

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

15-2001-222

На правах рукописи
УДК 593.173

САЛАМАТИН
Владимир Степанович

**ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ
МАССОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР
В РАЙОНЕ ТОЧКИ БУСИНАРО–ГАЛЛОНЕ
И В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ Ac–Th**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2001

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

доктор физико-математических наук
профессор

Иткис М.Г.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор физико-математических наук
профессор

Пятков Ю.В.

доктор физико-математических наук
профессор

Тер-Акопьян Г.М.

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

Защита состоится " ____ " _____ в " ____ " часов

на заседании диссертационного совета D.720.001.06 при

Объединенном институте ядерных исследований, по адресу:

141980, г.Дубна, Объединенный институт ядерных исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Попеко А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основой современного понимания физики деления является макро-микроскопический подход, разработанный Струтинским В.М., который обосновал метод оболочечной поправки и применил его к описанию энергии деформации ядер [1]. Ему удалось непротиворечиво объединить классическую модель жидкой капли (МЖК) и квантомеханическую модель оболочек в единую теорию в которой изменение свойств ядер с увеличением энергии возбуждения рассматривается как асимптотический переход к состоянию, описываемому МЖК [2], что выражается как трансформация двугорбого распределения масс осколков деления слабовозбужденных тяжелых ядер в одногорбое симметричное распределение при увеличении энергии возбуждения ядер, что и подтверждается экспериментально. Наблюдаемая универсальность симметричного деления высоковозбужденных ядер может служить экспериментальным обоснованием капельной модели как фундамента теории деления ядер. В свою очередь, изучение таких характеристик симметричного деления высоковозбужденных ядер как средняя кинетическая энергия осколков, ее дисперсия, барьеры деления, эффективные моменты инерции, жесткость ядер по отношению к масс-асимметричным деформациям является прямым способом проверки капельной модели. В этом смысле особенно интересна точка Бусинаро-Галлоне [БГ] предсказываемая всеми существующими вариантами капельной модели, т.к. ее положение на оси параметра делимости сильно отличается для разных вариантов капельной модели. И ее определение поможет определить, какая капельная модель наиболее адекватна экспериментальным макроскопическим свойствам ядер.

Оболочечные-же поправки, или микроскопическая часть потенциальной энергии деформации, тесно связаны с явлением мультимодальности, или многокомпонентностью массово-энергетических распределений (МЭР) осколков деления слабовозбужденных ядер, обусловленной наличием долининой структуры на поверхности энергии деформации. И если для ядер с массовым числом A легче 213 и тяжелее 230 экспериментальная информация о мультимодальном делении довольно обширна, то область ядер с $214 < A < 225$ оставалась неизученной. А именно здесь, согласно расчетам Пашкевича В.В. [3] и Меллера [4] с увеличением A ядра должен происходить переход от преимущественно симметричного к преимущественно асимметричному делению. Эксперименты по изучению МЭР осколков деления в этой переходной области были бы проверкой и стимулом для развития теоретических представлений как о делении в целом, так и мультимодальности в частности.

Цель работы состоит в экспериментальном исследовании макро и микроскопических свойств ядерного деления:

- а) макроскопических - определение точки Бусинаро-Галлоне;
- б) микроскопических - исследованию явления мультимодального деления в переходной области Ас-Гн.

Научная новизна

1) Получена экспериментальная информация о зависимости характеристик массово-энергетических распределений осколков симметричного деления высоковозбужденных ядер с $Z^2/A < 30$ от углового момента ℓ и нуклонного состава.

2) Впервые экспериментально получено значение точки Бусинаро-Галлоне, что позволило определить, какая капельная модель наиболее адекватна экспериментальным макроскопическим свойствам ядер.

3) Впервые в реакциях на тяжелых ионах изучены МЭР осколков деления слабовозбужденных нейтроннодефицитных ядер в области $218 < A < 227$.

4) Определена область ядер, где происходит переход от преимущественно симметричного способа деления к асимметричному.

5) Показана мультимодальность деления слабовозбужденных ядер в переходной области.

Научная и практическая значимость работы. Проведенные исследования дали новую информацию о статистических и динамических свойствах деления высоковозбужденных ядер: точке Бусинаро-Галлоне, роли углового момента и степени его влияния в зависимости от энергии возбуждения и нуклонного состава. Это существенно уменьшает выбор МЖК, используемых как базовые в макро-микроскопических расчетах. Экспериментальные же данные о низкоэнергетическом делении в переходной области могут использоваться (и уже используются) для тестирования и развития теоретического описания процесса деления.

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертации докладывались на международном совещании "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра" (Алма-Ата, 1992), на международной школе-семинаре по физике тяжелых ионов (Дубна, 1993), на международной конференции "Динамические аспекты деления ядер" (Смоленца 1993), на рабочем совещании "Ядерное деление и спектроскопия продуктов деления" (Гренобль, Франция, 1994), на рабочем совещании "Слияние тяжелых ионов: изучение разнообразия ядерных свойств" (Падуа, Италия, 1994), на 15-й конференции Европейского Физического Общества "Ядерная динамика при низких энергиях" (Санкт-Петербург, 1995), на симпозиуме по ядерной физике III (Тур, Франция, 1997), а также обсуждалась на семинарах

ФЛЯР ОИЯИ (Дубна) и опубликованы в работах /1-12/.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1) Экспериментальная зависимость дисперсий массово-энергетического распределения осколков деления легких нагретых ядер с $Z^2/A < 30$ от углового момента ℓ и нуклонного состава.

2) Зависимость параметра жесткости ядер к масс-асимметричным деформациям от нуклонного состава при $\ell=0$, что позволило впервые определить точку Бусинаро-Галлоне.

