

15-99-115

На правах рукописи  
УДК 539.173, 539.17.015

К-658

КОПАЧ  
Юрий Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ УГЛОВОЙ  
АНИЗОТРОПИИ В ДЕЛЕНИИ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1999

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка  
Объединенного института ядерных исследований, Дубна.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук  
ведущий научный сотрудник

Попов А.Б.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
профессор

Иткис М.Г.

доктор физико-математических наук  
ведущий научный сотрудник

Корнилов Н.В.

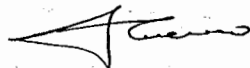
Ведущая организация: Российский научный центр "Курчатовский  
институт", Институт общей и ядерной физики, Москва

Защита диссертации состоится "8" июля 1999 г. в 15 часов  
на заседании специализированного совета Д 047.01.05 при Лабора-  
тории нейтронной физики им. И.М. Франка и Лаборатории ядерных ре-  
акций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследова-  
ний, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "27" апреля 1999 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

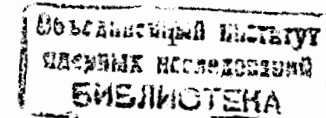


Попеко А.Г.

Актуальность проблемы. Как экспериментальные исследования, так и теоретические работы показывают, что угловые распределения продуктов деления неизотропны. В случае осколков наблюдается асимметрия вылета по отношению к направлению спина делящегося ядра, направлению нейтронного пучка или направлению нейтронной поляризации. В тройном делении  $\alpha$ -частицы фокусируются преимущественно в плоскости, перпендикулярной оси деления. Нейтроны и  $\gamma$ -кванты также демонстрируют наличие выраженной анизотропии по отношению к оси деления. Большинство из наблюдаемых эффектов уже имеет качественное теоретическое объяснение. Тем не менее количественный анализ угловых распределений продуктов деления в ряде случаев представляет собой достаточно сложную задачу и дает дополнительную уникальную информацию, необходимую для понимания фундаментальных свойств процесса деления. В то же время существует ряд эффектов, в частности в тройном делении, которые до сих пор не имеют даже качественного объяснения.

Одним из первых нетривиальных эффектов анизотропии в делении, на который было обращено внимание экспериментаторов и теоретиков, — это угловая анизотропия осколков по отношению к направлению спина делящегося ядра. Оказалось, что данные по угловой анизотропии осколков являются практически единственным источником информации об относительных вероятностях прохождения деления через тот или иной боровский канал. Более того, в терминах  $S$ -матричного формализма описания сечения нейтронно-индуцированного деления в резонансной области без информации об угловых распределениях осколков деления оказывается вообще невозможным получить однозначный набор резонансных параметров. Таким образом, измерения зависимости угловой анизотропии осколков от энергии налетающего нейтрона в области малых энергий дают дополнительные уравнения для извлечения  $s$ -волновых делительных амплитуд.

Еще одним интересным эффектом является наличие довольно больших угловых моментов (спинов) у осколков даже в случае спонтанного деления чётно-чётных ядер, спин которых в основном состоянии равняется нулю.



Более того, данные по угловой анизотропии  $\gamma$ -квантов свидетельствуют о том, что спины осколков преимущественно выстроены в плоскости, перпендикулярной оси деления. Были выдвинуты две модели, в принципе позволяющие объяснить механизм образования и выстраивания спинов: модель кулоновского "закручивания" деформированных осколков после разрыва и модель коллективных мод движения ядерного вещества в момент разрыва, переходящих впоследствии в угловые моменты осколков. Несмотря на обилие экспериментальных и теоретических работ, в настоящее время нет окончательной ясности в том, какой из возможных механизмов является преобладающим.

Особенно интересным представляется исследование угловой анизотропии  $\gamma$ -излучения в тройном делении, так как в этом случае кроме оси деления появляется еще одно выделенное направление — направление движения легкой заряженной частицы. И хотя сама частица не является источником  $\gamma$ -излучения и из-за малости ее массы, по-видимому, существенно не влияет на поведение системы в момент разрыва, тем не менее направление ее вылета может быть определенным образом скоррелировано с угловыми моментами осколков. Наблюдение или ненаблюдение такой корреляции в  $\gamma$ -излучении может привести нас к более полному пониманию механизма формирования спинов.

Анизотропия вылета нейтронов в делении связана с их кинематической фокусировкой по направлению движущихся осколков, из которых эти нейтроны испускаются. Именно кинематическая фокусировка позволяет определить число нейтронов, испущенных из легкого и из тяжелого осколка. Однако не только осколки могут быть источниками нейтронов в делении. Например, в тройном делении возможно образование короткоживущих нейтронно-нестабильных частиц, время жизни которых сравнимо с временем ускорения этих частиц в общем кулоновском поле. Нейтроны из таких частиц будут фокусироваться по направлению их движения, т.е. перпендикулярно к оси деления, что может быть исследовано экспериментально. По количеству испущенных нейтронов можно оценить выходы таких экзотических частиц в тройном делении. Кроме того, исследование таких процессов может дать дополнительную уникальную информацию о динамике процес-

са деления в момент, близкий к разрыву.

Основная цель работы кратко может быть сформулирована следующим образом: анализ угловых корреляций продуктов деления для получения новой информации о фундаментальных свойствах процесса деления, что включает в себя:

- Извлечение и анализ  $s$ -волновых резонансных параметров из нейтронных сечений и энергетической зависимости угловой анизотропии осколков деления  $^{235}\text{U}$ .
- Получение новой информации о механизме формирования и выстраивания спинов осколков в делении из анализа угловых корреляций  $\gamma$ -квантов в двойном и тройном делении  $^{252}\text{Cf}$ .
- Дополнение систематики выходов легких заряженных частиц в тройном делении за счет нейтронно-нестабильных изотопов гелия.

