

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

7-2002-272

На правах рукописи  
УДК 539.172.17 + 539.173.7

**ТИЩЕНКО**  
Владимир Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
МНОГОТЕЛЬНЫХ РАСПАДОВ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2002

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

**Научные руководители:**

доктор физико-математических наук,  
профессор Ю.Э. Пенионжкевич

доктор физико-математических наук В.В. Пашкевич

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор В.А. Григорьев

кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Б.Г. Новацкий

**Ведущая организация:**


Научно-производственное объединение "Радиевый институт  
им. В.Г. Хлопина"

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " 2003 года в " \_\_\_\_\_ " на за-  
седании диссертационного совета Д 720.001.06 при Лаборатории ней-  
тронной физики и Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (г.Дубна,  
Московская обл.)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " декабря 2002 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.Г. Попеко

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы

Успехи в развитии экспериментальной техники для ядерно-физического эксперимента, произошедшие за последние 10 лет, можно назвать поистине впечатляющими. Благодаря созданию высокоэффективных детектирующих систем с 4 $\pi$  геометрией появилась возможность изучать характеристики многотельных распадов атомных ядер на качественно новом уровне. Это открывает путь к решению целого ряда современных проблем в области ядерной физики от поиска и изучения механизмов редких распадов в спонтанном делении (четверное деление, истинно тройное деление, кластерный распад ядер) до изучения поведения ядерной материи в экстремальных состояниях при высоких энергиях возбуждения. По этой причине одним из приоритетных направлений научных исследований коллаборации ФБОС стало изучение многотельных распадов ядер в широком диапазоне энергий возбуждения. Настоящая работа посвящена изучению характеристик таких распадов в двух предельных случаях – в спонтанном делении и в реакциях с тяжелыми ионами промежуточных энергий.

Идея о возможности деления ядра на три массивные фрагмента приблизительно одинаковой массы возникла вскоре после того, как в 1938 г. немецкие физики *Hahn* и *Strassmann* открыли явление деления ядра на два осколка [1]. Так, уже в 1941 г. *Present* показал [2], что такой распад энергетически не только не запрещен, но даже более выгоден, чем бинарное деление. Попытки обнаружить истинно тройное деление в спонтанном и низкоэнергетическом делении актинидов пока так и не увенчались успехом. В то же время образование трех массивных фрагментов при более высоких энергиях возбуждения является общепризнанным фактом. Наиболее яркие подтверждения существования такого канала распада были получены в работах [3, 4, 5]. Экспериментальные результаты, полученные в работе [4], были описаны механизмом *каскадного деления* возбужденного ядра [6], при котором асимметричное двой-

ное деление сопровождается повторным делением тяжелого осколка. Как было справедливо отмечено в работе [4], имея дело с двумя механизмами тройного деления необходимо найти характеристики явления, которые были бы максимально чувствительны к тому или иному механизму. Наиболее подходящими для этого могли бы быть пространственные корреляции фрагментов. К сожалению, существовавшая в то время экспериментальная база не позволяла измерять такие характеристики. Созданный в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова  $4\pi$  спектрометр ФОБОС позволяет решать подобные задачи путем проведения полного кинематического анализа событий многотельных распадов. Современная ускорительная техника позволяет синтезировать ядра с энергиями возбуждения в широком диапазоне вплоть до нескольких сотен МэВ. Изучение эволюции механизма распада возбужденного ядра с изменением энергии возбуждения представляет большой интерес для понимания фундаментальных свойств ядерной материи и динамики ядроядерных соударений [7, 8]. При очень высоких энергиях возбуждения ( $E^* > 4.5$  МэВ/нуклон) тройные распады, наблюдаемые в реакциях  $\text{Ag}(60\text{A МэВ})+\text{Au}$  и  $\text{Kr}(43\text{A МэВ})+\text{Au}$ , были интерпретированы как результат мультифрагментации [9]. При более низких энергиях возбуждения ( $E^* \sim 3$  МэВ/нуклон) тройные распады в реакции  $\text{Ag}(30\text{A МэВ})+\text{Au}$  были объяснены как результат двух последовательных независимых актов бинарного распада [10]. В то же время при близких энергиях возбуждения в реакции  $^{22}\text{Ne}(60\text{A МэВ})+\text{Au}$  были обнаружены указания о существовании трехтельных корреляций между фрагментами, что свидетельствует о небольших интервалах времени между актами распада [11]. Исследование механизма тройных распадов ядерных систем, образующихся в реакциях с тяжелыми ионами промежуточных энергий, и явилось одной из задач настоящей работы.