3) В реакциях около и подбарьерного слияния изучены МЭР осколков низкоэнергетического деления нейтроннодефицитных ядер ^{219}Ac , $^{220,224,226}\text{Th}$, и получена эволюция МЭР осколков деления в зависимости от энергии возбуждения и нуклонного состава составных ядер.

4) Показано, что отношение выходов симметричного и асимметричного деления изотопов Th сильно зависит от числа нейтронов N и найдена область ($A \approx 222$), где происходит переход от преимущественно асимметричного (тяжелые изотопы) к симметричному (легкие изотопы). Экспериментальные данные согласуются с расчетами В.В.Пашкевича [3] в рамках концепции мультимодальности деления, долиной структуры барьера.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы. Она содержит 94 страниц машинописного текста (включая рисунки), 34 рисунков, 7 таблиц и списка литературы из 144 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматривается проблема, обосновывается актуальность и задачи исследований. Сформулирована цель работы и кратко изложен материал диссертации.

Первая глава посвящена точке Бусинаро-Галлоне в модели жидкой капли и ее экспериментальному определению.

Для легких ядер с $Z^2/A < 31$ седловая точка и точка разрыва близки и по деформации, и по потенциальной энергии, и, соответственно, динамика движения ядра к разрыву практически не играет никакой роли. В этом случае при теоретическом рассмотрении процесса деления на первый план выходят статические свойства поверхности потенциальной энергии деформации. Для высоковозбужденных ядер они описываются в рамках МЖК, где одним из основных параметров является жесткость $d^2V/d\eta^2$ ядер по отношению к масс-

асимметричным деформациям η [6,7]:

$$\eta = 2(V_L - V_{II}) / (V_L + V_{II}), \quad (1)$$

где V_L , V_{II} - объемы частей асимметричной фигуры, описывающей делящееся ядро, расположенных слева и справа от середины шейки.

Параметр деформации η характеризует асимметричную конфигурацию ядра, и его можно связать с асимметрией масс будущих осколков, если предположить, что разрыв происходит в "самом тонком месте", т.е. посредине шейки. Тогда

$$\eta = (4/A) / (M - A/2). \quad (2)$$

В статистическом подходе [8] вероятность деления с отношением масс осколков $M/(A - M)$ описывается как

$$Y(M) \sim \exp\{2a[E^* - V(M)]^{1/2}\} \quad (3)$$

где a — параметр плотности уровней. $V(M)$ - потенциальная энергия системы, которую можно представить в виде:

$$V(\eta) = V(0) + \frac{1}{2} d^2 V / d\eta^2 \Big|_{\eta=0} \eta^2 + \dots \quad (4)$$

Ограничиваясь в (4) этими двумя членами, считая второй член малым по сравнению с потенциальной энергией $V(0)$ и используя (3), получим для $Y(M)$ наблюдаемое в эксперименте гауссовое распределение с дисперсией

$$\sigma_M^2 = \frac{A^2}{16} \left[\left(\frac{d^2 V}{d\eta^2} \right) \Big|_{\eta=0} \right]^{-1} \theta, \quad (5)$$

где θ - температура ядра.

Таким образом, форма распределения $Y(M)$ определяется зависимостью потенциальной энергии $V(\eta)$ от масс-асимметричной деформации. Жесткость к асимметричным колебаниям формы ядра $d^2 V / d\eta^2$ определяет дисперсию σ_M^2 . И наоборот, из экспериментальных данных σ_M^2 легко найти этот важнейший статический параметр МЖК. Вид зависимости $d^2 V / d\eta^2 (Z^2/A)$, отличаясь количественно положением критических точек по обеим осям аналогичен для любой модификации МЖК (рис.1). Точка, в которой жесткость ядра $d^2 V / d\eta^2 = 0$ - точка БГ.

Модельно-зависимое значение точки БГ лежит в пределах 19-26 по Z^2/A . В этой точке при делении ядра на приблизительно равные части в окрестности $A/2$ по теории должно наблюдаться плоское, не зависящее от массы распределение осколков с очень большой дисперсией.

Попытки экспериментального определения точки БГ в реакциях с протонами высоких

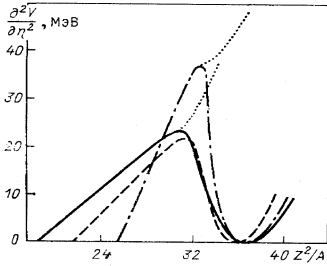


Рис.1. Зависимость жесткости ядер $d^2V/d\eta^2$ к масс-асимметричным деформациям от параметра делимости Z^2/A [17]:

сплошная, штрихпунктирная, пунктирная кривые – МЖК [9], [7], [10] соответственно для седловой точки; пунктирная – для точки разрыва.

энергий показали, что действительно происходит относительное уширение массового распределения осколков с уменьшением массового числа делящегося ядра. Но количественный анализ этих данных практически невозможен. Использование же легких заряженных частиц для исследования деления в данной области затруднено как методическими причинами - микропримеси тяжелых элементов в мишенях, так и физическими - низкая делимость. Тяжелые ионы позволяют обойти эти сложности. Ядро, приобретая значительный угловой момент, резко увеличивает делимость, но в то же время, момент сильно влияет на процесс деления, приводя к отличию наблюдаемых на опыте характеристик МЭР осколков от их свойств для невращающегося ядра. Т.к. практически все существующие расчеты сделаны для невращающихся ядра, то для сравнения с предсказаниями капельных моделей необходимо знание влияния углового момента. Анализ литературы показал, что несмотря на обширный экспериментальный материал практически невозможно сделать выводы об адекватности опыту того или иного варианта МЖК. Принимались только те литературные данные, где было возможно надежно отделить истинное деление от других компонент.

