

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

15-96-80

На правах рукописи  
УДК 539.17, 539.12.122

П-573

ПОПЕКО  
Галина Сергеевна

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПАР  
ОСКОЛКОВ  
И ХАРАКТЕРИСТИКИ СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ  $^{252}\text{Cf}$

Специальность: 01.04.16 — физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

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

Научные руководители:

доктор физико-математических наук  
профессор

Г.М. Тер-Акопьян

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник

А.В. Даншэль

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
профессор

В.Г. Калинин

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник

А.А. Говердовский

Ведущая организация:

Радиовый институт, г. С.-Петербург

Защита диссертации состоится "\_\_\_" авг 1996 года  
в "\_\_\_" час на заседании специализированного совета Д.047.01.03 при  
Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (г.Дубна Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "15" марта 1996 года

Ученый секретарь Специализированного совета  
доктор физико-математических наук

Ю.А. Батусов

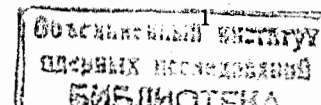
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Изучение ядерного деления и по сегодняшний день привлекает внимание исследователей и является одним из актуальных направлений исследований ядерной физики. Благодаря анализу огромного объема экспериментальных данных достигнуто значительное понимание основных свойств процесса деления ядра. Характеристики ядерного деления, такие как массовые распределения осколков, распределения полной кинетической энергии и множественности мгновенных нейтронов интерпретируются, главным образом, на основе двух феноменологических подходов, которые основаны на исследовании поверхности ядерной потенциальной энергии в многомерном пространстве деформаций и на применении статистической модели, рассматривающей вероятность реализации различных конфигураций ядра в точке разрыва.

Однако не все стороны деления могут быть объяснены этими моделями. Для понимания процесса деления требуются знания не только статических, но и динамических свойств ядерной материи для широкой области деформаций. Развитие экспериментальной техники позволило получить данные, интерпретация которых вплотную связана с динамикой деления[1]. Исследования низкоэнергетического деления, выполненные в последние годы, изучение каналов деления, а также подробные исследования зарядовых распределений осколков, четно-нечетных эффектов в выходах осколков, дисперсий изобарных распределений поставили новые вопросы перед физикой деления. Так как существующие модели, претендующие на описание динамики деления, дают противоречивые результаты, для решения ряда проблем: о вязкости ядерной материи, проявляющейся при движении ядра из седловой точки к точке разрыва, о взаимодействии моды деления с другими коллективными степенями свободы ядра (дипольными колебаниями, коллективными движениями в направлении перпендикулярном основной моде деления) необходимы новые экспериментальные данные о низкоэнергетическом делении ядер.

Одним из новых подходов для изучения ядерного деления является измерение множественных  $\gamma$ -квантов, испущенных коррелированными парами осколков. Проведение таких исследований стало возможным с развитием современной техники измерения  $\gamma$ -квантов - высокоэффективных  $4\pi$   $\gamma$ -спектрометров высокого разрешения, а также благодаря



накопленному экспериментальному материалу о схемах уровней осколков деления ядер.

Целью настоящей работы явилась разработка нового подхода к исследованию деления, заключающегося в изучении совпадающих характеристических  $\gamma$ -квантов, испущенных коррелированными парами осколков, и получение новых, более детальных характеристик спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$ : независимых выходов пар осколков деления и данных о заселенностях уровней вблизи праств линии для осколков, образующих эти пары.

Научная новизна работ, составивших диссертацию, заключается в следующем:

1. Разработан новый подход к изучению низкоэнергетического деления, заключающийся в исследовании совпадающих характеристических  $\gamma$ -квантов, испущенных коррелированными парами осколков.

2. Разработана новая методика оценки интенсивностей фотопиков в сложном двумерном спектре  $\gamma - \gamma$  совпадений.

3. Впервые получены независимые выходы 135 пар нуклидов для пяти разделений по зарядам  $^{252}\text{Cf}$ .

4. Впервые получены распределения множественности нейтронов для пяти разделений по зарядам  $^{252}\text{Cf}$  и обнаружено, что 70% событий деления с испарением семи и более нейтронов при четном разделении по зарядам происходят при Ва-Мо разделении  $^{252}\text{Cf}$ .

5. Впервые измерены в зависимости от полного числа испаренных нейтронов интенсивности переходов между уровнями близкими к праств линии и получены средние угловые моменты, наблюдаемых уровней осколков:  $^{104}\text{Mo}$ ,  $^{144}\text{Ba}$ ,  $^{138}\text{Xe}$  и  $^{140}\text{Xe}$ .

#### Практическая ценность.

1. Практическая значимость работы иллюстрируется возможностями разработанной методики исследования деления по совпадающим  $\gamma$ -квантам для получения новых характеристик низкоэнергетического и спонтанного деления ядер.

2. Полученные новые систематические данные о выходах пар осколков деления и о заселенностях уровней осколков, образующих пары, могут использоваться для проверки различных моделей и для построения новых теоретических моделей деления ядер.

3. Методика измерения совпадающих характеристических  $\gamma$ -квантов, испущенных коррелированными парами осколков деления, может быть

применена для анализа состава делящихся материалов.

#### На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Методика измерения интенсивностей фотопиков в сложном двумерном спектре  $\gamma - \gamma$  совпадений.

2. Данные о независимых выходах 135 пар осколков спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$ .

3. Распределения множественности нейтронов для пяти разделений по зарядам  $^{252}\text{Cf}$ .

4. Данные об интенсивностях переходов между уровнями вблизи праств линии и о средних угловых моментах, наблюдаемых уровнях осколков:  $^{104}\text{Mo}$ ,  $^{144}\text{Ba}$ ,  $^{138}\text{Xe}$  и  $^{140}\text{Xe}$  в зависимости от полного числа испущенных нейтронов при их образовании.

#### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 90 страниц машинописного текста, включая 18 рисунков, 18 таблиц и библиографический список из 122 наименований.

#### Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались:

на совещании "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра", Санкт-Петербург, июнь 1995 г.;

на международной конференции "Exotic Nuclei and Atomic Masses", Arles, France, June 1995;

на международной конференции "Physics from Large  $\gamma$ -Ray Detector Arrays", Berkeley, USA, August 1994;

на международной Гордоновской конференции "Nuclear Chemistry", New London, USA, June 1995;

на международной школе-семинаре по физике тяжелых ионов, ОИЯИ, Дубна, май 1993 г.;

на 12 совещании по физике деления ядер, Обнинск, Россия, 1993 г.;

на международной конференции "Dynamical Aspects of Nuclear Fission", Smolence, June 1993;

на международной конференции "Nuclear Fission and Fission - Product Spectroscopy", Grenoble, France, 1994;

на международной конференции EPS XV Nucl. Phys. Div. Conf. "Low Energy Nuclear Dynamics", St. Petersburg, Russia, August 1995.

## Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах. Исследования были выполнены в период 1992-1995 г.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненных в диссертации исследований, сформулирована цель работы, отмечены новые полученные результаты, изложены основные положения, которые выносятся на защиту, и приводится краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе сделан краткий обзор некоторых результатов исследований низкоэнергетического деления ядер. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований характеристик ядерного деления и основные теоретические модели, которые используются для описания различных сторон процесса деления и объяснения экспериментальных результатов. Отмечается ряд противоречий существующих между положениями различных моделей. В заключение делается вывод о необходимости новых, более детальных экспериментальных исследованиях ядерного деления.

Во второй главе приведено описание спектрометрической системы 4π γ - детекторов Ок-Риджской национальной лаборатории, на которой были выполнены измерения совпадающих γ-квантов при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$ , и методов обработки спектров γ-γ совпадений.

Спектрометрическая система состояла из 20 германиевых детекторов с антикомптоновской защитой. Детекторы располагались в виде сферы, в центр которой помещался исследуемый источник. Геометрическая эффективность системы составляла ~10%, энергетическое разрешение - 2.5 КэВ для γ-квантов с энергией 1.3 МэВ, параметр, характеризующий эффективность антикомптоновской защиты, составлял величину 0.55. Герметически закрытый источник  $^{252}\text{Cf}$  давал  $5 \times 10^4$  делений в секунду. Время торможения осколков в источнике не превышало  $10^{-12}$  с. Все зарегистрированные события с множественностью γ-квантов, равной двум и выше, записывались на магнитную ленту событие за событием. В эксперименте было накоплено  $2 \times 10^9$  таких событий.

Из исходных данных был сформирован двумерный спектр γ-γ совпадений ( $E_{\gamma_1} \times E_{\gamma_2} = 4096 \times 4096$  каналов). При построении двумерного

спектра события с множественностью γ-квантов  $N > 2$  отображались несколькими точками. Время совпадений составляло 200 нсек.

Результаты настоящей работы были получены из обработки этого сложного двумерного спектра, который содержал несколько десятков тысяч фотопиков. Для получения физической информации необходимо было произвести точные оценки интенсивностей фотопиков и корректно учесть фон. Фон в двумерном спектре γ-γ совпадений имел сложную структуру и состоял из двух компонент: фоновых гребней, параллельных осям  $E_{\gamma_1}$  и  $E_{\gamma_2}$ , и гладкого фона. Фоновые гребни образуются при регистрации совпадающих γ-квантов, когда один γ-квант поглотился в Ge-детекторе в результате фотоэффекта, а второй γ-квант испытал комптоновское рассеяние. Гладкий фон создается в результате регистрации двух γ-квантов испытавших комптоновское рассеяние.

Фон любой локальной области двумерного спектра зависит от интенсивностей и энергий γ-квантов более высоких энергий, а также от геометрии детектирующей системы и эффективности комптоновской защиты, поэтому для корректных оценок интенсивностей фотопиков анализировалась вся область двумерного спектра возле исследуемого пика. В работе были выполнены два варианта оценок интенсивностей фотопиков γ-γ совпадений. В первом варианте проводились непосредственные измерения фона в окрестности исследуемого пика. Для этой цели делался ряд срезов двумерного спектра параллельных осям ( $E_{\gamma_1}$ ,  $E_{\gamma_2}$ ), и интенсивность фотопика находилась из анализа одномерных спектров срезов этих срезов.

Второй способ определения интенсивностей фотопиков заключался в аппроксимации небольших участков двумерного спектра ( $25 \times 25$  каналов) аналитической функцией. Для исследуемого участка двумерного спектра формировались его проекции на оси и в спектрах проекций находились центры тяжести всех имеющихся пиков. Форма γ-линий описывалась гауссовским распределением. С найденными значениями центров пиков и известными дисперсиями строилась аппроксимирующая функция, которая состояла из суммы трех компонент: первая компонента описывала фотопик, вторая - фоновые гребни и третья - гладкий фон. Параметры функции: амплитуды при экспонентах и коэффициенты гладкого фона находились методом наименьших квадратов. На основе этого метода определения интенсивностей фотопиков

была создана программа автоматической обработки двумерного спектра FIT-2S. Весь двумерный спектр разбивался на небольшие области и каждая область аппроксимировалась двумерной функцией. Полная обработка включала несколько просмотров спектра с последовательным сдвигом начала просмотра. В результате была получена таблица всех найденных фотопиков  $\gamma - \gamma$  совпадений, для которых указаны координаты ( $E_{\gamma_1}, E_{\gamma_2}$ ) и интенсивности.

Для проверки точности полученных оценок интенсивностей фотопиков  $\gamma - \gamma$  совпадений использовались различные подходы. Один из способов проверки был основан на общих свойствах деления ядер. Эффективной оказалась проверка соотношений между интенсивностями совпадающих  $\gamma$ -переходов, которые следуют из общих свойств каскада  $\gamma$ -квантов, испускаемых четно-четными ядрами при девозбуждении вращательных и квазивращательных полос. Кроме того надежность наших данных проверялась сравнением интенсивностей  $\gamma$ -переходов для различных осколков, которые были измерены в настоящей работе, с аналогичными данными, имеющимися в литературе.