Научная новизна и практическая ценность. В данной работе впервые была получена детальная зависимость угловой анизотропии осколков деления от энергии налетающего нейтрона в довольно широком диапазоне энергий (0.4 – 20 эВ), что позволило получить набор  $s$ -волновых резонансных параметров для  $^{235}\text{U}$  на основе нового теоретического подхода, учитывающего интерференцию резонансов с различными спинами в дифференциальном сечении деления. Средние вклады каналов  $J^\pi K = 3^-0, 3^-1$  и  $3^-2$  в делении оказались сравнимыми, что ставит под сомнение физическую обоснованность принятого в ENDF/B двух-канального формата для описания резонансных параметров.

Впервые исследованы угловые корреляции  $\gamma$ -квантов и легких заряженных частиц в тройном делении. Отсутствие разницы в анизотропии  $\gamma$ -излучения по отношению к оси деления и отсутствие какой-либо анизотропии по отношению к направлению вылета тройной частицы ставит перед теоретиками вопрос о механизме формирования спинов осколков.

В тройном делении, помимо наблюдавшегося ранее образования ядер  $^5\text{He}$ , впервые наблюдалось испускание нейтронов из нестабильного изотопа  $^7\text{He}$ , а также предположительно эмиссия нейтронов из  $^8\text{Li}$  в возбужденном

состоянии. Впервые достаточно надежно определены выходы нейтронно-нестабильных изотопов гелия. Сильное различие в экспериментальных выходах и теоретических оценках может привести к пересмотру существующих теорий тройного деления. Нейтроны из легких заряженных частиц являются добавкой (хотя и весьма небольшой:  $\sim 1$  нейтрон на 1500 делений) к осколочным нейтронам в делении  $^{252}\text{Cf}$ , используемым в качестве стандарта.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты:

1. Впервые получена детальная энергетическая зависимость коэффициента анизотропии осколков  $A_2(E)$  в делении выстроенных ядер  $^{235}\text{U}$  резонансными нейтронами в диапазоне энергий 0.4 – 20 эВ.

2. Впервые получен набор  $s$ -волновых резонансных параметров  $^{235}\text{U}$  в трех-канальном приближении. Впервые в анализе был учтен эффект интерференции резонансов с различными спинами в дифференциальном сечении деления.

3. На основании исследования статистических характеристик набора резонансных параметров получены грубые оценки вкладов боровских каналов в делении. Впервые доказан существенный вклад канала  $J^\pi K = 3^-0$ .

4. Угловые распределения  $\gamma$ -квантов по отношению к оси деления в двойном и тройном делении  $^{252}\text{Cf}$  исследованы с высокой точностью в эксперименте на установке *Crystal Ball*. Разница в анизотропии между двойным и тройным делением пренебрежимо мала, что противоречит двум предыдущим работам.

5. Впервые исследована угловая анизотропия  $\gamma$ -квантов по отношению к направлению  $\alpha$ -частицы в тройном делении. Отсутствие какой-либо анизотропии в пределах статистической точности ставит перед теоретиками вопрос о механизме формирования спинов осколков.

6. Впервые исследованы угловые корреляции  $\gamma$ -квантов в тройном делении, сопровождаемом испусканием  $^3\text{H}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $\text{Li}$  и  $\text{Be}$ .

7. Исследована эмиссия нейтронов из легких заряженных частиц в тройном делении. Впервые наблюдалось испускание нейтронов из нестабильного изотопа  $^7\text{He}$ , а также предположительно эмиссия нейтронов из  $^8\text{Li}$  в воз-

бужденном состоянии. Впервые экспериментально получены и исследованы полные угловые распределения нейтронов из LCP.

8. Систематика выходов изотопов гелия в тройном делении  $^{252}\text{Cf}$  дополнена выходами нестабильных изотопов  $^5\text{He}$  и  $^7\text{He}$ . Сравнительно высокие относительные выходы нечетных изотопов объяснены влиянием спиновых статистических факторов образующихся частиц.

#### Апробация работы и публикации.

Результаты, представленные в работе, были доложены на международных конференциях и семинарах: NDST 1997 в Триесте (Италия), ISINN 4-6 в Дубне, DANF-96, DANF-98 в Словакии, "Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei" 1997, Sanibel Island, Florida, II Int. Workshop of Fission and Fission Fragment Spectroscopy, Франция. Основные результаты опубликованы в 6 печатных работах, приведенных в конце автореферата.

#### Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, десяти глав и заключения. Первые шесть глав составляют часть I диссертации, последние четыре — часть II. Диссертация содержит 111 страниц машинописного текста, включающих в себя 15 таблиц, 43 рисунка и список литературы из 104 наименований.

## 2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении определена актуальность и значимость изучаемых в работе проблем. Описана структура диссертации, представлена информация об апробации работы, основные публикации, составившие содержание диссертации и положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается краткий обзор экспериментальных и теоретических работ, касающихся угловых распределений осколков деления в резонансной области и описания нейтронных сечений с помощью многоуровневого формализма.

В ряде работ было продемонстрировано, что в рамках общепринятого подхода к описанию сечений невозможно получить однозначный набор резонансных параметров из одних только интегральных нейтронных сечений.