Очень часто под тройным делением понимают и такой распад, когда наряду с осколками деления образуется легкая заряженная частица. Измерение угловых и энергетических распределений легких частиц в тройном делении позволило сделать заключение о том, что

эти частицы испускаются непосредственно из области шейки, соединяющей уже сформировавшиеся осколки. Это позволило надеяться на то, что такие частицы, будучи зрителями процесса деления, позволят получить информацию о предразрывной конфигурации делящегося ядра и о динамике самого процесса деления. Для изучения характеристик тройного деления были предприняты большие усилия. Были тщательно измерены угловые и энергетические распределения легких частиц, массовые и энергетические распределения осколков деления, в том числе в совпадении с нейтронами и гамма-квантами, а также изучены различные корреляции наблюдаемых переменных. Несмотря на предпринятые усилия, пока так и не удалось получить однозначный ответ на вопрос о значениях начальных параметров, характеризующих момент разрыва ядра. Практически неиспользованным резервом дополнительной информации являются распады более высокой кратности, например, четверное деление. Этот вид распада является еще более редким, чем тройное деление. Так, если вероятность тройного деления по отношению к бинарному для разных ядер составляет величину порядка  $(2 \div 5) \times 10^{-3}$  [12, стр. 553], то выход четверного деления, например, ядра  $^{252}\text{Cf}$  составляет лишь  $\sim 2 \times 10^{-6}$  на одно бинарное деление [13]. Экспериментальное изучение характеристик четверного деления по этой причине сопряжено с большими методическими трудностями. Именно поэтому данной проблеме были посвящены всего лишь несколько экспериментальных работ (на момент начала наших исследований в 1999 г.). Одной из задач настоящей работы являлось также изучение характеристик четверного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$ .

Таким образом, целью настоящей работы является получение экспериментальной информации о характеристиках многотельных распадов ядер в широком диапазоне энергий возбуждения с целью уточнения механизмов распадов.

## Научная новизна

1. Впервые в полномасштабном эксперименте в прямой кинематике измерены характеристики тройных распадов ядерных систем

в широком диапазоне энергий возбуждения (до 4 МэВ/нуклон), образующихся в реакциях с тяжелыми ионами при промежуточных энергиях  $^{14}\text{N}(53\text{АМэВ})+^{197}\text{Au}$ ,  $^{14}\text{N}(53\text{АМэВ})+^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{Ar}(36\text{АМэВ})+^{248}\text{Cm}$ .

2. Получены экспериментальные свидетельства того, что механизмом образования трех сравнимых по массе тяжелых фрагментов в выходных каналах реакций  $^{14}\text{N}(53\text{АМэВ})+^{197}\text{Au}$ ,  $^{14}\text{N}(53\text{АМэВ})+^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{Ar}(36\text{АМэВ})+^{248}\text{Cm}$  является распад сильно деформированной составной системы.
3. Получены экспериментальные значения выходов четверного спонтанного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$ .
4. Получены экспериментальные данные о характеристиках тройного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$  в области низких кинетических энергий легкой частицы ( $E/A \lesssim 3$  МэВ/нуклон).
5. Установлено, что  $\alpha$ -частицы в четверном делении ядра  $^{252}\text{Cf}$  образуются как в результате распада ядра  $^8\text{Be}$  на две  $\alpha$ -частицы, так и в результате независимого испускания  $\alpha$ -частиц.

## Научная и практическая ценность

1. Разработанные в ходе работы методы калибровки детекторов, а также специализированный программный комплекс для обработки многопараметрических экспериментальных данных используются в исследованиях, проводимых на установке ФО-БОС.
2. Разработанный в ходе работы метод идентификации легких частиц в тройном делении, основанный на измерении кинетических энергий и относительных времен пролета продуктов деления, открывает новые перспективы для поиска редких распадов и исследования их характеристик с помощью 4 $\pi$  детекторов.
3. Полученная информация о распадах сильновозбужденных

ядерных систем имеет важное значение для понимания поведения ядерной материи при высоких энергиях возбуждения.

4. Получено методически независимое подтверждение изученных ранее характеристик тройного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$  (энергетических и угловых распределений легких частиц, средней множественности нейтронов, зависимости средней множественности нейтронов и средней энергии мгновенных  $\gamma$ -квантов от кинетической энергии легкой частицы).

**На защиту выносятся следующие основные результаты:**

1. Методика “внутренней” энергетической и временной калибровки газонаполненных детекторов спектрометра ФОБОС, позволяющая определять калибровочные коэффициенты непосредственно по массиву анализируемых экспериментальных данных без специальных калибровочных измерений.
2. Метод идентификации легких частиц тройного и четверного деления, основанный на измеряемых кинетических энергиях и относительных временах пролета продуктов деления.
3. Экспериментальные свидетельства того, что механизмом образования трех сравнимых по массе тяжелых фрагментов в выходных каналах реакций  $^{14}\text{N}(53\text{АМэВ})+^{197}\text{Au}$ ,  $^{14}\text{N}(53\text{АМэВ})+^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{Ar}(36\text{АМэВ})+^{248}\text{Cm}$  является распад сильнодеформированной составной системы из коллинеарной конфигурации.
4. Экспериментальные значения выходов четверного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$ .
5. Экспериментальные данные о характеристиках тройного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$  в области низких кинетических энергий легкой частицы ( $E/A \lesssim 3 \text{ МэВ/нуклон}$ ).
6. Экспериментальные свидетельства того, что  $\alpha$ -частицы в четверном делении ядра  $^{252}\text{Cf}$  образуются как в результате распада

ядра  $^8\text{Be}$  на две  $\alpha$ -частицы, так и в результате независимого испускания  $\alpha$ -частиц.

## Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях и совещаниях:

1. 214-th National ACS Meeting "Probing Nuclear Matter at Extreme Conditions", Las Vegas, USA, Sep. 8-11, 1997.
2. Рабочее совещание по  $4\pi$  спектрометру ФОВОС, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, 26-27 Октября, 1997 г., Дубна.
3. III научная конференция молодых ученых и специалистов, Дубна, 15-19 февраля 1999 г.
4. Nuclear physics spring meeting of Fachverband Hadronen und Kerne of the Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (DPG), the Nederlandse Natuurkundige Vereniging (NNV) and the Belgische Natuurkundige Vereniging/Société Belge de Physique (BNV/SBP) with physics and book exhibition. Bochum (Germany). 16-20 Mar. 1998.; 19-23 Mar. 2001.
5. International Symposium on Exotic Nuclei, Lake Baikal, Russia, July 24-28, 2001.

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова (Дубна, Россия); Исследовательском центре Россендорф (Россендорф, Германия); Институте Хана-Майтнера (Берлин, Германия).

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ.

## Объем и структура диссертации.

Диссертация изложена на 199 страницах машинописного текста, включая 149 рисунков, 8 таблиц и список цитируемой литературы



из 113 наименований. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование выбора темы диссертации, рассмотрена ее актуальность, сформулирована цель работы, а также защищаемые автором положения, приведена структура диссертации.

**В первой главе** дан литературный обзор теоретических и экспериментальных достижений в области изучения тройного и четверного деления атомных ядер. Проанализированы достоинства и недостатки различных экспериментальных методов в подходе к решению изучаемой проблемы.

**Во второй главе** дано описание  $4\pi$ -спектрометра заряженных частиц ФОБОС, при помощи которого была получена основная часть анализируемых в дальнейшем экспериментальных данных. Основное внимание уделено описанию устройства и характеристик газонаполненной оболочки спектрометра ФОБОС, поскольку в настоящей работе анализировались результаты, полученные именно с ее помощью.

$4\pi$  спектрометр ФОБОС проектировался как универсальный инструмент для изучения ядерных реакций, индуцированных тяжелыми ионами промежуточных энергий в прямой кинематике. Продукты ядерных реакций в этой области энергий представлены широким спектром ядер как по массе (от легких частиц до тяжелых испарительных остатков), так и по скорости (от быстрых снарядоподобных и предравновесных частиц до медленных испарительных остатков). Поскольку при помощи лишь одного типа детекторов невозможно перекрыть столь широкий диапазон, в конструкции спектрометра был реализован так называемый логарифмический принцип регистрации продуктов реакций. Большой акцептанс, низкие пороги регистрации, высокое массово-энергетическое и угловое разрешение являются ключевыми параметрами любой экспериментальной установки, часто достигаемыми один в ущерб другому. В конструкции

спектрометра ФОБОС был достигнут удачный компромисс между этими требованиями.

Спектрометр ФОБОС состоит из 30 детекторных модулей, монтируемых на монолитном каркасе в виде полого икосаэдра с внутренним диаметром 1330 мм (рис. 1). Каждый детекторный модуль состоит из (см. рис. 2) позиционно-чувствительного лавинного счетчика (ПЧЛС) (3), брэгговской ионизационной камеры (БИК) (5÷8) и мозаики из семи сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов CsI(Tl) (9). Каждый детекторный модуль позволяет измерять кинетическую энергию, направление эмиссии и время пролета регистрируемого фрагмента, идентифицировать фрагменты по заряду вплоть до  $Z = 25$ , а также осуществлять спектрометрию легких заряженных частиц (при помощи мозаики из сцинтилляционных детекторов). Анализируемые в настоящей работе экспериментальные данные были накоплены с помощью газонаполненной оболочки спектрометра ФОБОС (ПЧЛС+БИК), позволяющей регистрировать фрагменты с  $Z > 2$ , испускаемые в лабораторной системе координат под углами  $28^\circ < \Theta_{\text{lab}} < 155^\circ$  по отношению к оси пучка. Основными характеристиками спектрометра ФОБОС, существенными для решаемой в настоящей работе задачи, являются:

---



---

угловое разрешение:	$\Delta\theta \lesssim 1^\circ$
временное разрешение:	$\Delta t \sim 500$ пс (собственное) $\Delta t \sim 2$ нс (при старте от высокой частоты циклотрона)
времяпролетная база:	$\approx 50$ см
массовое разрешение:	$\Delta A \sim 4 \div 6$ (для фрагментов деления с $A = 100$ )
геометрическая эффективность регистрации событий с множественностью три:	$\varepsilon \sim 1\%$
порог регистрации фрагментов:	$v_{\text{thr}} \sim 1.2 \div 0.5$ см/нс для $Z = 5 \div 70$

---



---

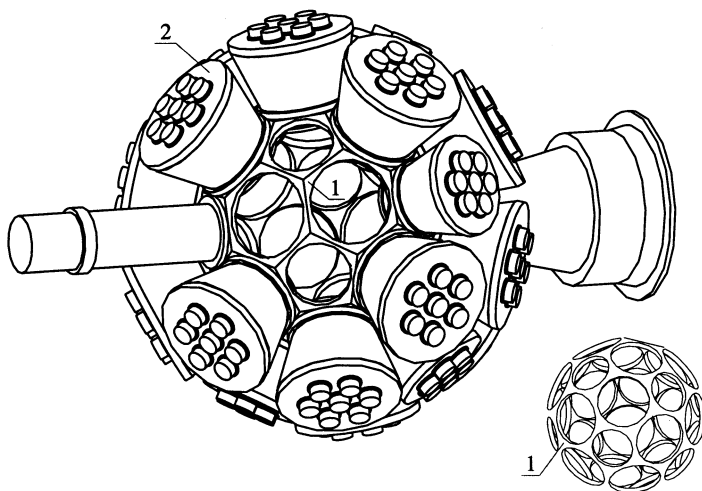


Рис. 1: Схематическое устройство спектрометра ФОБОС: 1 – монолитный каркас, 2 – детекторный модуль.

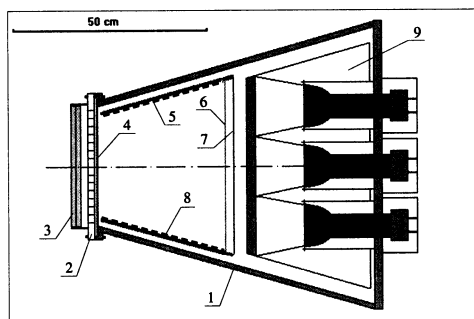


Рис. 2: Устройство детекторного модуля спектрометра ФОБОС. 1 – корпус брэгговской ионизационной камеры, 2 – поддерживающая решетка входного окна, 3 – позиционно-чувствительный лавинный счетчик, 4 – входное окно (катод), 5 – тefлоновый конус с полеформирующими стрипами (8), 6 – сетка Фриша, 7 – анод, 9 – мозаика из сцинтилляционных детекторов.

**В третьей главе** дано описание методов калибровки детекторов и восстановления физических характеристик продуктов ядерной реакции по измеряемым в эксперименте параметрам на примере реакции  $^{40}\text{Ar}(36\text{МэВ})+^{248}\text{Cm}$ . Своего рода “платой” за достижение высокой энергии возбуждения составной системы, образующейся в реакциях с тяжелыми ионами промежуточных энергий (т. е. в диапазоне  $10 \div 100$  МэВ/нуклон) является неопределенность значений

ее основных физических характеристик (массы, заряда, углового момента, энергии возбуждения). В силу этого, прежде чем переходить к анализу характеристик тройных распадов составной системы (т. е. распадов с образованием трех тяжелых фрагментов), представляющих основной интерес в рамках настоящей работы, были проанализированы бинарные распады, на основании которых были получены необходимые сведения как о механизме реакции, так и о характеристиках и закономерностях образования составной системы.

Поскольку характеристики образующейся в реакции составной системы зависят от параметра соударения бомбардирующего иона с ядром-мишенью, то для классификации реакций по типу соударения нами использовалась доля переданного в результате соударения импульса LMT, определяемая следующим образом:

$$LMT = \frac{m_T}{m_P} \cdot \frac{v_R}{v_P - v_R}, \quad (1)$$

где  $m_T$  и  $m_P$  масса ядра-мишени и ядра-снаряда, соответственно,  $v_P$  – скорость ядра-снаряда,  $v_R$  – скорость отдачи составной системы. Одним из достоинств спектрометра ФБОС, крайне важным для проведенного в настоящей работе исследования, является независимое восстановление масс фрагментов распада в рамках метода время пролета–энергия без введения априорных предположений относительно кинематики ядерной реакции и характеристик распадающегося ядра. Это позволяет организовать как эффективный способ отбора “полных” событий (т.е. таких событий, в которых регистрируются все массивные фрагменты распада составной системы), так и способ оценки  $v_R$  как скорости центра масс фрагментов, единый для событий с любой кратностью. На основе событий бинарных распадов показано хорошее согласие результатов, получаемых в рамках такого способа оценки  $v_R$ , с результатами, получаемыми на основе анализа углов разлета фрагментов деления, часто используемого в случае бинарных распадов. Далее изложен способ оценки энергии возбуждения составной системы  $E^*$  по величине LMT в предположении неполного слияния снаряда с ядром-мишенью. Проанализирована эволюция массово-энергетических распределений фрагментов бинарного распада составной системы с изменением

параметра ЛМТ ( $E^*$ ).