В третьей главе приведены результаты измерений выходов пар вторичных осколков для пяти разделений по зарядам  $^{252}\text{Cf}$ , полученные изотопные распределения осколков, распределения множественности нейтронов, элементные выходы осколков и значения средних чисел нейтронов, испаренных из осколков, в зависимости от ядерного заряда осколков.

В работе были определены независимые выходы 135 пар нуклидов, соответствующие пяти разделениям по зарядам  $^{252}\text{Cf}$ :

$$Z_L/Z_H = 46/52(\text{Pd-Te}), \quad 44/54(\text{Ru-Xe}), \quad 42/56(\text{Mo-Ba}), \\ 40/58(\text{Zr-Ce}), \quad 38/60(\text{Sr-Nd}).$$

Выходы пар осколков с четными значениями массовых чисел определялись из интенсивностей  $\gamma - \gamma$  совпадений, обусловленных  $\gamma$ -переходами  $2^+ \rightarrow 0^+$  в каждом из ядер. В том случае, когда один из парных осколков имел нечетное значение массы, рассматривалась сумма интенсивностей  $\gamma - \gamma$  совпадений, образуемых  $\gamma$ -переходом  $2^+ \rightarrow 0^+$  в А-четном ядре и всеми  $\gamma$ -переходами, ведущими в основное состояние, в А-нечетном осколке. В случае двух А-нечетных осколков рассматривалась сумма интенсивностей  $\gamma - \gamma$  совпадений по всем возможным комбинациям  $\gamma$ -переходов, ведущих в основное состояние в каждом из осколков.

ТАБЛИЦА 1. Независимые выходы Ва-Мо пар осколков при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$ .  
Выходы осколков даны в процентах на одно деление.

	$^{138}\text{Ba}$	$^{140}\text{Ba}$	$^{141}\text{Ba}$	$^{142}\text{Ba}$	$^{143}\text{Ba}$	$^{144}\text{Ba}$	$^{145}\text{Ba}$	$^{146}\text{Ba}$	$^{147}\text{Ba}$	$^{148}\text{Ba}$
$^{102}\text{Mo}$					.02(2)	.04(3)	.09(6)	.13(5)	.10(7)	.06(4)
$^{103}\text{Mo}$		.05(3)	.07(2)	.02(2)	.13(9)	.67(10)	.86(20)	.46(8)	.4(3)	.12(9)
$^{104}\text{Mo}$	.08(3)	.18(4)	.34(4)	.36(4)	.48(10)	1.14(4)	.74(15)	.39(4)	.23(17)	.04(3)
$^{105}\text{Mo}$	.02(2)	.07(5)	.11(4)	.65(10)	1.05(25)	1.30(11)	.59(17)	.13(7)	.23(15)	
$^{106}\text{Mo}$	.01(1)	.12(3)	.44(3)	.92(4)	.88(10)	.65(4)	.16(8)	.08(5)		
$^{107}\text{Mo}$	.02(2)	.12(4)	.11(3)	.35(16)	.14(8)	.13(8)	.15(7)			
$^{108}\text{Mo}$	.02(1)	.06(3)	.10(3)	.14(5)	.12(10)	.06(5)				
$\Sigma Y_{\text{Ba}}$	.15(6)	.60(9)	1.17(10)	2.44(20)	2.8(3)	3.99(19)	2.6(3)	1.21(14)	.96(37)	.22(10)
$\bar{\nu}_{\text{Ba}}$	9.5(1.5)	6.5(10)	5.6(6)	4.3(4)	3.7(5)	3.4(2)	2.9(4)	2.3(3)	1.4(5)	1.1(5)

Интенсивности совпадающих переходов находились по интенсивностям соответствующих фотопиков после учета эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов детекторами и вероятности внутренней конверсии ядерных уровней.

Независимые выходы пар осколков были получены в результате нормировки измеренных относительных выходов с использованием литературных экспериментальных данных о независимых выходах изотопов  $^{138,140}\text{Xe}$ ,  $^{142,144,146}\text{Ba}$  и  $^{146,148}\text{Ce}$  при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$ [2].

В таблице 1 представлены независимых выходов пар нуклидов для Ва-Мо разделения  $^{252}\text{Cf}$ . Такие детальные распределения осколков деления измерены впервые для пяти разделений по зарядам  $^{252}\text{Cf}$ . Имеющаяся в литературе информация о массовых распределениях осколков и о распределении множественности нейтронов соответствует интегральным характеристикам деления. Из таблиц выходов пар нуклидов для пяти разделений по зарядам  $^{252}\text{Cf}$  были получены, путем суммирования данных таблиц по строчкам и по столбцам, изотопные распределения для десяти элементов, которые представлены на рисунке 1. Недостающие в таблицах выходы пар осколков были дополнены линейной интерполяцией поверхности выходов пар осколков. Таким образом для Ва-Мо разделения были получены выходы пар осколков с  $^{139}\text{Ba}$ . В работе проведено сравнение полученных изотопных распределений с данными компиляционной работы[3]. В предпоследней строчке таблицы 1 представлены независимые выходы различных изотопов бария, в последней строчке даны средние величины чисел испаренных нейтронов при образовании этих изотопов.

Исследуемые пары осколков образуются после испарения определенного числа мгновенных нейтронов из первичных осколков. Поэтому просуммировав выходы пар осколков, соответствующие 0, 1, 2 и т.д. эмиссии нейтронов, мы получили распределения множественности нейтронов для пяти разделений по зарядам  $^{252}\text{Cf}$ , которые представлены на рисунке 2. Вероятности испарения  $n$ -нейтронов ( $P_n$ ) даны в относительных единицах. Для исследуемых разделений по зарядам, которые составляют  $\sim 40\%$  от всех делений  $^{252}\text{Cf}$ , около 70% событий с испарением семи и более нейтронов происходят при Ва-Мо разделениях.

