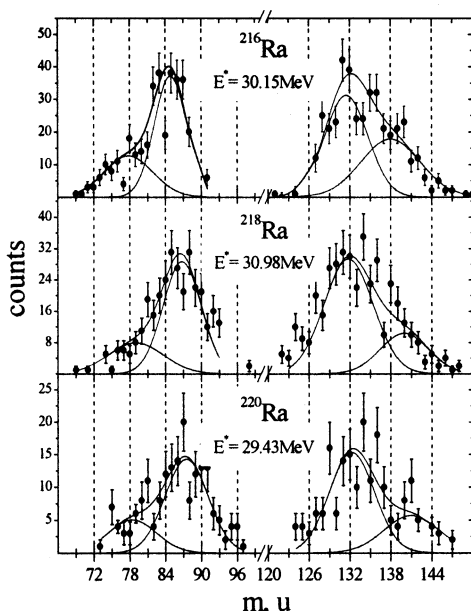


Рис. 4 Массовые распределения асимметричной компоненты, полученные как проекции матриц

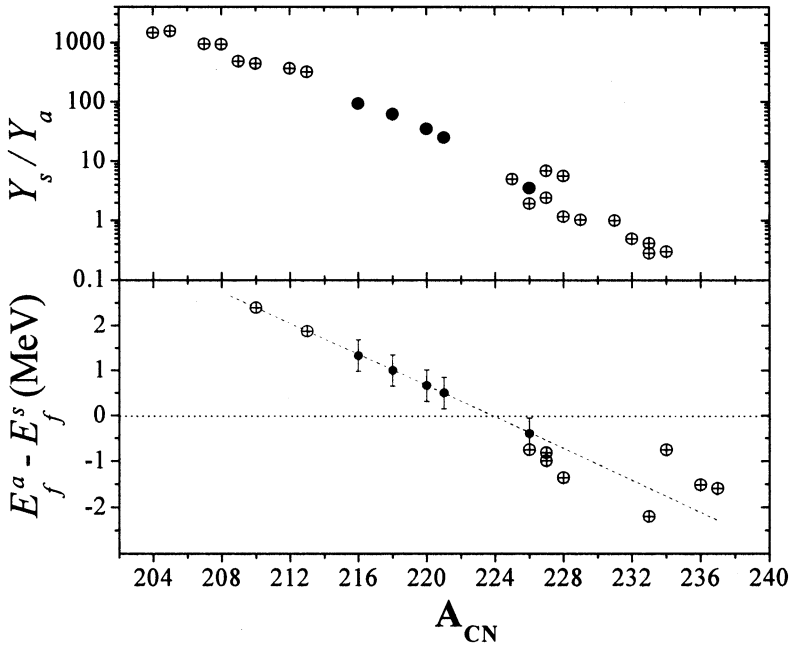


Рис. 5 Зависимость отношения выходов симметричного и асимметричного деления от массового числа делящегося ядра.
 Зависимость разности высот барьеров асимметричного и симметричного деления от массового числа делящегося ядра

рис. 5). Видно, что полученные нами значения хорошо укладываются в эту единую зависимость. В нижней части рис. 5 представлены экспериментально найденные разности асимметричных и симметричных барьеров $E_f^a - E_f^s$. Наблюдается чёткая корреляция между отношением Y_s/Y_a и разностью высот барьеров. Таким образом для ядер ^{216}Ra , ^{218}Ra , ^{220}Ra и ^{221}Ac величина $E_f^a - E_f^s$ оказывается положительной и равной 0.6-1.8 МэВ в зависимости от нуклонного состава конкретного ядра. Напротив, для ядра ^{226}Th разность $E_f^a - E_f^s$ оказывается отрицательной, т.е. барьер асимметричного деления для ^{226}Th оказывается ниже по отношению к симметричному.

В заключении изложены основные результаты, полученные в данной диссертационной работе:

- Создана высокоэффективная система регистрации осколочноподобных продуктов ядерных реакций на основе микроканальных пластин, обладающая высоким временным и позиционным разрешением. Усовершенствована методика обработки экспериментальных данных, получаемых в так называемых 2V – экспериментах, позволяющая существенно улучшить временное, а с ним и массовое и энергетическое разрешение системы.