**Четвертая глава** посвящена анализу характеристик тройных распадов, наблюдаемых в реакциях  $^{40}\text{Ar}(36\text{АМЭВ})+^{248}\text{См}$ ,  $^{14}\text{N}(53\text{АМЭВ})+^{197}\text{Au}$  и  $^{14}\text{N}(53\text{АМЭВ})+^{232}\text{Th}$ . В начале главы описана методика отбора полных событий. Для последующего анализа фрагменты в каждом событии были отсортированы по массе на легкий (L), средний (M) и тяжелый (H):  $A_H \geq A_M \geq A_L$ . На рис. 3 приведены массовые распределения отсортированных таким образом фрагментов. Было установлено, что основную долю событий, зарегистрированных с множественностью “три”, составляют события с образованием двух тяжелых фрагментов и одного существенно более легкого фрагмента промежуточной массы. Ограничение массы легкого фрагмента снизу ( $A \gtrsim 40$ ) приводит к смещению массовых распределений двух других фрагментов в область меньших масс, что свидетельствует о физической корреляции фрагментов и исключает случайные совпадения. Такое ограничение приводит к отбору событий тройных распадов, связанных с образованием более симметричных по массе фрагментов, которые мы будем называть в дальнейшем масс-симметричными распадами. Анализ углов вылета легкого фрагмента по отношению к оси пучка показал, что в случае масс-асимметричных распадов легкие фрагменты оказываются сфокусированными в направлении пучка, что свидетельствует о предравновесном механизме образования таких фрагментов. В то же время угловое распределение легкого фрагмента в масс-симметричных распадах характеризуется симметрией вперед-назад, что было интерпретировано как указание на распад *релаксированной* системы. Дальнейший анализ был сконцентрирован на уточнении механизма масс-симметричных распадов. Было установлено, что такие распады связаны с центральными соударениями снаряда с ядром-мишенью (рис. 4), приводящими к образованию составной ядерной системы со средней массой  $\sim 80 \div 90\%$  от суммарной массы фрагментов во входном канале реакции. Из анализа угловых распределений продуктов распада составной системы был сделан вывод об умеренных угловых

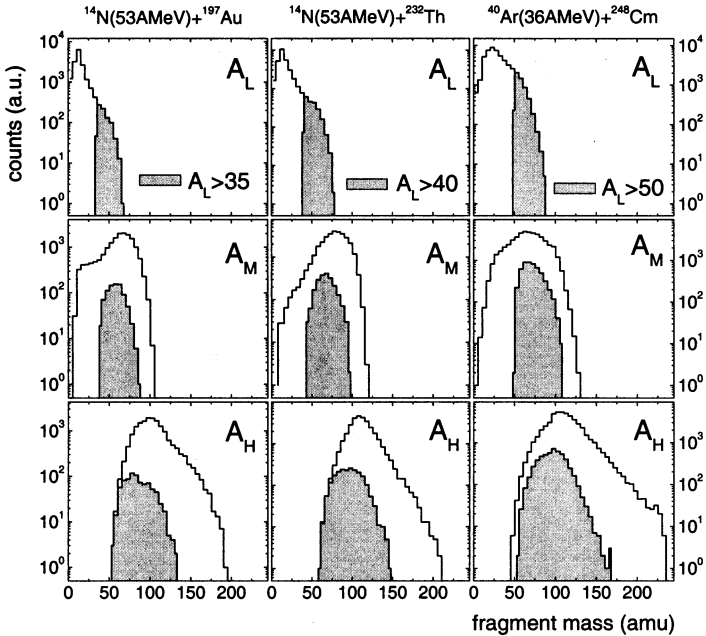


Рис. 3: Массовые распределения фрагментов в событиях, зарегистрированных газонаполненной оболочкой спектрометра ФОБОС с множественностью три в реакциях  $^{14}\text{N}(53\text{AMeV})+^{197}\text{Au}$  (левый столбец),  $^{14}\text{N}(53\text{AMeV})+^{232}\text{Th}$  (средний столбец) и  $^{40}\text{Ar}(36\text{AMeV})+^{248}\text{Cm}$  (правый столбец). Заштрихованные гистограммы соответствуют масс-симметричным распадам.