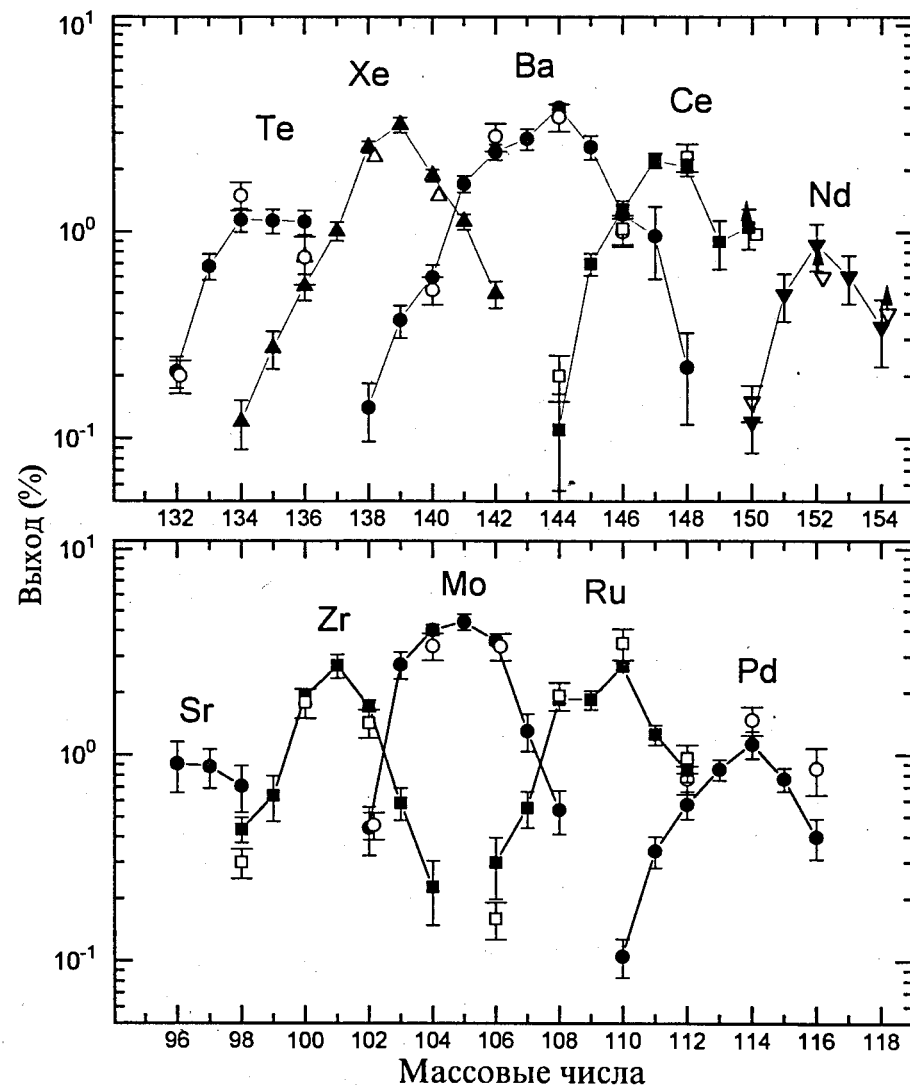


Рис.1 Изотопные распределения осколков деления  $^{252}\text{Cf}$ . Сплошными символами представлены результаты настоящей работы, открытыми символами - независимые выходы осколков, полученные в раб.[2].

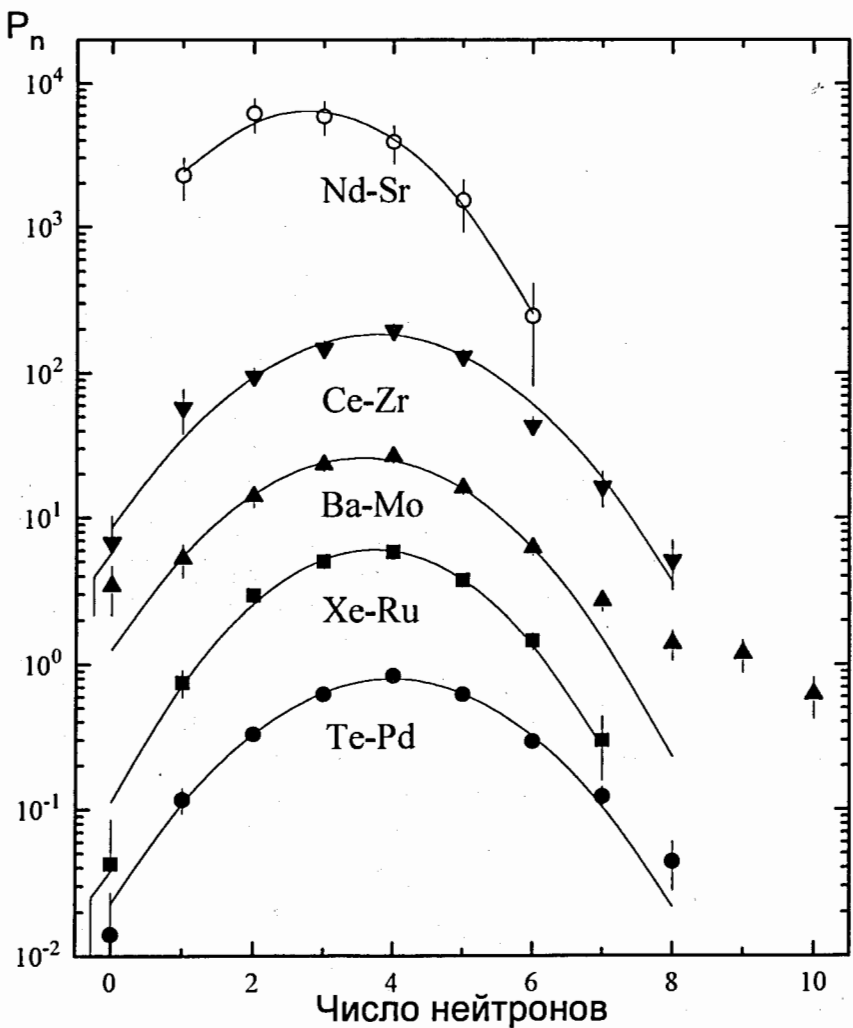


Рис.2 Распределения множественности нейтронов для пяти разделений по зарядам  $^{252}\text{Cf}$ . Линиями изображены результаты аппроксимации экспериментальных точек гауссовскими кривыми. Вероятности испарения нейтронов ( $P_n$ ) даны в относительных единицах.