Включение в подгонку данных по угловой анизотропии осколков деления, несущих информацию о  $K$  зависимости сечения деления, дает дополнительное уравнение, в принципе позволяющее избежать неоднозначности в извлечении делительных амплитуд. Такие данные были получены Паттенденом и Постмой в начале 70-х годов, однако их принципиальным недостатком было отсутствие детального энергетического хода коэффициента  $A_2$  (были получены только значения, усредненные по резонансам и по широким межрезонансным интервалам). М. Муром и др. была предпринята попытка включить эти данные в анализ для извлечения информации о  $K$  каналах, однако этот анализ оказался не вполне корректным, так как в нем не учитывались эффекты интерференции между резонансами с различными значениями спинов, присутствующие в дифференциальной части сечения деления, и были учтены только два делительных канала, в то время как из теоретических оценок следовало, что для спина  $J = 3$  могут быть открыты три канала:  $K = 0, 1$  и  $2$ . Эти соображения обосновывают потребность в новых экспериментальных данных и в более тщательном анализе.

Во второй главе кратко сформулированы основные положения теории нейтронно-индуцированного деления, сформулированные А.Л. Барабановым и В.И. Фурманом в наиболее полном и корректном виде. Авторами была получена обобщенная формула Блатта-Биденхарна, которая представляет собой общее выражение для дифференциального сечения деления ориентированных ядер под действием поляризованных нейтронов. Используя представление спиральности, авторы установили взаимосвязь между каналами Бора и S-матричным формализмом теории ядерных реакций, получив таким образом строго обоснованный математический формализм для описания деления ядер под действием медленных нейтронов. Важным элементом этой теории является наличие интерференции между уровнями с разными значениями спинов в дифференциальном сечении деления, что не учитывалось в предыдущих работах.

В третьей главе описывается методика проведения эксперимента по определению энергетической зависимости коэффициента угловой анизотропии  $A_2$  на выстроенных ядрах  $^{235}\text{U}$ .

Для выстраивания ядер урана использовались кристаллы уранил-

рубидиевого нитрата  $\text{UO}_2\text{Rb}(\text{NO}_3)_3$  (УРН). При охлаждении кристаллов до сверхнизких температур ( $\sim 0.1$  K) спины ядер урана выстраиваются в плоскости, перпендикулярной С-оси монокристалла. Кристаллы выращивались из естественной смеси урана, после чего от них отрезались пластинки толщиной  $\sim 3$  мм, на которые наращивался тонкий монокристаллический слой УРН с обогащенным  $^{235}\text{U}$ , содержащий также малую добавку  $^{233}\text{U}$ . По анизотропии  $\alpha$ -частиц из  $^{233}\text{U}$  определялась температура образцов и выстроенность ядер  $^{235}\text{U}$ . Было приготовлено два образца, представляющие собой мозаики общей площадью 24 и 20 см<sup>2</sup> и с толщинами рабочих слоев  $\sim 0.3$  и 1.2 мг/см<sup>2</sup>, соответственно. Для охлаждения образцов до температур порядка 0.1 K использовался рефрижератор растворения  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ , принцип действия которого описан. Осколки деления и  $\alpha$ -частицы регистрировались шестью кремневыми детекторами, расположенными под углами  $0^\circ, 45^\circ$  и  $90^\circ$  по отношению к "средней" С-оси каждого из образцов. В пучке также находился тонкий неориентируемый слой  $^{235}\text{U}$  с детектором осколков и  $\alpha$ -частиц для мониторинга пучка.

Описана система сбора данных, позволяющая проводить *on-line* сортировку накапливаемой информации в семь амплитудных и семь время-пролетных спектров (по числу детекторов). В программе накопления был предусмотрен оперативный контроль входной информации, позволяющий следить за стабильностью работы детекторов и аппаратуры.

Приведены экспериментальные условия на 30-метровой базе 5-го пучка бустера ИБР-30 + ЛУЭ-40.

В четвертой главе представлена процедура первичной обработки экспериментальных данных.

В каждом цикле измерения проводились при двух температурах: при низкой ( $T_1 \simeq 0.1$  K) и при "высокой" ( $T_2 \simeq 1$  или 4 K), когда выстроенность пренебрежимо мала. Взяв отношение отсчетов  $N$  каждого из детекторов при двух температурах можно получить величину анизотропии, избежав при этом влияния телесного угла и полного сечения деления. Если это отношение еще и разделить на отношение отсчетов мониторингового детектора  $M$ , то таким образом также учтется влияние возможных флуктуаций

интенсивности нейтронного пучка:

$$\frac{N(\theta, T_1) / M(T_1)}{N(\theta, T_2) / M(T_2)} \simeq 1 + \Delta f_2(T_1, T_2) \cdot A_2 \cdot \langle P_2(\cos \theta) \rangle. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta f_2(T_1, T_2)$  — разница в выстроенностях ядер мишени при двух температурах,  $A_2$  — искомый коэффициент угловой анизотропии и  $\langle P_2(\cos \theta) \rangle$  — значение полинома Лежандра, усредненное по телесному углу, под которым данный детектор “видит” образец. Среднее значение  $A_2$  по трем детекторам для каждого из двух образцов определялось методом наименьших квадратов. Искалось значение  $A_2$ , наилучшим образом удовлетворяющее уравнению (1) при  $\theta = 0^\circ, 45^\circ$  и  $90^\circ$  с учетом статистической ошибки левой части и систематической погрешности в определении  $\langle P_2(\cos \theta) \rangle$ . Средние значения полиномов Лежандра для каждого из детекторов вычислялись методом Монте-Карло. Температура образцов и, соответственно, выстроенность  $\Delta f_2(T_1, T_2)$  определялась по анизотропии  $\alpha$ -частиц из  $^{233}\text{U}$ .