Наши исследования проведены на спектрометре ДЭМАС [11] на ускорителе У-400 ФЛЯР. Были изучены МЭР осколков в реакциях $^{20}\text{Ne} + ^{112,118,124}\text{Sn}$ при энергии ^{20}Ne $E_i=140$ МэВ и $^{20}\text{Ne} + ^{99}\text{Ru}, ^{106,110}\text{Cd}, ^{118}\text{Sn}$ при $E_i=124$ МэВ, и деление ядра ^{124}Ba в двух комбинациях ион-мишень: $^{12}\text{C}(137 \text{ МэВ}) + ^{112}\text{Sn}$, $^{25}\text{Mg}(164 \text{ МэВ}) + ^{99}\text{Ru}$. Для анализа экспериментальных данных вычислялись:

- Угловой момент ℓ : рассчитывался по модели Басса [12],
- Энергия возбуждения составного ядра

$$E^*(\ell) = E_{C.Д.М.} + (\Delta M_i + \Delta M_f - \Delta \tilde{M}_{CN}) - E_{rot}(\tilde{\alpha}_{CN}, \ell), \quad (6)$$

вычисленная с учетом энергии вращения ядра в основном состоянии [13,14] и с использованием капельных масс [15];

- θ_{sp}^o - температура вращающегося ядра в седловой точке

$$\theta_{sp}^o = \{[E^*(\ell) - \tilde{E}_f(\ell)] / \tilde{a}\}^{1/2}, \quad (7)$$

где \tilde{E}_f - барьер деления вращающегося ядра [13,14], \tilde{a} - параметр плотности уровней, $\tilde{a} = 0.093A \text{ МэВ}^{-1}$ или $\tilde{a} = A/8 \text{ МэВ}^{-1}$;

г) \tilde{V}_{pre} - среднее число испарительных нейтронов, испущенных до деления определенное по систематике [16];

д) θ_{sp}^{eff} - эффективная температура ядра в седловой точке после вылета нейтронов \tilde{V}_{pre}

$$\theta_{sp}^{eff} = \{[E^*(\ell) - \tilde{V}_{pre} \bar{E}_v - \tilde{E}_f(\ell)] / \tilde{a}\}^{1/2}, \quad (8)$$

где $\bar{E}_v = \bar{B}_n + \bar{E}_n$ - средняя энергия, уносимая нейтроном, \bar{B}_n и \bar{E}_n - его средние значения энергии связи и кинетической энергии. Величина $\bar{E}_n = 2\theta_n$, где θ_n - температура остаточных ядер, по цепочке которых в (8) производится усреднение энергий отделения нейтронов \bar{E}_v .

Подбирались пары или тройки близких по Z^2/A ядер при одинаковых или близких температурах θ_{sp}^{eff} , и количественный анализ экспериментальной информации относительно зависимостей \bar{E}_k , σ_M^2 и σ_E^2 от ℓ проводился по линейному приближению:

$$X(\theta_{sp}, \ell^2) = X_0 + \frac{\partial X}{\partial \theta_{sp}} \theta_{sp} + \frac{\partial X}{\partial \ell^2} \ell^2, \quad (9)$$

где $X(\theta_{sp}, \ell^2)$ - моменты МЭР, а $X_0 = X(0,0) = 0$.

Результаты анализа в виде коэффициентов чувствительности $d\sigma_M^2/d\ell^2$ и $d\sigma_E^2/d\ell^2$ в зависимости от Z^2/A представлены на рис.2, из которого складывается следующая картина: для ядер с $Z^2/A > 30$ $d\sigma_M^2/d\ell^2 > 0$, для более легких ядер этот коэффициент меньше нуля, чем легче ядро, тем он более отрицателен. Для $d\sigma_E^2/d\ell^2$ в пределах погрешностей зависимости σ_E^2 от ℓ нет. На основании данных о дисперсии распределений масс осколков σ_M^2 , с учетом влияния ℓ , найдена зависимость параметра жесткости ядер d^2V/dm^2 по отношению к массе

асимметричным деформациям η

$$d^2V/d\eta^2 = A^2 \theta / 16 \sigma_M^2 \quad (10)$$

от нуклонного состава делящихся ядер (рис.3). Экспериментальная информация, представленная на рис.3, демонстрирует отчетливую выстроенность данных, которая в полном объеме не описывается ни в одной из модификаций МЖК, но удивительное согласие с экспери-

ментом достигается в модели Сирка [13,18] для области $Z^2/A=22-29$ с $\tilde{a}=0.093A$ и барьерами $\tilde{E}_f(\ell)$ из той же модели [13].

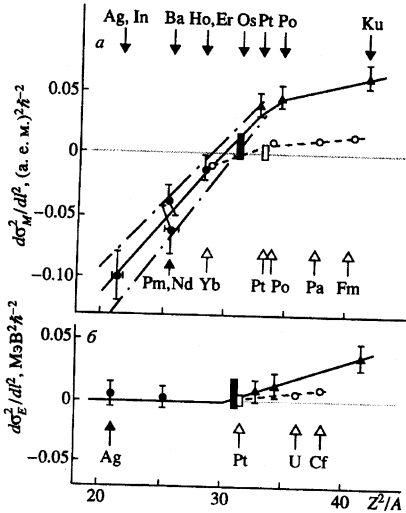


Рис.2. Коэффициенты чувствительности $d\sigma_M^2/d\ell^2$ (а) и $d\sigma_E^2/d\ell^2$ (б) в зависимости от Z^2/A .

Точки:

●, ■ - результаты настоящего анализа для указанных ядер ($Ku=^{260}104$),

▲ - данные других работ для $\theta_{SP}^{eff}=1.5$ МэВ;

○, □ - теоретические расчеты [17].

Сплошные линии проведены по экспериментальным точкам, штриховые - по теоретическим; штрихпунктирные - коридор ошибок для оценки погрешности результатов.