Выполнено сравнение элементных выходов, полученных суммированием таблиц выходов пар осколков, с аналогичными данными, измеренными в других работах.

Определены значения средних чисел нейтронов, испаренных из осколков ( $\bar{\nu}(Z)$ ), в зависимости от ядерного заряда осколков. Полученные результаты изображены на рисунке 3. На этом же рисунке представлены величины средних полных чисел испаренных нейтронов ( $\bar{\nu}_{tot}$ ) в зависимости от ядерного заряда тяжелого осколка, которые были найдены из измеренных распределений множественности нейтронов (рис. 2), в сравнении с результатами работы [4].

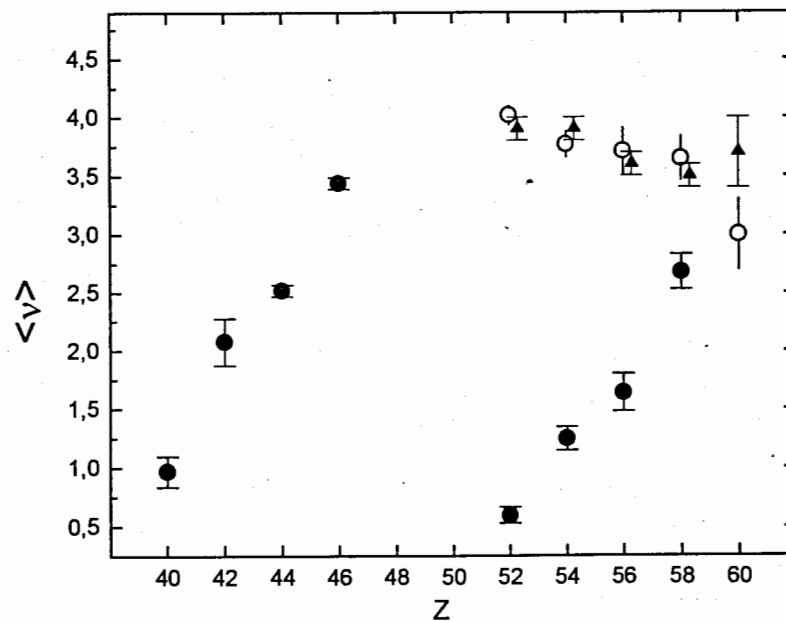


Рис.3 Зависимость величины среднего числа нейтронов, испаренных из осколков, от заряда осколков: сплошными кружками изображены результаты настоящей работы.

Зависимость полного среднего числа испаренных нейтронов для пяти разделений по зарядам  $^{252}\text{Cf}$  от ядерного заряда тяжелого осколка: открытыми кружками даны результаты настоящей работы, треугольниками - результаты работы [4].

Наблюдаемые пары вторичных осколков образуются в результате девозбуждения первичных осколков, и поэтому полученные в наших экспериментах таблицы выходов пар вторичных осколков содержат информацию о массовых и энергетических распределениях первичных осколков. Наши данные позволяют проверять предсказания различных теорий, а также извлечь распределения первичных осколков строя гипотезы о характере этих распределений.

В работе получены параметры массовых и энергетических распределений первичных осколков: Xe–Ru, Ba–Mo и Ce–Zr в результате анализа таблиц выходов пар вторичных осколков. Анализ был выполнен в предположении, что массы и энергии первичных осколков распределены по гауссу. Для Xe–Ru и Ce–Zr разделений экспериментальные данные хорошо описываются одной модой деления, для которой найденные величины  $\overline{TKE}$  близки к известным значениям  $\overline{TKE}$  при спонтанном делении  $^{252}Cf$ . Для описания данных Ba–Mo разделения потребовалось предположить, что кроме обычной моды деления с  $\overline{TKE}_1 = 189$  МэВ существует вторая мода деления, которая имеет значительно меньшую величину полной кинетической энергии осколков ( $\overline{TKE}_2 = 153$  МэВ) и дает значительный вклад в формирование самых легких пар вторичных Ba–Mo осколков.

В четвертой главе дан краткий обзор результатов исследований угловых моментов осколков деления. Отмечено, что изучение совпадающих  $\gamma$ -квантов, испущенных из двух одновременно образовавшихся осколков, является хорошим способом исследования угловых моментов осколков, так как позволяет получить наиболее полную информацию, характеризующую угловые моменты осколков.

Представлены результаты измерений интенсивностей переходов между уровнями вблизи краев линии для изотопов:  $^{138}Xe$ ,  $^{140}Xe$  и  $^{144}Ba$ , когда эти изотопы образуются в парах с различными дополнительными осколками, соответственно, Ru и Mo, то есть после испарения различного числа нейтронов из первичных осколков ( $\nu_{tot}$ ). По измеренным интенсивностям  $\gamma$ -переходов были определены заселенности уровней осколков:  $^{138}Xe$ ,  $^{140}Xe$ ,  $^{144}Ba$  и получены средние значения спинов, наблюдаемых уровней ( $\langle I_\gamma \rangle$ ), в зависимости от числа испаренных нейтронов (см. рис.4). Из представленных на рисунке 4 зависимостей следует, что для исследуемых тяжелых осколков величины угловых моментов, уносимых  $\gamma$ -квантами, мало зависят от числа испа-

ренных нейтронов, то есть от энергии возбуждения первичных осколков. Регулярные колебания спинов ( $\langle I_\gamma \rangle$ ), по-видимому, отражают изменения спинов первичных осколков в зависимости от их массы, так как зависимости спинов ( $\langle I_\gamma \rangle$ ) от числа испаренных нейтронов определялись для одних и тех же ядер. После учета угловых моментов, уносимых мгновенными нейтронами, наши данные позволяют сделать вывод о росте угловых моментов первичных осколков Xe и Ba с увеличением их энергии возбуждения, что находится в согласии с предсказаниями существующих моделей формирования спина осколков[5].