Точность определения абсолютной величины  $A_2$  ограничена систематической погрешностью константы сверхтонкой связи  $P$ . Однако относительный энергетический ход коэффициента  $A_2$  может быть получен с гораздо более высокой точностью, определяемой в основном статистикой. Поэтому оказалось удобным положить

$$A_2(E) = a_2(E) \cdot \langle A_2 \rangle, \quad (2)$$

где  $a_2(E)$  — нормированная на 1 функция, характеризующая искомую зависимость  $A_2$  от энергии нейтрона, а  $\langle A_2 \rangle$  — нормировочный множитель, представляющий собой среднее значение  $A_2$  в исследуемом интервале энергий, взвешенное по сечению деления и потоку нейтронов. Значение  $\langle A_2 \rangle$  определялось из ур-я (1), в котором отсчеты всех детекторов суммировались по полному окну временного кодировщика. Среднее значение  $\langle A_2 \rangle$  по всем циклам равняется  $-1.71 \pm 0.35$ . Ошибка здесь в основном определяется погрешностью в определении выстроенности ядер  $^{235}\text{U}$ , связанной с неточностью знания константы сверхтонкой связи  $P$ . Энергетическая зависимость  $a_2(E)$  определялась из модифицированного уравнения:

$$\frac{N(\theta, T_1, E)}{N(\theta, T_2, \Delta E_{min}^{max})} \simeq I(E) \cdot [1 + \Delta f_2(T_1, T_2) \cdot \langle A_2 \rangle \cdot a_2(E) \cdot \langle P_2(\cos \theta) \rangle] \quad (3)$$

Отсчеты детекторов при “холодных” измерениях ( $T_1$ ) брались в малых временных интервалах, соответствующих энергетическим интервалам 0.05 эВ, а при “теплых” ( $T_2$ ) — в широком энергетическом интервале, соответствующем полному окну временного кодировщика, поэтому в правой части уравнения появляется дополнительный множитель  $I(E)$ , который с точностью до константы есть произведение сечения деления на поток нейтронов с учетом функции разрешения. Значения  $a_2(E)$  определялись методом минимизации  $\chi^2$ -функционала по трем детекторам для каждого из образцов по параметрам  $a_2(E)$  и  $I(E)$  с фиксированными  $\langle A_2 \rangle$  для каждого цикла. В последующем анализе использовались  $A_2(E)$ , полученные в соответствии с определением (2) с помощью средневзвешенных по всем циклам величин  $a_2(E)$  и среднего значения  $\langle A_2 \rangle = -1.71$  без учета его систематической ошибки, не зависящей от энергии. Полученные данные представлены на рис. 1 в сравнении с данными Паттендена и Постмы.

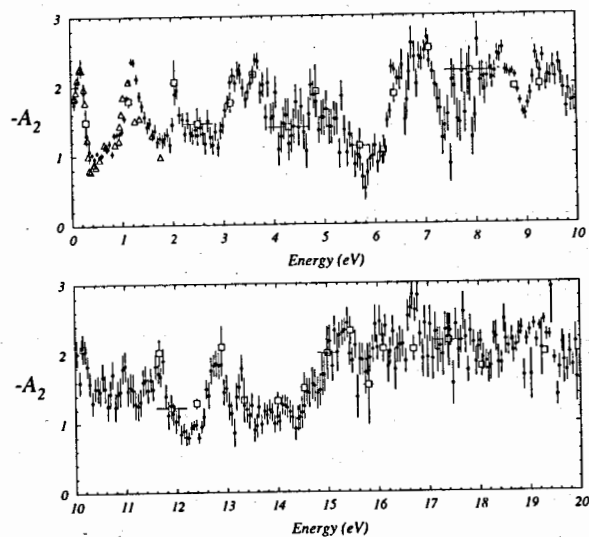


Рис. 1: Экспериментальные данные  $A_2(E)$ . Точки — настоящая работа, квадраты и треугольники — данные Паттендена и Постмы.

В этой главе также описана процедура определения и вычитания фона во время-пролетных спектрах. Форма фоновой кривой была определена в отдельном измерении с набором из пяти “черных” фильтров — Co, W, Ag, Rh и Cd. Во время рабочих измерений в пучке постоянно находились

два фильтра, Со и Cd, имеющие “черные” резонансы на противоположных краях рабочего диапазона энергий. По двум резонансным провалам определялась и вычиталась из спектра фоновая кривая в каждом измерении. Кроме того, кадмиевый фильтр обеспечивал защиту от рециклических нейтронов из реактора.

В пятой главе описана процедура извлечения резонансных параметров из экспериментальных данных. Дается краткое описание программы SAMMY, позволяющей проводить совместный анализ различных типов сечений на основе Рейх-Муровского многоуровневого многоканального подхода. В качестве метода нахождения набора параметров, наилучшим образом описывающих экспериментальные данные, использовался Байесовский метод, позволяющий проводить последовательную подгонку нескольких наборов данных одним и тем же набором параметров, передавая ковариационную матрицу из каждой предыдущей итерации в последующую.

Программа позволяет учитывать доплеровское уширение резонансов и функцию разрешения время-пролетного спектрометра. Стандартная версия SAMMY позволяла учитывать только два делительных канала для каждого спина. Кроме того, в ней отсутствовала возможность описания дифференциального сечения деления, т.е.  $A_2(E)$ . Автором настоящей работы были внесены соответствующие изменения и дополнения в программу, позволяющие включать в подгонку до трех каналов для каждого спина, а также был заложен формализм описания  $A_2(E)$ .

Кроме данных по энергетической зависимости коэффициента угловой анизотропии  $A_2(E)$ , полученных в настоящей работе, для анализа были отобраны данные по полному и спиново-разделенным сечениям деления и по полному нейтронному сечению, измеренные с приемлемой точностью и энергетическим разрешением в низкоэнергетической области. Данные брались из Брукхейвенского национального центра по ядерным данным (NNDC).