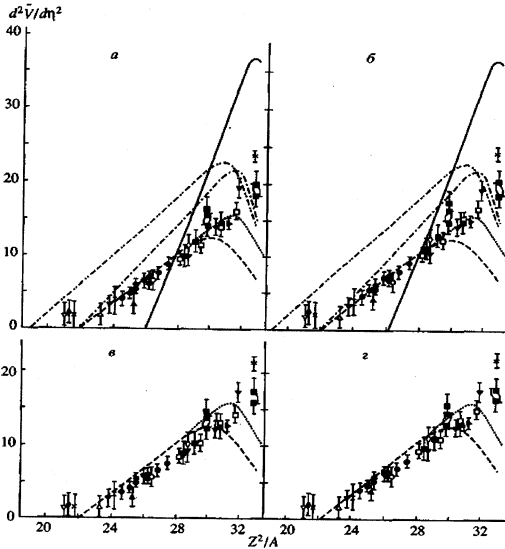


Рис.3. Зависимость жесткости $d^2\tilde{V}/d\eta^2$

от Z^2/A , вычисленной по θ_{SP}^{eff} и σ_M^2 , поправленными на ℓ , согласно сплошной линии на рис.2. Теоретические кривые: сплошная - [6], штриховая с двумя точками - [9], штрихпунктирная - [10], штриховая - [18] с параметрами из [13]. Данные: ● - настоящая работа, остальные значки - наш анализ других работ.

а) - θ_{SP}^{eff} (5) вычислена с барьерами деления

$\tilde{E}_f(\ell)$ из [14], $\tilde{a} = 0.093A$;

б) - $\tilde{E}_f(\ell)$ из [13], $\tilde{a} = 0.093A$;

в) - $\tilde{E}_f(\ell)$ из [14], $\tilde{a} = A/8$;

г) - $\tilde{E}_f(\ell)$ из [13], $\tilde{a} = A/8$.

Кроме того, она точно предсказывает положение точки БГ, которую легко определить по экспериментальным данным при линейной экстраполяции их в нуль: $(Z^2/A)_{БГ} = 22.0 \pm 0.6$.

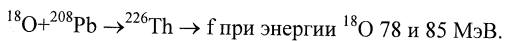
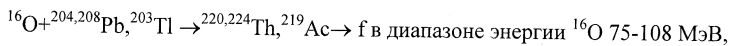
Найденное положение точки БГ на оси Z^2/A оказывается не чувствительным к изменению $\tilde{E}_f(\ell)$ и \tilde{a} -экстраполяция для всех четырех приведенных на рис.3 комбинаций параметров в пределах ошибок дает одно и то же значение точки БГ.

На основе всего приведенного выше экспериментального материала мы приходим к выводу, что, вероятно, наиболее адекватной опыту, по крайней мере в области легких ядер с $Z^2/A=20-30$, является МЖК с учетом короткодействия ядерных сил [13,18] и что экспериментальное положение точки БГ соответствует этой модели и находится при $(Z^2/A)_{БГ}=22.0\pm 0.6$.

Во второй главе приведены результаты исследований низкоэнергетичного деления ядер ^{219}Ac , $^{220,224,226}\text{Th}$ в так называемой, переходной области.

Обнаруженная в начале 1980-х асимметричная компонента в делении доактинидных ядер в районе Рb [19] была успешно количественно объяснена в рамках гипотезы независимых мод. Параметры МЭР оказались в превосходном согласии с теоретическими расчетами В.В. Пашкевича [8] главный результат которых состоял в предсказании нового свойства в физике деления – долиненной структуры потенциальной энергии деформации .

Зависимость отношения выходов симметричной (Y_s) и асимметричной (Y_a) компонент Y_a/Y_s приблизительно экспоненциально убывает с уменьшением A_{CN} в диапазоне от ^{236}U до ^{204}Pb [20]. Однако имеется существенный пробел в области $A_{CN} = 214-225$ связанный с отсутствием подходящих ядер-мишеней для исследования МЭР осколков в реакциях с легкими частицам - стандартным инструментом для изучения низкоэнергетического деления ядер. Между тем экспериментально измеренная разность асимметричного и симметричного барьеров $E_f^a - E_f^s$ линейно возрастает с уменьшением A_{CN} , переходя через ноль в области $A_{CN}\approx 222$ [20]. Очевидна корреляция - чем больше разность $E_f^a - E_f^s$, тем меньше Y_a/Y_s , т.е. относительная вероятность того или другого способа деления находится в прямой зависимости от соотношения высот барьеров. Сохранится ли это свойство и в "промежуточной" области ядер? И для изучения модальной структуры МЭР осколков в этой области нами впервые были использованы тяжелые ионы в реакциях :



Именно с изотопами тория лучше всего связывать уникальную возможность экспериментального изучения низкоэнергетического деления и его свойств при изменении в широких пределах только одного числа нейтронов N. Начальные составные ядра тория, образующиеся и делящиеся в реакциях с легкими и тяжелыми ионами $Z_i=2-8$, составляют цепочку

таких изотопов протяженностью $\Delta N \approx 10$ ($A=220-230$) и ее еще можно "нарастить", привлекая реакции (n,f) вплоть до $A=233$.