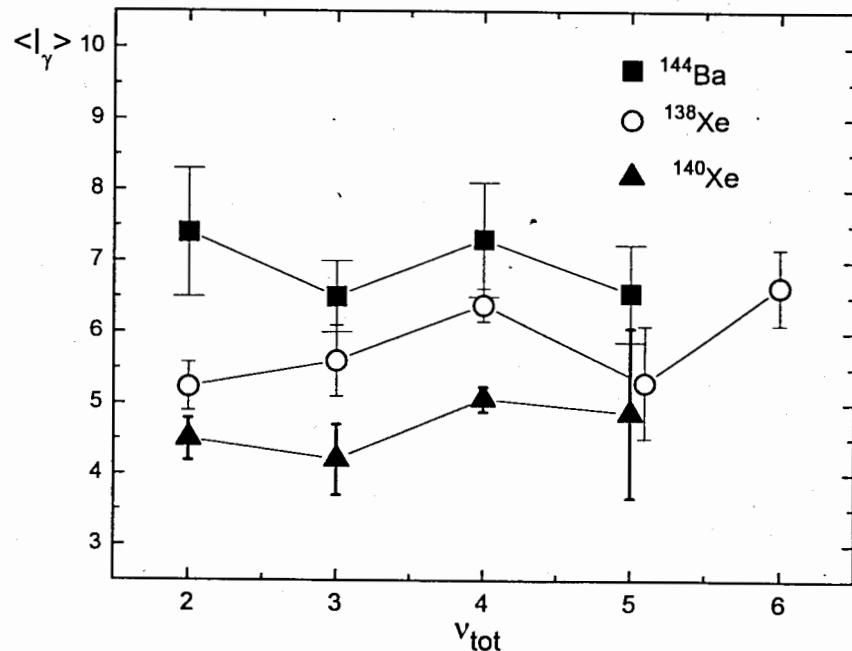


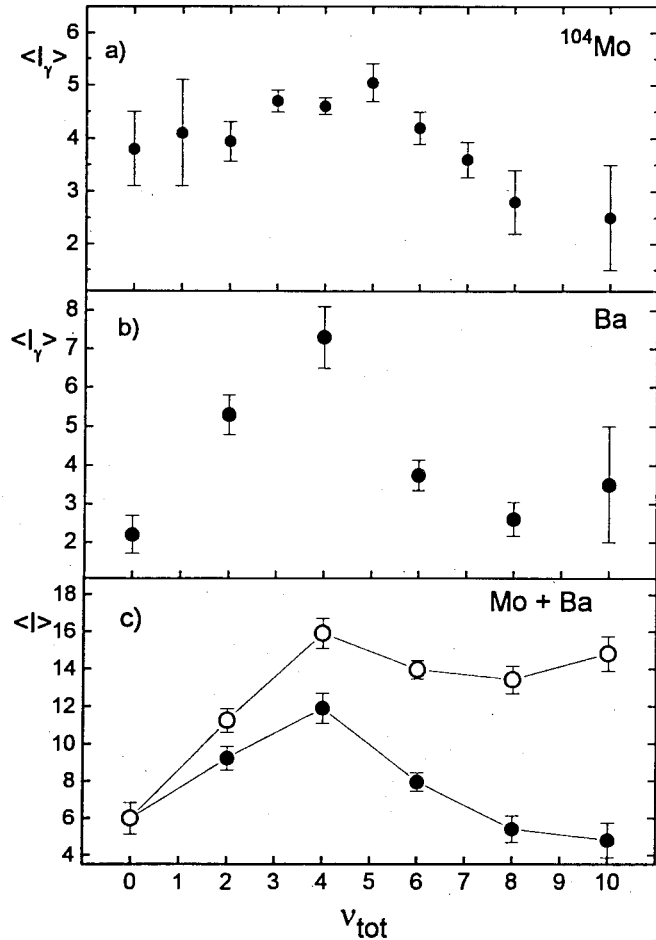
Рис.4 Зависимости угловых моментов, уносимых  $\gamma$ -квантами, для осколков:  $^{138}Xe$ ,  $^{140}Xe$  и  $^{144}Ba$  от числа нейтронов, испаренных из первичных осколков при образовании этих изотопов.

Интенсивности переходов между возбужденными уровнями были также измерены для  $^{104}Mo$  при образовании этого осколка с различными изотопами бария ( $A_{Ba} = 138-148$ ) и для четных изотопов бария, которые образуются в парах с  $^{104}Mo$ .



Массовые числа дополнительных осколков Ba

148 147 146 145 144 143 142 141 140 139 138



**Рис.5** Значения средних угловых моментов, наблюдаемых уровней осколков  $^{104}\text{Mo}$  (рис. а) и дополнительных к ним осколков Ba (рис. б), образовавшихся после испарения различного числа нейтронов ( $\nu_{tot}$ ) из первичных осколков. На рис. с) даны суммарные угловые моменты пар осколков Mo - Ba: сплошными кружками -  $\langle I_\gamma \rangle_{Mo} + \langle I_\gamma \rangle_{Ba}$ , открытыми кружками - средние угловые моменты первичных осколков.

Полученные из измеренных интенсивностей переходов средние величины угловых моментов, наблюдаемых уровней  $^{104}\text{Mo}$  и изотопов Ba, в зависимости от числа нейтронов, испаренных из первичных осколков при образовании исследуемых пар, представлены на рисунках 5а и 5б. Как видно из этих рисунков, для этих осколков рост углового момента ( $\langle I_\gamma \rangle$ ) с увеличением множественности нейтронов наблюдается в диапазоне от 0 до 5. Для осколков, образованных после испарения более пяти нейтронов, уменьшаются заселенности уровней с высоким спином, то есть уменьшается  $\langle I_\gamma \rangle$  с ростом  $\nu_{tot}$ . Учет углового момента, уносимого испаренными нейтронами, изменяет эту зависимость (см. рис. 5с). При  $\nu_{tot} > 5$  угловой момент первичных осколков остается примерно постоянным. Мы предполагаем, что такое поведение угловых моментов может быть связано с проявлением двух мод деления при Ba-Mo разделении  $^{252}\text{Cf}$ . При  $\nu_{tot} > 6$ , то есть при больших энергиях возбуждения первичных осколков, спин, уносимый нейтронами, превышает долю спина, уносимого  $\gamma$ -квантами.