моментах составной системы. Это позволило сделать вывод о том, что фрагментация составной системы под действием высоких угловых моментов не является основной причиной наблюдаемых распадов. Из наблюдаемого насыщения функции возбуждения тройных распадов (рис. 4) был сделан вывод о том, что мультифрагментация, как один из возможных каналов распада, приводящий к образованию трех фрагментов, не является основным каналом распада и может быть исключена из рассмотрения. В рамках модели каскадного деления была предпринята попытка оценить время  $\tau$  между актами распада на основании анализа кинематических корреляций между фрагментами. Из анализа диаграмм скоростей и корреляционных

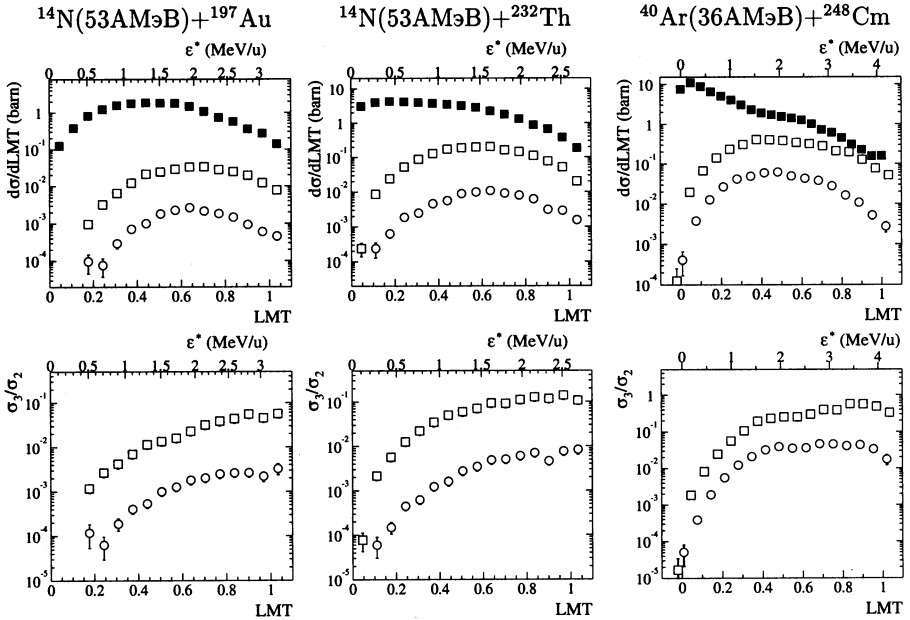


Рис. 4: Верхний ряд: Дифференциальное сечение тройных масс-симметричных (открытые кружки) и асимметричных (открытые квадратики) распадов и бинарного деления (закрытые квадратики) как функция переданного импульса (нижняя шкала) и начальной энергии возбуждения составной системы (верхняя шкала). Нижний ряд: Отношение сечений тройных масс-симметричных (открытые кружки) и асимметричных (открытые квадратики) распадов к бинарному делению.

функций для относительных скоростей и углов разлета фрагментов было установлено, что хорошее согласие экспериментальных данных с результатами траекторных расчетов наблюдается при использовании больших значений параметра  $\tau$ . Однако имеющиеся данные оказались недостаточными для установления верхней или нижней границы параметра  $\tau$ .

Из анализа корреляции между скоростью и направлением эмиссии легкого фрагмента в системе центра масс двух более тяжелых фрагментов было установлено существование двух компонент: изотропной, соответствующей эмиссии легкого фрагмента из составной системы с последующим делением последнего, и анизотропной,

связанной с вылетом легкого фрагмента с уменьшенной скоростью в направлении, практически перпендикулярном оси разлета тяжелых фрагментов (рис. 5 на примере реакции  $^{14}\text{N}(53\text{АМэВ})+^{232}\text{Th}$ ). Анализ ряда физических характеристик позволил установить, что в