- Измерены массово-энергетические распределения (МЭР) осколков деления ^{226}Th , образованного в реакции $^{18}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$. В результате применения разработанной на основе анализа большой совокупности экспериментальных данных математической модели описания МЭР обнаружено проявление делительной моды S3, обусловленное сферизацией лёгкого осколка, в делении ядра ^{226}Th .

- Измерены множественность (M_γ) и относительная энергия (E_γ) γ – квантов, испускаемых в делении компаунд-ядра ^{226}Th , как функции массы осколка. В зависимости $M_\gamma(M)$ удалось выделить две составляющие – от начальных и конечных осколков – и показать, что в точке разрыва M_γ достаточно сильно чувствительна к проявлению симметричной и асимметричной мод деления.

- Измерены полная (v_{tot}), а также пред- (v_{pre}) и пост-делительная (v_{post}) множественности нейтронов, испускаемых в делении компаунд-ядра ^{226}Th , как функции массы осколка. Полученные результаты свидетельствуют о зависимости предделительной нейтронной множественности от способа деления ядра.

- Измерены МЭР осколков деления ядер $^{216,218,220}\text{Ra}$ и ^{221}Ac , образованных в реакциях с ионами ^{12}C , что позволило установить зависимость отношения выходов симметричного и асимметричного деления от энергии возбуждения и нуклонного состава ядра. Экспериментально обнаружено проявление «шансовой» структуры в делении этих ядер.

Список публикаций с основными результатами диссертации.

1. M.G. Itkis, Yu.Ts. Oganessian, G.G. Chubarian, V.S. Salamatin, A.Ya. Rusanov, and V.N. Okolovich *Studies of Fission Modes in the Neutron-Deficient Nuclides of Th and Ac* // In: Proc. of the European Physical Society XV Nuclear Physics Divisional Conference *Low Energy Nuclear Dynamics* (St. Petersburg, Russia, April 18-22, 1995) World Scientific, Singapore (1995) pp.177-186.
2. M.G. Itkis, N.A. Kondratiev, E.M. Kozulin, Yu.Ts. Oganessian, V.V. Pashkevich, I.V. Pokrovsky, A.Ya. Rusanov, V.S. Salamatin, L. Calabretta, C. Maiolino, K. Lukashin, C. Agodi, G. Bellia, G.G. Chubarian, B. Hurst, D. O'Kelly, R. Schmitt, F. Hanappe, E. Liatard, L. Stuttge *Nature and Properties of the Fission Modes of the Neutron Deficient ^{220,224,226}Th Nuclides.* // JINR Preprint **E7-96-414**, Dubna, (1997) pp.1-11.
3. M.G. Itkis, L. Calabretta, F. Hanappe, Yu.M. Itkis, A. Kelic, N.A. Kondratiev, E.M. Kozulin, Yu.Ts. Oganessian, I.V. Pokrovski, E.V. Prokhorova, G. Rudolf, A.Ya. Rusanov, L. Stuttge *Fission of Heavy and Superheavy Nuclei at Low Excitation Energies* // Nucl. Phys. **A654** (1999) pp.870-877
4. I.V. Pokrovski, L. Calabretta, M.G. Itkis, E.M. Kozulin, A.N. Kondratiev, C. Maiolino, E.V. Prokhorova, A.Ya. Rusanov, S.P. Tretiyakova. *Investigation of the Fusion-Fission Cross-Section and Multimodal Nature of the Fission Process on an Example of ²²⁰Ra Compound-Nucleus.* // In: Proc. of the 4th Int. Conf. *Dynamical Aspects of Nuclear Fission* (DANF'98) (Časta-Papernička, Slovak Republic, October 19-23, 1998), eds. Yu.Ts. Oganessian, J. Kliman, S. Gmuca World Scientific, Singapore (1999) pp.357-366.
5. N.A. Kondratiev, E.M. Kozulin, I.V. Pokrovsky, E.V. Prokhorova *A Double-arm Time-of-flight Microchannel Plate Spectrometer CORSET for Correlation Measurement of Fission Fragments and Medium Mass Heavy Ions.* // см. Ref. **4** pp.431-437.