Эксперименты с ионами ^{16}O проведены на времяпролетном спектрометре DEMAS, с ионами ^{18}O на усовершенствованной установке DEMAS-3 [21]. На рис.4-6 приведены МЭР осколков деления ядер $^{226,224,220}\text{Th}$ и ^{219}Ac при разных E^* . Для вычисления энергии возбуждения в седловой точке $E_{sp}^* = E^* - V_f$ барьеры деления V_f взяты из работы Пашкевича В.В [22] и E_{sp}^* не поправлялась на v_{pre} . На примере ^{224}Th (рис.4) отчетливо видно, что с уменьшением энергии возбуждения на склонах преобладающего симметричного деления, которое мы описали гауссианом, возникают выступы, связанные с асимметричной компонентой. Наиболее ярко асимметричное деление проявляется у ^{226}Th (рис.6), наименее у ^{219}Ac (рис.5) - его вообще трудно выделить. В распределениях более рельефно видны следы отступления полной кинетической энергии E_k вверх от капельной параболической зависимости в области масс осколков $M \geq 130$, что является характерным признаком асимметричной моды деления ядер.

Рис.7 сопоставляет измеренные нами распределения масс $Y(M)$ изотопов тория с ранее известными ^{229}Th [23] при энергии E_{sp}^* 15-16 МэВ. Отчетливо прослеживается тенденция - с уменьшением A ядра достаточно резко уменьшается выход Y_a , показанный на рисунках справа. Y_a был получен как разность $Y_{\text{эксперимент}} - Y_s$. Симметричный способ в данном случае аппроксимировался гауссианом. Средние массы двух асимметричных компонент оказались равными $\bar{M}_{a0} \approx 138-140$,

$\bar{M}_{a1} \approx 130-133$, что находится в превосходном согласии с этими же характеристиками для ядер в области Rb. Таким образом, установлена общность свойств асимметричного деления нейтроннодефицитных ядер тория, с одной стороны, с более тяжелыми хорошо известными изотопами, с другой - с областью более легких доактинидных ядер.

На рис.8 приведено разложение выходов масс на симметричную и асимметричную компоненты для разных изотопов при различных энергиях $Y_s/Y_a = \sum_M Y_s / \sum_M Y_a$, где $\sum_M Y_a = \sum_M Y_{a0} + \sum_M Y_{a1}$. Отчетливо видна тенденция поведения этого отношения от E_{sp}^* : если для ядер с $A \geq 224$ оно явно убывает с уменьшением E_{sp}^* , то для ^{220}Th Y_s/Y_a - почти const, а для ^{219}Ac - это уже растущая функция. Конечно, желательны были бы измерения при более низких возбуждениях, однако, и в таком виде качественная картина, в целом, понятна. Она означает, что между $A_{CN}=224$ и 220 высоты барьеров E_f^i в симметричной и асимметричной долях сравниваются. При точном равенстве $E_f^S = E_f^a$ отношение Y_s/Y_a вообще не должно зависеть от E_{sp}^* .

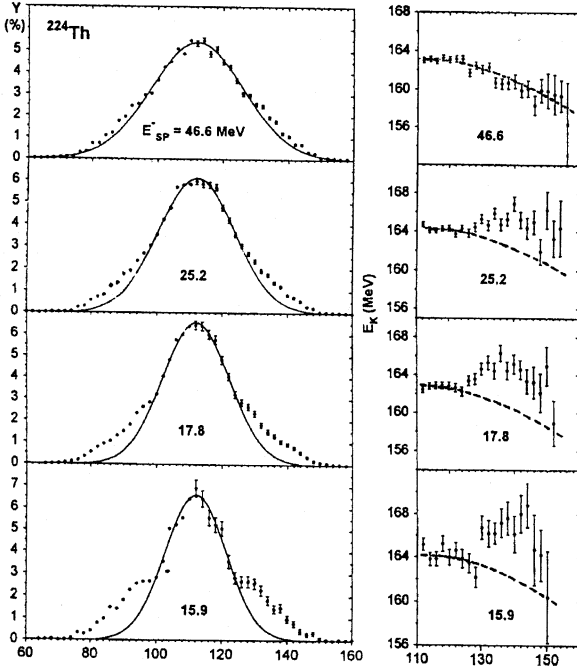


Рис.4. Выходы Y и полные кинетические энергии осколков в зависимости от массы M для деления компаунд - ядра ^{224}Th при нескольких энергиях возбуждения E_{sp}^* . Сплошные кривые - описание Y_s гауссианом, штриховые - жидкокапельная параболическая зависимость $E_k(M)$.

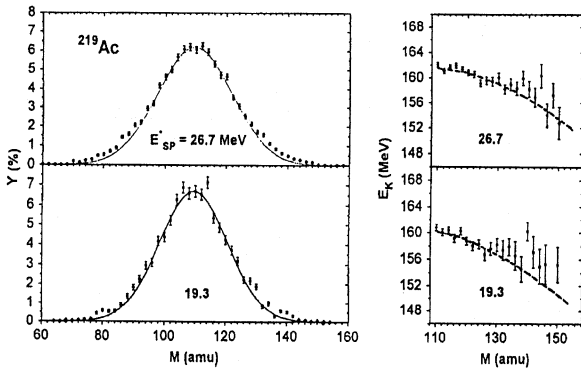


Рис.5. То же, что на рис.2.4, но для компаунд - ядра ^{219}Ac .

Такое резкое изменение разности барьеров от A очень хорошо видно на рис.9, где приведены массовые распределения для $^{224,226}\text{Th}$ в зависимости от полной кинетической энергии ТКЕ осколков при практически одинаковой внесенной $E^* \approx 26$ МэВ. Большим ТКЕ соответствует меньшая энергия возбуждения выделенных масс и наоборот.