В шестой главе приводятся и обсуждаются полученные результаты. Представлены подгоночные кривые, описывающие все анализируемые сечения и энергетический ход  $A_2$ . Приведена таблица полученных резонансных параметров до энергии 20 эВ в сравнении с параметрами из других ра-

бот, полученными с учетом только двух каналов деления. Полные ширины для большинства резонансов оказываются близкими, тогда как парциальные амплитуды деления отличаются достаточно сильно ввиду различного характера анализируемых данных и разного числа учитываемых каналов деления.

Приведены разложения полного, спиново-разделенных сечений деления и  $A_2(E)$  на  $K$ -компоненты, а также показан вклад в  $A_2(E)$  той его части, которая соответствует интерференции резонансов с разными спинами. Вклады в сечения отдельных  $K$ -компонент сильно меняются от резонанса к резонансу и имеют весьма различающуюся энергетическую зависимость для разных  $K$ , при этом вклад  $3-0$  компоненты весьма существенный. Энергетическая зависимость коэффициента анизотропии заметно отличается от соответствующей зависимости сечения деления и может иметь энергетический ход даже внутри “изолированного” резонанса, что обусловлено сильной межрезонансной интерференцией. Это заставляет сделать вывод, что приближение изолированных уровней, использованное Паттенденом и Постмой, является не вполне корректным и его неправомерно использовать для количественного анализа.

Таблица 1: Степени открытия  $K$ -каналов

Тип сечения	$K = 0$	$K = 1$	$K = 2$
$\sigma_{f0}^3$	0.32	0.33	0.35
$\sigma_{f0}^4$	-	0.56	0.44
$\sigma_{f0}$	0.14	0.46	0.40

Из имеющегося набора резонансных параметров получены грубые оценки степени открытия различных каналов деления, ассоциированных с данным квантовым числом  $K$ , определенные как

$$\frac{1}{N_\lambda} \sum_\lambda \frac{\Gamma_{f,K}^\lambda}{\Gamma_f^\lambda}, \quad (4)$$

где суммирование ведется по всем положительным резонансам,  $N_\lambda$  — число резонансов. Результаты для полного и спиново-разделенного сечений

представлены в табл. 1. Отсюда можно сделать качественный вывод, что все низколежащие незапрещенные каналы в делении открыты. Кажущаяся подавленность канала  $K = 0$  в полном сечении обусловлена запретом по четности состояния  $J^{\pi}K = 4^{-}0$ . Для количественных утверждений о степени открытия этих каналов необходим анализ данных в более широком энергетическом интервале.

На основе полученного набора резонансных параметров построены интегральные распределения делительных ширин. Для всех каналов распределения парциальных ширин хорошо согласуются с Портер-Томасовскими распределениями с одной степенью свободы. Распределения полных ширин близки к кривым  $\chi^2$  с  $\nu = 2$  и 3.

Исследовано влияние неопределенности в абсолютном значении  $A_2$  на полученные результаты. Для этого экспериментальные данные  $A_2(E)$  домножались на коэффициенты  $C=0.85$  и  $1.15$ , после чего проводилась стандартная процедура подгонки с включением всех других сечений. Наиболее чувствительной к таким изменениям нормировки оказалась  $K = 0$  компонента. Тем не менее средние вклады  $K$ -каналов на участке  $0 - 20$  эВ меняются незначительно, причем вклад канала  $K = 0$  остается существенным.

В седьмой главе описаны основные особенности процесса тройного деления, представляющего собой распад ядра на два тяжелых осколка с испусканием легкой заряженной частицы (LCP — *Light Charged Particle*). Вероятность такого процесса по сравнению с обычным двойным делением  $3 \div 6 \times 10^{-3}$  для разных актинидов. Около 90% всех легких заряженных частиц в тройном делении составляют  $\alpha$ -частицы. Одной из основных особенностей тройного деления является тот факт, что тройная частица образуется в районе шейки в момент разрыва и вылетает под углом, близким к  $90^\circ$  по отношению к оси деления, что обусловлено фокусировкой под действием общего кулоновского поля двух осколков.

В восьмой главе описывается многопараметрический эксперимент по изучению спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$ , выполненный в Германии на установке *Crystal Ball*. Благодаря использованию уникальных детекторных систем, в одном эксперименте удалось с хорошей точностью и высокой статистикой

измерить в совпадении практически все характеристики продуктов деления: массы, энергии и направления вылета двух осколков деления; заряд, массу, энергию и направление вылета легкой заряженной частицы; множественность, энергию и угловые распределения мгновенных  $\gamma$ -квантов; множественность и угловые распределения нейтронов деления.

Приведены основные характеристики спектрометра *Crystal Ball* (CB), представляющего собой 4 $\pi$  установку, состоящую из 162 кристаллов *NaI* с общей эффективностью  $> 95\%$  для  $\gamma$ -квантов и около  $60\%$  для нейтронов. Для регистрации осколков деления использовалась двойная ионизационная камера, установленная внутри CB спектрометра. Источник  $^{252}\text{Cf}$  с интенсивностью  $4 \times 10^3$  делений/сек. был установлен в центре катода ионизационной камеры. Катод был разделен на четыре сектора, сигналы с которых снимались независимым образом, что позволило определять как полярный, так и азимутальный угол вылета осколков. Одна из половинок ионизационной камеры была окружена кольцом из 12  $\Delta E - E$  телескопов, предназначенных для регистрации легких заряженных частиц. Угол вылета частицы определялся по положению телескопа.

Описаны основные особенности процедуры первичной обработки экспериментальных данных, включающей в себя калибровку *Crystal Ball* спектрометра, разделение нейтронов и  $\gamma$ -квантов по времени пролета, определение энергий, масс и углов вылета осколков деления в двойной ионизационной камере, идентификацию легких заряженных частиц.