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработана, исследована и применена методика обработки сложного двумерного спектра  $\gamma$ - $\gamma$  совпадений. Корректные оценки интенсивностей фотопиков были получены благодаря тщательному учету фона в окрестности исследуемого пика, образованного как совпадающими  $\gamma$ -квантами, энергия которых не полностью выделилась в детекторе, так и событиями, в которых энергия одного  $\gamma$ -кванта полностью поглотилась в детекторе, а второй  $\gamma$ -квант испытал комптоновское рассеяние. Были выполнены два варианта оценки интенсивностей фотопиков. В первом варианте проводились измерения фона в окрестности исследуемого пика. Второй вариант заключался в аппроксимации небольших участков двумерного спектра аналитической функцией. Точность и надежность полученных оценок интенсивностей фотопиков проверена сопоставлением наших данных об интенсивностях переходов между возбужденными уровнями для различных осколков с аналогичными данными, имеющимися в литературе, и путем установления согласия наших данных с результатами, вытекающими из общих свойств каскада  $\gamma$ -квантов, испускаемых четно-четными ядрами при девозбуждении уровней вращательных и квазивращательных по-

лос.

2. Впервые получены независимые выходы 135 пар нуклидов, которые образуются при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$ . Эти пары соответствуют пяти разделениям по зарядам  $^{252}\text{Cf}$ :

$$Z_L/Z_H = 46/52(\text{Pd-Te}), 44/54(\text{Ru-Xe}), 42/56(\text{Mo-Ba}), 40/58(\text{Zr-Ce}), 38/60(\text{Sr-Nd}).$$

Надежность данных была установлена путем сравнения изотопных распределений и элементных выходов осколков с литературными данными.

3. Впервые получены распределения множественности нейтронов для пяти зарядовых разделений  $^{252}\text{Cf}$ . Распределения множественности нейтронов непосредственно следуют из данных о выходах пар осколков. Первые моменты полученных распределений (средние числа нейтронов) для Pd-Te, Ru-Xe, Mo-Ba и Zr-Ce разделений по зарядам хорошо согласуются с результатами других работ.

4. Впервые обнаружено, что 70% событий деления с испарением семи и более нейтронов при четном разделении по зарядам происходит при Ba-Mo разделении  $^{252}\text{Cf}$ .

5. Получены средние величины чисел нейтронов, испаренных из осколков, в зависимости от ядерного заряда осколков.

6. Впервые измерены в зависимости от полного числа испаренных нейтронов интенсивности переходов между уровнями вблизи ирраст линии и получены средние значения угловых моментов осколков ( $\langle I_\gamma \rangle$ ):  $^{104}\text{Mo}$ ,  $^{144}\text{Ba}$ ,  $^{138}\text{Xe}$  и  $^{140}\text{Xe}$ . Полученные результаты для осколков  $^{144}\text{Ba}$ ,  $^{138}\text{Xe}$  и  $^{140}\text{Xe}$  согласуются с имеющимися представлениями о росте спина первичных осколков с увеличением их энергии возбуждения. Данные об угловых моментах  $^{104}\text{Mo}$ -Ba пар дают более сложную зависимость угловых моментов первичных осколков от их энергии возбуждения.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Study of  $^{252}\text{Cf}$  Spontaneous Fission  $\gamma$ -Rays with a 20 Ge Detector Ball at NHIRF. Butler-Moore K., Zhu S., Zhao X., Hamilton J.H., Ramayya A.V., Lu Q., Ma W.-C., Peker L.K., Kormicki J., Deng J.K., Gore P., Shi D., Jones E.F., Xie H., Gao W.B., Cole J.D., Aryaeinejad R., Lee I.Y., Johnson N.R., McGowan F.K., Bemis C.E., Ter-Akopian G.M.,

Oganessian Yu. Ts., Popeko G.S. // Heavy Ion Physics, Scientific Report, JINR E7-93-57, Dubna 1992, p. 61-62.

2. Insights into Nuclear Structure and the Fission Process from Spontaneous Fission. Hamilton J.H., Butler-Moore K., Ramayya A.V., Ma W.-C., Zhao X., Lu Q., Kormicki J., Shi D., Deng J.K., Zhu S., Cole J.D., Aryaeinejad R., Greenwood R.C., Harrill S.S., Lohstreter N.D., Ter-Akopian G.M., Oganessian Yu. Ts., Popeko G.S., Daniel A.V., Kliman J., Polhorsky V., Morhac M., Lee I.Y., Johnson N.R., and McGowan F.K. // Proc. Int. School-Seminar on Heavy Ion Physics, Dubna, Russia, 1993. / JINR, Dubna, 1993, v. 1, p. 276-293.

3. Yields of Correlated Fragment Pairs in spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$ . Ter-Akopian G.M., Oganessian Yu. Ts., Popeko G.S., Daniel A.V., Hamilton J.H., Butler-Moore K., Ramayya A.V., Ma W.-C., Kormicki J., Lu Q., Cole J.D., Aryaeinejad R., Kliman J., Polhorsky V., Morhac M., Johnson N.R., Lee I.Y., and McGowan F.K. // Bull. American. Phys. Soc., V. 38, n.9, 1993, p.1806.

4. Yields of Correlated Fragment Pairs and Neutron Multiplicities in Spontaneous Fission of  $^{252}\text{Cf}$ . Kliman J., Polhorsky V., Morhac M., Ter-Akopian G.M., Oganessian Yu. Ts., Popeko G.S., Daniel A.V., Hamilton J.H., Butler-Moore K., Ramayya A.V., Ma W.-C., Kormicki J., Lu Q., Babu B.R.S., Cole J.D., Aryaeinejad R., Lee I.Y., McGowan F.K., // Proc. Conf. "Nuclear Fission and Fission - Product Spectroscopy", Grenoble, France, 1994. / Institut Max von Laue Paul Langevin, eds. H.Faust and G.Fioni, 1994, p. 210-216.