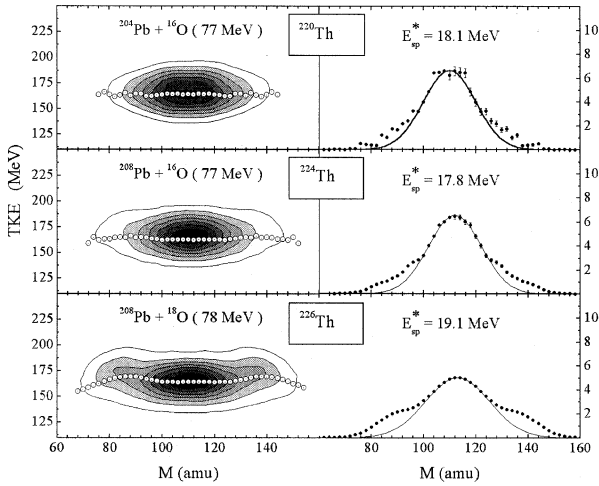


Рис.6. Слева: двумерные матрицы (полная кинетическая энергия ТКЕ*масса) осколков деления ядер $^{226,224,220}\text{Th}$ при приблизительно одинаковой E_{sp}^* .

Открытые кружки - экспериментальная зависимость $\langle E_k \rangle(M)$.

Слева: соответствующие матрицам выходы масс осколков.

Сплошные кривые - выход симметричного деления описанный гауссом.

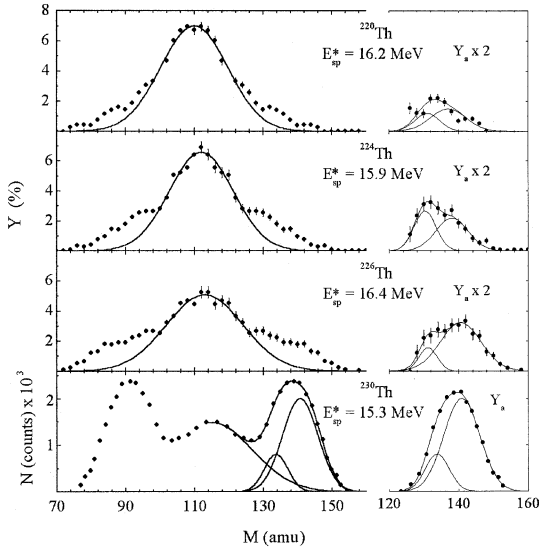


Рис.7. Сравнение выходов масс осколков деления ядер ^{230}Th , ^{229}Th и $^{220,224,226}\text{Th}$ (настоящая работа) при $E_{sp}^* = 15-16$ МэВ. Справа - выделенная асимметричная компонента и ее описание двумя Гауссами $Y_a = Y_{a0} + Y_{a1}$.

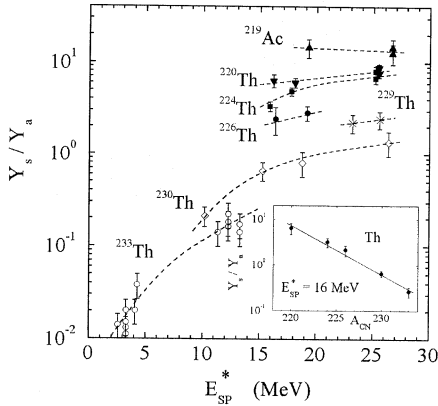


Рис.8. Y_s/Y_a в зависимости от энергии возбуждения E_{sp}^* для делящихся ядер ^{219}Ac и для цепочек Th.

Данные :

^{219}Ac , $^{220,224,226}\text{Th}$ - настоящая работа;
 $^{229,230,233}\text{Th}$ - другие работы.

Вставка: Y_s/Y_a в зависимости массового числа A_{CN} для цепочек изотопов Th.

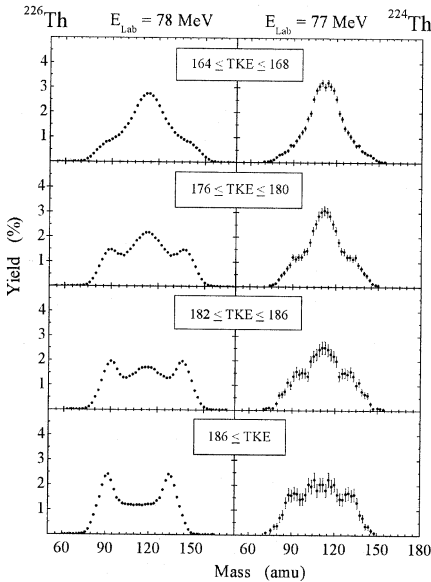


Рис.9. Изменение массовых распределений $^{224,226}\text{Th}$ в зависимости от полной кинетической энергии осколков TKE.

Всего два нейтрона разницы ($\delta M/M \approx 1\%$) приводят к макроизменениям в массовых спектрах что, безусловно, имеет микроскопическую (структурную) природу. Это ясно говорит о том, что разность $E_f^a - E_f^s$ для ^{224}Th больше, чем у ^{226}Th . Результаты теоретических расчетов разности высот этих барьеров, выполненные Пашкевичем (1995) хорошо согласуются с нашим экспериментом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1) Выполнены исследования МЭР осколков симметричного деления нагретых ядер с $Z^2/A < 30$ в реакциях с тяжелыми ионами. Получена экспериментальная информация о зави-

симости характеристик МЭР от углового момента ℓ и нуклонного состава.

Показано, что увеличение углового момента приводит к уменьшению дисперсии массового распределения, а с уменьшением Z^2/A чувствительность дисперсии массового распределения к угловому моменту усиливается.

Влияния углового момента на дисперсию кинетической энергии не обнаружено.

2) Полученная экспериментальная зависимость параметра жесткости d^2V/dn^2 при $\ell=0$ позволила впервые определить точку БГ ($Z^2/A=22.0\pm 0.6$). Это значение согласуется с расчетом по МЖК Сирка, учитывающей короткодействие ядерных сил.

3) Впервые изучены МЭР осколков низкоэнергетического деления нейтроннодефицитных ядер ^{219}Ac , $^{220,224,226}\text{Th}$ в реакциях на тяжелых ионах.