В девятой главе представлены результаты по угловой анизотропии  $\gamma$ -квантов в двойном и тройном делении.

Для изучения угловых корреляций все данные были отсортированы в так называемую "динамическую" систему координат, привязанную к заряженным продуктам деления (см. рис. 2). Ось  $z$  была выбрана вдоль направления движения легкого осколка, ось  $x$  лежала в плоскости, образованной двумя осколками и LCP ортогонально к оси  $z$ , и ее положительное направление выбиралось близким к направлению LCP, и ось  $y$  строилась перпендикулярно плоскости  $zx$ , образуя правую систему координат  $xuz$ . Направление вылета  $\gamma$ -квантов и нейтронов задавалось с помощью двух углов:  $\theta_z$  и  $\phi_{zy}$ .



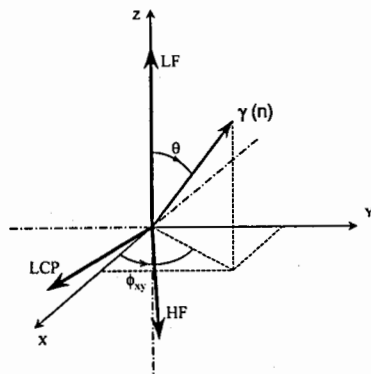


Рис. 2: Система координат для анализа угловых распределений  $\gamma$ -квантов и нейтронов.

Для тщательного анализа угловых распределений  $\gamma$ -квантов были устранены возможные примеси нейтронов в спектре  $\gamma$ -излучения путем установки более узкого окна во время-пролетном спектре, введена поправка на отсутствующие кристаллы (5 из 162), а также учтено влияние углового разрешения СВ спектрометра, определенного с помощью программы GEANT.

Угловое распределение  $\gamma$ -квантов с мультипольностью  $\leq 2$  в системе центра масс описывается набором четных полиномов Лежандра до четвертой степени:

$$W(\theta) = 1 + A_2 P_2(\cos \theta) + A_4 P_4(\cos \theta) \quad (5)$$

Экспериментальные угловые распределения  $\gamma$ -квантов в двойном делении и для различных мод тройного деления показаны на рис. 3, слева. Для легких частиц разница в анизотропии  $\gamma$ -квантов между двойным и тройным делением практически отсутствует, что противоречит результатам двух предыдущих работ. В делении, сопровождаемом испусканием *Li* и *Be* наблюдалось некоторое отклонение от кривой, соответствующей двойному делению, что может быть объяснено усилением четно-нечетных эффектов в осколках. Справа на том же рисунке представлены проекции угловых распределений  $\gamma$ -квантов на плоскость, перпендикулярную к оси деления, но в которой лежит вектор импульса тройной частицы (направление обозначено стрелкой). Во всех случаях в пределах статистических ошибок отсутствует

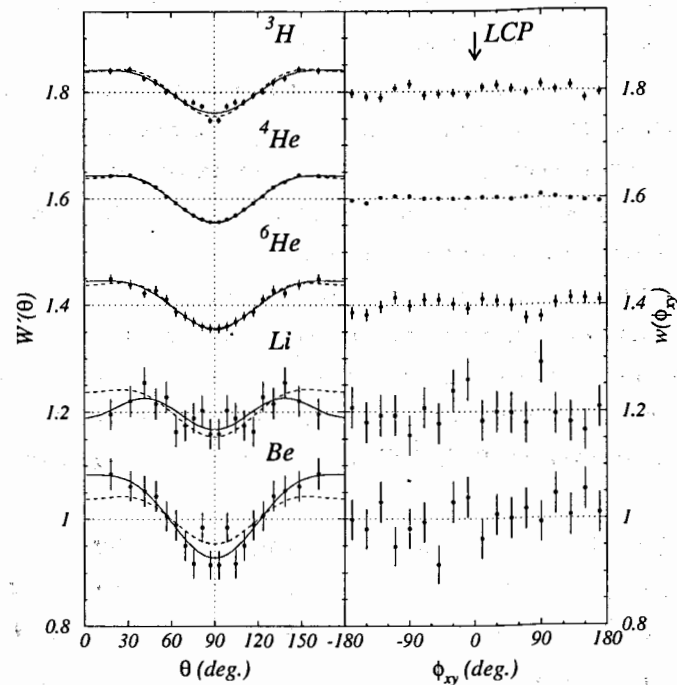
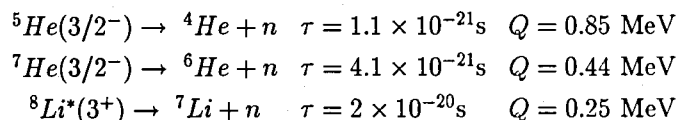


Рис. 3: Слева: Угловые распределения  $\gamma$ -квантов ( $E_\gamma = 0.1 - 1.5$  МэВ) в системе центра масс для различных мод тройного деления. Сплошные кривые соответствуют подгонкам по формуле (5). Пунктирная линия соответствует угловому распределению в двойном делении. Справа: Проекция угловых распределений на плоскость  $xz$ , перпендикулярную оси деления. Шкала по оси  $Y$  соответствует нижнему графику; остальные последовательно смещены на 0.2 единицы.

какая-либо корреляция направлений вылета  $\gamma$ -квантов с направлением движения тройной частицы. Так как угловая анизотропия  $\gamma$ -квантов является следствием выстроенности спинов осколков, то данный результат, в свою очередь, исключает корреляцию механизма выстраивания спинов с механизмом испускания легких заряженных частиц в тройном делении. Наиболее простое объяснение полученному результату может быть дано в рамках модели формирования спинов за счет кулоновского возбуждения. Для более полного понимания механизма необходимы усилия теоретиков.