6. G.G. Chubarian, M.G. Itkis, N.A. Kondratiev, E.M. Kozulin, Yu.Ts. Oganessian, I.V. Pokrovsky, V.S. Salamatin, V.V. Pashkevich, A.Ya. Rusanov, B.J. Hurst, D.J. O'Kelly, R.P. Schmitt, F. Hanappe, E. Liatard, A. Huck, L. Stuttge, L. Calabretta, C. Maiolino, K. Lukashin, C. Agodi, G. Bellia. *Fission Fragment Mass-energy Distributions and Gamma-ray Multiplicities in Multimodal Fission of Light Thorium Isotopes*. // *cm. Ref.* **4** pp.293-307.
7. Itkis M.G., Kondratiev N.A., Kozulin E.M., Oganessian Yu.Ts., Pashkevich V.V., Pokrovsky I.V., Salamatin V.S., Rusanov A.Ya., Calabretta L., Maiolino C., Lukkashin K., Agodi C., Bellia G., Chubarian G.G., Hurst B.J., O'Kelly D., Schmitt R.P Hanappe F., Liatard E., Huck A., Stuttge L. *Observation of Fission Modes in Heavy Ion Induced Reactions*. // In: *Proc. of the Tours Symposium on Nuclear Physics III* (Tours, France, 1997) eds. M. Arnould, M. Lewitowicz, Yu.Ts. Oganessian, M. Ohta, H. Utsunomiya, T. Wada, AIP, Woodbury, New York (1998) pp.189-201.
8. A. Kelic, I.M. Itkis, I.V. Pokrovsky, E.V. Prokhorova, B. Benoit, G. Costa, L. Donadille, O. Dourvaux, G. Guillaume, F. Hanappe, B. Heusch, A. Huck, M.G. Itkis, S. Jokic, N.A. Kondratiev, E.M. Kozulin, Yu.Ts. Oganessian, G. Rudolf, A.Ya. Rusanov, L. Stuttge, D. Vorkapic. *Pre-fission Neutron Multiplicities and the Fission Modes of ^{226}Th* // *Europhys. Letters* **47(5)** (1999) pp.552-555.
9. I.V. Pokrovsky, L. Calabretta, M.G. Itkis, N.A. Kondratiev, E.M. Kozulin, C. Maiolino, E.V. Prokhorova, A.Ya. Rusanov, S.P. Tretiyakova *Three Fission Modes of ^{220}Ra* // *Phys. Rev.* **C60** (1999) pp.041304-1 – 041304-4.
10. G.G. Chubarian, M.G. Itkis, N.A. Kondratiev, E.M. Kozulin, V.V. Pashkevich, I.V. Pokrovsky, A.Ya. Rusanov, V.S. Salamatin and R.P. Schmitt *Gamma-Ray Multiplicities and Fission Modes in $^{208}\text{Pb}(^{18}\text{O}, f)$* // *Phys. Rev. Lett.* **87(5)** (2001) pp.052701-1 – 052701-4

11. I.V. Pokrovski, M.G. Itkis, I.M. Itkis, E.M. Kozulin, N.A. Kondratiev, E.V. Prokhorova, A.Ya. Rusanov, S.P. Tretiyakova, A. Kelic, G. Rudolf, L. Stuttge, F. Hanappe, L. Calabretta *Multimodal Nature of the Fission Process of ^{220}Ra , ^{226}Th and ^{270}Sg Compound-Nuclei.* // In: Proc. of the Int. Conf. *Nuclear Physics Nuclear Shells – 50 Years*, 49th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure, (Dubna, April 21-24 1999) eds. Yu.Ts. Oganessian, R. Kalpakchieva, World Scientific, Singapore (1999) pp.104-113.
12. I.V. Pokrovsky, M.G. Itkis, J.M. Itkis, N.A. Kondratiev, E.M. Kozulin, E.V. Prokhorova, V.S. Salamatin, V.V. Pashkevich, S.I. Mulgin, A.Ya. Rusanov, S.V. Zhdanov, G.G. Chubarian, B.J. Hurst, R.P. Schmitt, C. Agodi, G. Bellia, L. Calabretta, K. Lukashin, C. Maiolino, A. Kelic, G. Rudolf, L. Stuttge, F. Hanappe *Fission modes in the reaction $^{208}\text{Pb}(\text{}^{18}\text{O}, f)$* // Phys. Rev. **C62** (2000) pp.014615-1 – 014615-10.

Получено 6 декабря 2002 г.

Макет Н. А. Киселевой

Подписано в печать 09.12.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,38. Тираж 100 экз. Заказ № 53654.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/