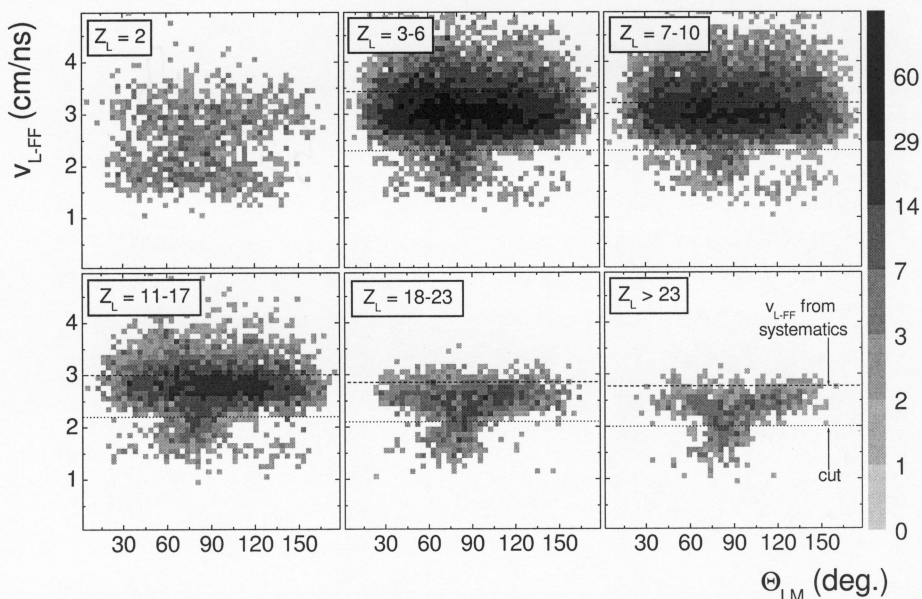


Рис. 5: Корреляция между скоростью и углом вылета L-фрагмента по отношению к M-фрагменту в системе центра масс M и H фрагментов в реакции  $^{14}\text{N}(53\text{АМэВ})+^{232}\text{Th}$  для различных диапазонов  $Z_L$ . Пунктирной линией показана средняя скорость L-фрагмента, ожидаемая при каскадном делении с образованием L-фрагмента в первом акте распада. Штриховой линией показаны эмпирические пороги, введенные для выделения изотропной и анизотропной компонент.

случае масс - асимметричных распадов наблюдаемые компоненты обусловлены двумя различными механизмами распада. Так, нейтронная избыточность легких фрагментов в событиях, составляющих анизотропную компоненту (рис. 6), а также пологий ход зависимости сечений таких событий от заряда легкого фрагмента (рис. 7, полые квадратики) являются характерными признаками распадов, связанных с эмиссией фрагментов промежуточных масс из шейки делящегося ядра [14, 15]. Наблюдаемое выполаживание зависимо-



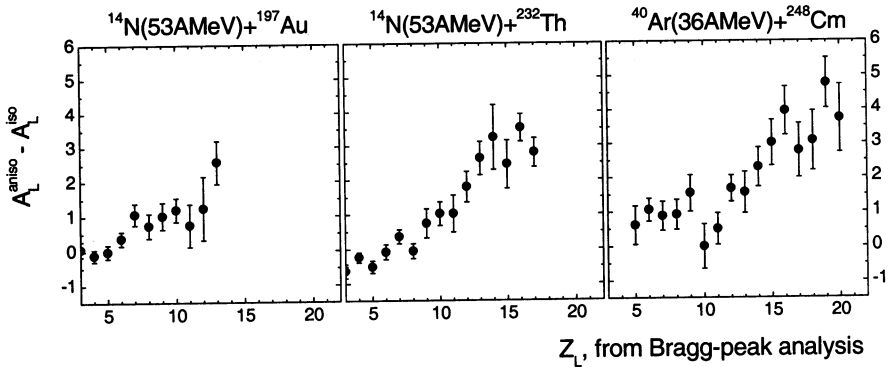


Рис. 6: Средняя разность масс L-фрагментов из изотропной и анизотропной компонент как функция заряда фрагмента.

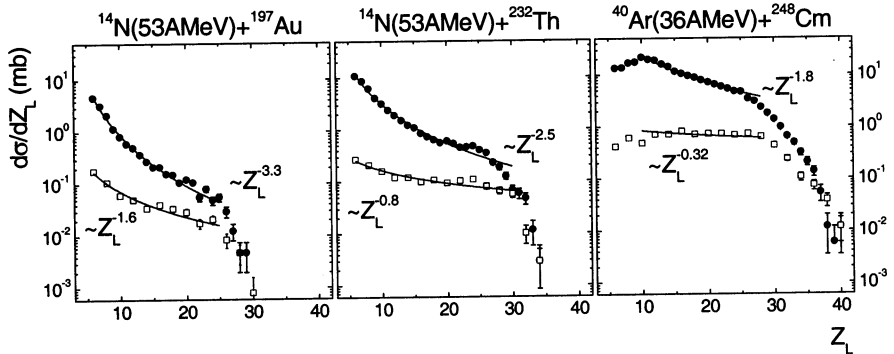


Рис. 7: Дифференциальное сечение тройных распадов как функция заряда легкого фрагмента для изотропной (черные кружки) и анизотропной (полые квадратики) компонент. Линии – результаты подгонки степенной зависимостью  $\sim Z_L^{-\tau}$ .