В десятой главе исследуется испускание нейтронов из легких заряженных частиц. В делении, сопровождаемом испусканием  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{He}$  и  $\text{Li}$  наблюдалось усиление нейтронной интенсивности по направлению движения частицы, в то время как при эмиссии  ${}^3\text{H}$  и  $\text{Be}$  такого усиления не наблюдается. Предполагается, что дополнительные нейтроны являются следствием образования и последующего распада в течение очень короткого времени, сравнимого со временем ускорения в кулоновском поле, нейтронно-нестабильных изотопов  ${}^5\text{He}$  и  ${}^7\text{He}$ , а также  ${}^8\text{Li}$  во втором возбужденном состоянии:



Для анализа этих процессов были построены проекции угловых распределений нейтронов на плоскость  $xy$ , перпендикулярную к оси деления (см. рис. 2). В этой плоскости нейтроны из осколков распределены почти изотропно (имеется слабое отклонение от изотропности из-за неколлинеарности вылета осколков, обусловленной моментом отдачи тройной частицы). Точные формы угловых распределений нейтронов из осколков были определены методом Монте-Карло на основе известных данных по энергиям нейтронов в системе центра масс осколков. Формы угловых распределений нейтронов, вылетающих из тройных частиц, были сгенерированы также методом Монте-Карло из траекторных расчетов с учетом времени жизни и  $Q$  реакции распада нестабильных частиц, а также с учетом функции углового разрешения СВ спектрометра. Экспериментальные угловые распределения

фитировались двумя полученными кривыми, для которых форма фиксировалась, а в качестве подгоночного параметра брался только нормировочный множитель. По количеству избыточных нейтронов, соответствующих площади под кривой нейтронов из тройной частицы, были определены относительные выходы этих нестабильных изотопов в тройном делении:

$$\frac{Y({}^5\text{He})}{Y({}^4\text{He})} = 0.23(5) \quad \frac{Y({}^7\text{He})}{Y({}^6\text{He})} = 0.21(5) \quad \frac{Y({}^8\text{Li}^*)}{Y(\text{Li})} = 0.06(4)$$

Методом построения разностных спектров совпадения с нейтронами, летящими по направлению LCP и против, были определены некоторые характеристики тройного деления, сопровождающегося испусканием экзотических короткоживущих ядер: энергетические, угловые распределения LCP, время-пролетные спектры нейтронов.

Довольно высокие выходы нечетных изотопов гелия в тройном делении противоречат предсказаниям теории (например, в модели Хальперна выход  ${}^5\text{He}$  получается на уровне 5% от выхода  ${}^4\text{He}$ ). Такой результат объясняется необходимостью учета статистического фактора  $(2I + 1)$ , где  $I$  — спин данного состояния.

В заключении изложены основные результаты работы:

– Впервые получена детальная энергетическая зависимость коэффициента анизотропии осколков  $A_2(E)$  в делении выстроенных ядер  ${}^{235}\text{U}$  резонансными нейтронами в диапазоне энергий 0.4 – 20 эВ. Примененная методика обработки экспериментальных данных позволила довести статистическую точность определения относительного энергетического хода коэффициента выстроенности до  $< 3\%$  в сильных резонансах и  $\sim 15\%$  в межрезонансных интервалах при энергетическом шаге 0.05 эВ. Абсолютная ошибка в  $A_2$  определяется в основном неточностью знания константы сверхтонкого расщепления для ядер  ${}^{235}\text{U}$  в кристалле УРН и равняется 20%.

– На основании анализа данных по полному нейтронному, полному и спиново-разделенным сечениям деления и зависимости коэффициента угловой анизотропии осколков  $A_2$  от энергии с использованием многоуровневого описания сечений определены параметры  $s$ -волновых резонансов  ${}^{235}\text{U}$ . Впервые получен набор резонансных параметров в трех-канальном приближении. Впервые в анализе был учтен эффект интерференции резонансов с

различными спинами в дифференциальном сечении деления.

— Исследованы статистические характеристики полученных резонансных параметров с оговоркой на ограниченность их набора. Получены грубые оценки относительных вкладов боровских каналов в делении. Впервые доказан существенный вклад канала  $J^{\pi}K = 3^{-}0$ .

— Исследовано влияние систематической ошибки определения абсолютного значения  $A_2$  на полученные результаты. При вариации  $\langle A_2 \rangle$  на  $\pm 15\%$  средние величины вкладов каналов менялись незначительно, при этом средний вклад канала  $J^{\pi}K = 3^{-}0$  оказался значимым во всех случаях. Средний вклад члена, ответственного за интерференцию уровней с различными значениями спинов, колеблется в районе 10 — 20%.

— Угловые распределения  $\gamma$ -квантов по отношению к оси деления в двойном и тройном делении  $^{252}\text{Cf}$  исследованы в эксперименте на установке *Crystal Ball*. В отличие от двух известных работ в этой области, где наблюдалось резкое отличие в анизотропии  $\gamma$ -квантов в двойном и тройном делении, в данном эксперименте существенной разницы в угловых распределениях для двойной моды деления и деления, сопровождаемого испусканием  $\alpha$ -частицы, обнаружено не было.

— Впервые исследована угловая анизотропия  $\gamma$ -квантов по отношению к направлению  $\alpha$ -частицы в тройном делении. В пределах точности эксперимента не обнаружено какого-либо отклонения от изотропности. Этот результат свидетельствует об отсутствии корреляции между механизмом выстраивания спинов осколков в делении и механизмом испускания  $\alpha$ -частиц. Наиболее простым объяснением этому может служить модель образования спинов осколков за счет их кулоновского возбуждения.