5. Neutron Multiplicities in Spontaneous Fission and Nuclear Structure Studies. Hamilton J.H., Kormicki J., Lu Q., Shi D., Butler-Moore K., Ramayya A.V., Ma W.-C., Babu B.R.S., Ter-Akopian G.M., Oganessian Yu. Ts., Popeko G.S., Daniel A.V., Zhu S., Wang M.G., Kliman J., Polhorsky V., Morhac M., Cole J.D., Aryaeinejad R., Greenwood R.C., Johnson N.R., Lee I.Y., and McGowan F.K. // Proc. Conf. Frontier Topics in Nuclear Physics, 1994. / eds. W. Scheid and A. Sandulescu, Plenum Press, New York, 1994, p. 101-112.

6. Correlated Yields and Emission of Neutrons of Mo/Ba Fragments from  $^{252}\text{Cf}$  (sf). Kliman J., Polhorsky V., Morhac M., Ter-Akopian G.M., Oganessian Yu. Ts., Popeko G.S., Daniel A.V., Hamilton J.H., Butler-Moore K., Ramayya A.V., Ma W.-C., Zhao X., Lu Q., Shi D., Deng J.K., Kormicki J., Zhu S., Cole J.D., Aryaeinejad R., Greenwood R.C., Harrill

S.S., Lohstreter N.D., Lee I.Y., Johnson N.R., and McGowan F.K. // Материалы XII совещания по физике деления ядер, Обнинск, Россия, 1993. / Ядерная физика, т. 57, 1994, с. 1174-1177.

7. Neutron Multiplicities and Yields of Correlated Zr-Ce and Mo-Ba Fragment Pairs in Spontaneous Fission of  $^{252}\text{Cf}$ . Ter-Akopian G.M., Hamilton J.H., Oganessian Yu. Ts., Kormicki J., Popeko G.S., Daniel A.V., Ramayya A.V., Butler-Moore K., Ma W.-C., Deng J.K., Shi D., Kliman J., Polhorsky V., Morhac M., Greiner W., Sandulescu A., Cole J.D., Aryaeinejad R., Johnson N.R., Lee I.Y., and McGowan F.K. // Phys. Rev. Lett., v. 73, 1994, p. 1477-1480.

8. Zero Neutron Emission in Spontaneous Fission of  $^{252}\text{Cf}$ : a Form of Cluster Radioactivity. Hamilton J.H., Ramayya A.V., Kormicki J., Ma W.-C., Lu Q., Shi D., Deng J.K., Zhu S.J., Sandulescu A., Greiner W., Ter-Akopian G.M., Oganessian Yu. Ts., Popeko G.S., Daniel A.V., Kliman J., Polhorsky V., Morhac M., Cole J.D., Aryaeinejad R., Johnson N.R., Lee I.Y., and McGowan F.K. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., v. 20, 1994, p. L85-L89.

9. Study of  $^{252}\text{Cf}$  Spontaneous Fission  $\gamma$ -Rays with a 20 Ge Detector Ball at HHIRF. Kliman J., Polhorsky V., Morhac M., Butler-Moore K., Zhao X., Hamilton J.H., Ramayya A.V., Peker L.K., Kormicki J., Gore P., Jones E.F., Cole J.D., Aryaeinejad R., Lee I.Y., Johnson N.R., McGowan F.K., Bemis C.E., Ter-Akopian G.M., Oganessian Yu. Ts., Popeko G.S., Daniel A.V. // Proc. Second Int. Conf. on Dynamical Aspects of Nuclear Fission, Smolenice, 1993. / JINR E7-94-19, Dubna, 1994, p. 254-257.

10. A New Spontaneous Fission Mode for  $^{252}\text{Cf}$  Hyperdeformation and Clustre Radioactivity. Hamilton J.H., Ter-Akopian G.M., Oganessian Yu. Ts., Daniel A.V., Kormicki J., Popeko G.S., Ramayya A.V., Lu Q.-H., Butler-Moore K., Ma W.-C., Cwiok S., Nazarewicz W., Greiner W., Sandulescu A., Deng J.K., Shi D., Kliman J., Morhac M., Cole J.D., Aryaeinejad R., Johnson N.R., Lee I.Y., McGowan F.K., Saladin J.X. // EPS XV Nucl. Phys. Div. Conf. on Low Energy Nuclear Dynamics, St. Petersburg, Russia, 1995 / eds. Yu.Ts. Oganessian, W.von Oertzen, R. Kalpakchieva; World Scientific, Singapore, 1995, p. 187-199.

11. Выходы коррелированных пар осколков спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$ . Тер-Акопьян Г.М., Гамильтон Дж., Оганесян Ю.Ц., Даниэль А.В., Кормицки Я., Попеко Г.С., Рамайя А.В., Лу К., Батлер-Моор К., Ма И.-С., Денг К., Ши С., Климан Й., Морхач М., Коул Дж. Д.,

Арьяейнеяд Р., Зу С., Бабу Р., Джонсон Н.П., Лу П., МакГоуэн Ф.К. // В матер. совещания "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра", С.-Петербург, 1995. / Известия Академии Наук, сер. физ., 1996, т. 60, n.1, с. 162-168.

#### Цитируемая литература

1. Gönnewein F. Mass, Charge and Kinetic Energy of Fission Fragment // The Nuclear Fission Process. Ed. - C. Wagemans. CRC Press, Boca Raton, USA. 1991. p. 287-475.

2. Cheifetz E., Wilhelm J.B., Jared R.c., and Thompson S.G. // Phys. Rev., v. 4, 1971, p. 1913-1926.

3. Wahl A.C. // Atomic Data and Nuclear Data Tables, v. 39, 1988.

4. Nifenecker H., Signarbieux C., Babinet R., Poitou J. // Proc. Symp. "Phys. and Chem. of Fission" Rochester, 1973. / IAEA, Vienna, 1974, v.2, p. 117-178.

5. D. De Frenne. Mass, Charge and Kinetic Energy of Fission Fragment // The Nuclear Fission Process. Ed. - C. Wagemans. CRC Press, Boca Raton, USA. 1991. p. 476-489.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 марта 1996 года.