4) Получена эволюция МЭР осколков деления в зависимости от энергии возбуждения и нуклонного состава составных ядер. Показано, что отношение выходов симметричного и асимметричного деления изотопов Th сильно зависит от числа нейтронов N и найдена область $N\approx 132$ ($A\approx 222$), где происходит переход при околобарьерных энергиях от преимущественно асимметричного способа деления (тяжелые изотопы) к симметричному (легкие изотопы).

5) В массовых распределениях легких изотопов Th отчетливо проявляются 3 моды деления: симметричная и две асимметричные со средними массами осколков 132, 140.

6) Экспериментальные данные в переходной области Ac, Th согласуются как качественно, так и количественно с расчетами В.В.Пашкевича в рамках концепции мультимодальности деления, долиненной структуры барьера.

Основные результаты, представленные в диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Саламатин В.С., Козулин Э.М., Тончев А.П., Чубарян Г.Г., Иткис М.Г., Русанов А.Я., Смиринкин Г.Н. Исследование деления ядер в области точки Бусинаро-Галлоне. // Тезисы докладов международного совещания "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра", Алма-Ата, апрель 1992, Санкт-Петербург: "Наука", 1992. С.307.
2. Itkis M.G., Okolovich V.N., Rusanov A.Ya., Smirenkin G.N., Beizin S.D., Chubarian G.G., Muzychka Yu.A., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Salamatin V.S. Fission of nuclei in the region of $A = 100-200$. // Proc. Int. School-seminar on the Heavy Ion Physics. Dubna, May 1993. Dubna, JINR. 1993. V.1. P.213-229.
3. Itkis M.G., Okolovich V.N., Rusanov A.Ya., Smirenkin G.N., Chubarian G.G., Muzychka Yu.A., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Salamatin V.S. Mass-energy distributions of

- fission fragments liquid drop model, angular momentum and Busnaro-Gallone point. // Second Int. Conf. on "Dynamical aspects of Nuclear Fission" Smolenice Castl, Slovakia, June 1993, Abstract. Bratislava, Inst. of Physics. P.18.
4. Чубарян Г.Г., Иткис М.Г., Лукьянов С.М., Околович В.Н., Пе-нионжкевич Ю.Э., Русанов А.Я., Саламатин В.С., Смиренкин Г.Н. Массово-энергетические распределения осколков и угловой момент при делении возбужденных ядер. // ЯФ. 1993. Т.56. вып.3. С.3-29.
 5. Itkis M.G., Muzychka Yu.A., Oganessian Yu.Ts., Okolovich V.N., Pashkevich V.V., Rusanov A.Ya., Salamatin V.S., Smirenkin G.N., Chubarian G.G. Fission fragment mass and energy distributions of heated nuclei and Busnaro-Gallone point.// Heavy Ion Physics. Scientific report 1993-1994. Dubna, JINR, FLNR. 1995. P. 62-63.
 6. Itkis M.G., Oganessian Yu.Ts., Chubarian G., Pashkevich V.V., Salamatin V.S., Rusanov A.Ya., Okolovich V.N., Smirenkin G.N. Multimodal fission of neutron-deficient nuclides of Th and Ac // In: JINR Rapid Communications, №3[66], 1994, p.19.
 7. Itkis M.G., Oganessian Yu.Ts., Chubarian G.G., Pashkevich V.V., Salamatin V.S., Rusanov A.Ya., Okolovich V.N., Smirenkin G.N. Multimodal fission of neutron-deficient nuclides of Th and Ac // Proc. of the workshop on Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy. Chateau de la Baume, Seyssins, France, may 1994. Inst. Max Von Laue - Paul Langevin, Grenoble, France. P.77-85.
 8. Itkis M.G., Oganessian Yu.Ts., Salamatin V.S., Chubarian G.G., Rusanov A.Ya. Experimental Investigation of mass and energy distributions of hot and cold nuclei fission fragments in reactions with heavy ions. // Workshop on Heavy-Ion Fusions: Exploring the variety of nuclear properties. Padova, Itali, may 1994. Abstracts, Universita'di Padova. P.55.
 9. Itkis M.G., Oganessian Yu.Ts., Chubarian G.G., Salamatin V.S., Rusanov A.Ya., Okolovich V.N. Studies of fission modes in the neutron-deficient nuclides of Th and Ac. // Proc. European Phys. Soc. 15 Nucl. Phys. Divl. Conf. "Low Energy Nuclear Dynamics". St. Petersburg, Russia, april 1995. Singapore, World Scientific. 1995. P.177-186.
 10. Иткис М.Г., Музыка Ю.А., Оганесян Ю.Ц., Околович В.Н., Пашкевич В.В., Русанов А.Я., Саламатин В.С., Смиренкин Г.Н., Чубарян Г.Г. Деление возбужденных ядер с $Z^2/A = 20-33$: массово-энергетические распределения осколков, угловой момент и капельная модель. // ЯФ. 1995. Т.58. С.2140-2165.
 11. 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., Lukashin K., Agodi C., Bellia G., Chubarian G.G., Hurst B.J., O'Kelly D., Schmitt R.P., Hanappe F., Liatard E., Huck A., Stuttgart L. Observation of fission modes in heavy ion induced reactions // Tours Symposium

On Nuclear Physics III, Tours, France, September 1997, Woodbury New York, 1998 P.189-201.

12. Pokrovsky I.V., Itkis M. G., Itkis J.M., Kondratiev N. A., Kozulin E. M., Prokhorova E.V., Salamatin V.S., Pashkevich V.V., Mulgin S.I., Rusanov A.Ya., Zhdanov S.V., Chubarian G.G., Hurst B.J., Schmitt R.P., Agodi C., Bellia G., Calabretta L., Lukashin K., Maiolino C., Kelic A., Rudolf G., Stuttge L., Hanappe F. Fission modes in the reaction $^{208}\text{Pb}(^{18}\text{O}, f)$ // Phys. Rev. 2000. C 62. (014615).