— Впервые исследованы угловые корреляции  $\gamma$ -квантов в тройном делении, сопровождаемом испусканием  $^3\text{H}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $\text{Li}$  и  $\text{Be}$ . При эмиссии более легких частиц  $^3\text{H}$  и  $^6\text{He}$  угловые распределения  $\gamma$ -квантов по отношению к оси деления с точностью до ошибок идентичны аналогичному распределению для  $\alpha$ -частиц. В случае испускания более тяжелых элементов  $\text{Li}$  и  $\text{Be}$  наблюдаются некоторые изменения формы кривой углового распределения и, соответственно, параметров угловой анизотропии. Качественно эти отклонения могут быть объяснены усилением четно-нечетного эффек-

та в осколках при испускании тяжелых LCP. Как и в случае испускания  $\alpha$ -частиц, не обнаружено никакой угловой корреляции  $\gamma$ -квантов и LCP для других тройных частиц.

— Исследована эмиссия нейтронов из легких заряженных частиц в тройном делении. Наблюдалось усиление нейтронной интенсивности вдоль направления вылета  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{He}$  и  $\text{Li}$ . Избыточные нейтроны приписываются распаду нейтронно-нестабильных изотопов  $^5\text{He}$  и  $^7\text{He}$ , а также изотопа  $^8\text{Li}$  во втором возбужденном состоянии. Впервые получены детальные угловые распределения нейтронов из вышеупомянутых распадов, а также оценки выходов этих короткоживущих частиц в тройном делении.

— Систематика выходов изотопов гелия в тройном делении  $^{252}\text{Cf}$ , дополненная выходами нестабильных изотопов  $^5\text{He}$  и  $^7\text{He}$ , демонстрирует отсутствие четно-нечетного эффекта, который ярко выражен в известных выходах изотопов более тяжелых элементов. Объяснение этого явления лежит в учете статистических факторов, связанных со спинами образующихся частиц.

— Необходимость учета стат. факторов в определении вероятностей эмиссии различных LCP, а также возможность образования тройных частиц в возбужденных состояниях приводит к пересмотру существующих теорий тройного деления. Тот факт, что  $\approx 20\%$  из того, что обычно считают  $\alpha$ -частицами в тройном делении, на самом деле является продуктом распада нестабильного изотопа  $^5\text{He}$ , ставит под сомнение целесообразность общепринятой нормировки выходов легких заряженных частиц на  $10^4$   $\alpha$ -частиц.

Часть представленных в работе результатов получена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований по гранту 96-02-18108а.

#### Список публикаций с основными результатами диссертации.

1. Д.И. Тамбовцев, Л.К. Козловский, Н.Н. Гонин, Н.С. Работнов, Ю.Н. Копач, А.Б. Попов, В.И. Фурман, Я. Климан, Г. Постма, А.А. Богдзель, М.А. Гусейнов, "Экспериментальные исследования энергетической зависимости угловой анизотропии осколков при де-

лении ориентированных ядер  $^{235}\text{U}$  резонансными нейтронами”, ЯФ. 60/6, 981 (1997).

2. W.I. Furman, Yu.N. Kopach, A.B. Popov, N.N. Gonin, L.K. Kozlovsky, D.I. Tambovtsev, J. Kliman, and H. Postma, “The investigation of  $K$ -channel contributions in the resonance neutron induced fission of  $^{235}\text{U}$ ”, in *Proc. VI Int. Sem. on Int. Neutr. with Nucl.*, Dubna, Russia, May 13-16 1998, p. 260 (Dubna, 1998).
3. W.I. Furman, Yu.N. Kopach, A.B. Popov, N.N. Gonin, L.K. Kozlovsky, D.I. Tambovtsev, J. Kliman, and H. Postma, “Progress in the Investigation of Fission Fragment Angular Anisotropy in the Resonance Neutron Induced Fission of Aligned  $^{235}\text{U}$  Target”, in *Proc. of II Int. Workshop of Fission and Fission Fragment Spectroscopy*, edited by G.Fioni *et al.*, Seissyn, France, April 21-24, 1998, p. 356 (Woodbury, New York, 1998).
4. M. Mutterer, P. Singer, M. Klemens, Yu. Kopach, D. Schwalm, P. Thierolf, A. Hotzel, M. Hesse, and F. Gönnewein, “Recent Results on the Ternary Fission of  $^{252}\text{Cf}$ ”, in *Proc. Int. Conf on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei*, edited by J.H.Hamilton and A.V.Ramayya, Sanibel Island, FL, USA, 1997, p. 119 (World Scientific, Singapore, 1998).
5. Yu. Kopach, M. Mutterer, P. Singer, M. Klemens, A. Hotzel, D. Schwalm, P. Thierolf, M. Hesse, and F. Gönnewein, “Neutron Emission from Light Charged Particles in Ternary Fission of  $^{252}\text{Cf}$ ”, in *Proc. VI Int. Sem. on Int. Neutr. with Nucl.*, Dubna, Russia, May 13-16 1998, p. 267 (Dubna, 1998).
6. Yu. Kopach, P. Singer, M. Mutterer, M. Klemens, A. Hotzel, D. Schwalm, P. Thierolf, M. Hesse, and F. Gönnewein, “Angular Anisotropy of Prompt  $\gamma$ -Rays and Fragment Spin Alignment in Binary and Light-Charged-Particle-Accompanied Spontaneous Fission of  $^{252}\text{Cf}$ ”, *Phys. Rev. Lett.* 82, 303 (1999).

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 апреля 1999 года.