Цитируемая литература:

- [1]. Strutinsky V.M. Shell effects in nuclear masses and deformation energies. // Nucl. Phys. 1967. V.A95. P.420-442; Strutinsky V.M. "Shell" in deformed nuclei. // Nucl. Phys. 1968.V.A122. P.1-33.
- [2]. Струтинский В.М., Коломиец В.М. Оболочечная структура ядер и деление. // Материалы 8-й зимней школы ЛИЯФ по физике ядра.Л.: Изд-во АН СССР. 1973. Т.2. С.480-595.
- [3]. Пашкевич В.В. Структура барьера деления ядер в районе тория.// Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов. Алушта, апрель 1983, Дубна, ОИЯИ, 1983. С.405-419.
- [4]. Moller P. Odd-multipole shape distortions and fission barriers of elements in the region $84 < Z < 120$. // Nucl. Phys. 1972. V.A192. P.529-580.
- [5]. Busnaro U.L., Gallone S. On the Interpretation of fission asymmetry according to the liquid drop nuclear model. // Nuovo Cim. 1955. V. 1. P.629-643; Busnaro U.L., Gallone S. Saddle shapes, threshold energies and fission asymmetry on the liquid drop model. // ibid. P.1277-1279.
- [6]. Струтинский В.М. Устойчивость равновесных состояний ядра в капельной модели. // ЖЭТФ. 1963. Т.45. С.1900-1907.
- [7]. Струтинский В.М. Форма делящегося ядра в седловой точке и капельная модель ядра. // ЯФ, 1965. Т.1. С.821-826.
- [8]. Pashkevich V.V. On the asymmetric deformation of fissioning nuclei. // Nucl. Phys. 1971. V.A169. P.275-293.
- [9]. Myers W.D., Swiatecki W.J. Nuclear masses and deformations.// Ark. Fysik. 1967. V.36. P.343-352.
- [10]. Myers W.D. Droplet model atomic nuclei. N.Y.: IFI // Plenum, 1977.
- [11]. Чубарян Г.Г., Горшков В.А., Жучко В.Е. и др. Двухплечевой времяпролетный спектро-

метр на основе позиционно-чувствительных многопроволочных лавинных счетчиков // Сообщение ОИЯИ, P13-92-18, Дубна. 1992.

- [12]. Bass R. Fusion of heavy nuclei in a classical model. // Nucl. Phys. 1974. V.A231. P.45-63.; Bass R. Nucleus-nucleus potential deduced from experimental fusion cross sections. // Phys. Rev. Lett. 1977. V.39. P.265.
- [13]. Sierk A.J. Macroscopic model of rotating nuclei. // Phys.Rev. 1986. V.C33. P.2039-2053.
- [14]. Cohen S., Plasil P., Swiatecki W.J. Equilibrium configurations of rotating charged or gravitating liquid masses with surface tension. // Ann. Phys. (N.Y). 1974. V.82. P.557-576.
- [15]. Moller P., Nix J.R. Nuclear masses from a unified macroscopic-microscopic model // Preprint Los Alamos Nat. Lab. LA-UR-86-3883, Los Alamos, 1986; At. Data Nucl. Data Tabl. //1988. V.39. P.213-223.
- [16]. Иткис М.Г., Музыка Ю.А., Оганесян Ю.Ц., Околович В.Н., Пашкевич В.В., Русанов А.Я., Саламатин В.С., Смиренкин Г.Н., Чубарян Г.Г. Деление возбужденных ядер с $Z^2/A = 20-33$: массово-энергетические распределения осколков, угловой момент и капельная модель. // ЯФ. 1995. Т.58. С.2140-2165.
- [17]. Адеев Т.Д., Гончар И.И., Пашкевич В.В. и др. Диффузионная модель формирования распределений осколков деления. // ЭЧАЯ.1988. Т.19. С.1229-1298.
- [18]. Krappe H.J., Nix J.R., Sierk A.J. Unified nuclear potential for heavy-ion-elastic scattering, fusion, fission and ground-state masses and deformation. // Phys. Rev. 1979. V.C20.P.992-1013.
- [19]. Itkis M.G., Okolovich V.N., Rusanov A.Ya., Smirenkin G.N. Preactinide nuclei fission asymmetry. // Z. Phys. 1985.V.A320. P.431-441.; Иткис М.Г., Околович В.Н., Русанов А.Я., Смиренкин Г.Н. Энергетические распределения осколков деления доактинидных ядер и гипотеза о независимых способах деления. // ЯФ. 1985. Т.41. С.1109-1122.
- [20] Иткис М.Г., Околович В.Н., Русанов А.Я., Смиренкин Г.Н. Симметричное и асимметричное деление ядер легче тория. // ЭЧАЯ. 1988. Т.19. С.701-784.
- [21]. Itkis M.G., Oganessian Yu.Ts., Chubarian G.G., Galinsky V.G., Ivanov G.N., Ivanova I.B., Kondratiev N.A., Kozulin E.M., Salamatin V.S., Smirnova E.M. The DEMAS-3 Experimental Setup // JINR Scientific Report, 1995, p.179.
- [22]. Пашкевич В.В. Структура барьера деления ядер в районе тория. // Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов. Алушта, апрель 1983, Дубна, ОИЯИ, 1983. С.405-419.
- [23]. Britt H.C., Wegner H.E., Gursky J.C. Energetics of charged particle-induced fission reactions. // Phys. Rev. 1963.V.129. P.2239-2252.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 октября 2001 года.

Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 24.10.2001

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 1,12

Тираж 100. Заказ 52918

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области