сти сечения масс-симметричных распадов от атомного номера легкого фрагмента для изотропной компоненты (рис. 7, черные кружки) позволяет предполагать, что масс-симметричные распады имеют механизм, аналогичный распадам в анизотропной компоненте. Подтверждение справедливости этого предположения было получено из анализа полной кинетической энергии фрагментов ТКЕ, которая в анизотропной компоненте оказалась существенно меньше, чем в изо-

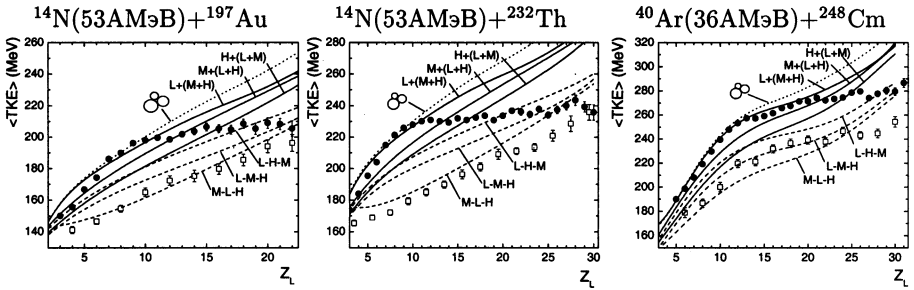


Рис. 8: Средняя суммарная кинетическая энергия фрагментов тройного распада как функция заряда легкого фрагмента. Символами показаны экспериментальные данные для изотропной (черные кружки) и анизотропной (полые квадратики) компонент; сплошные линии – результаты расчетов в рамках модели каскадного деления для трех различных последовательностей распада; штриховые линии – результаты расчетов в рамках модели коллинеарного распада для трех различных предразрывных конфигураций, указанных на рисунке; пунктирная линия – результаты для распада компактной конфигурации.

тропной (рис. 8). С ростом заряда легкого фрагмента разница между значениями ТКЕ для изотропной и анизотропной компонент постепенно уменьшается и в случае масс-симметричных распадов наблюдаемую в эксперименте полную кинетическую энергию фрагментов удалось объяснить лишь предполагая, что такие события связаны с распадом сильнодеформированной системы (коллинеарный распад). Другие рассмотренные механизмы распада (каскадное деление и распад компактной конфигурации) приводят к существенно более высоким значениям ТКЕ.

**Пятая глава** посвящена изучению характеристик тройного и четверного спонтанного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$  с помощью установки NESSI (*NEutron Scintillator Silicon detector*), представляющей собой уникальную комбинацию двух  $4\pi$  детекторов: нейтронного болла BNB (*Berlin Neutron Ball*) для регистрации нейтронов и  $\gamma$ -излучения и кремниевого болла BSiB (*Berlin Silicon Ball*) для регистрации заряженных частиц, который размещается в центре реакционной камеры BNB (рис. 9,10).

В первом разделе главы приводится краткое описание установки

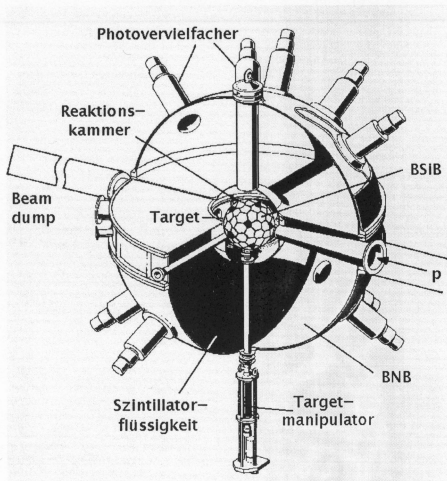


Рис. 9: Схематическое изображение устройства детектора NESSI.

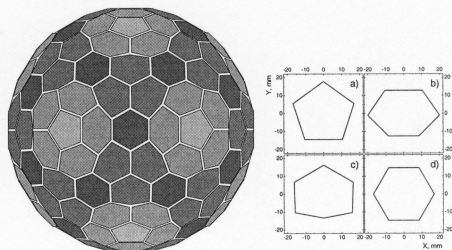


Рис. 10: Общий вид детектора BSiB (слева), состоящего из 160 кремниевых полупроводниковых детекторов четырех различных типов по форме (справа), составляющих сферу с внутренним диаметром 20 см.

NESSI с указанием ее основных характеристик, существенных для последующего анализа, к числу которых относятся:

характеристики BSiB:

времяпролетная база:

$$\ell = 10 \text{ см}$$

угловое разрешение:

$$\Delta\theta \sim 10^\circ$$

временное разрешение\*:

$$\Delta t \leq 250 \text{ пс}$$

энергетическое разрешение\*:

$$\Delta E < 100 \text{ кэВ}$$

геометрическая эффективность:

$$\varepsilon = 87\%$$

характеристики BNB:

эффективность регистрации нейтронов деле-

$$\varepsilon_n \approx 85\%$$

ния:

\* для  $\alpha$ -частиц энергией  $E = 5.5 \text{ МэВ}$

Во втором разделе приводится описание разработанной автором оригинальной методики идентификации продуктов распада, основанной на измерении их кинетических энергий и относительных времен пролета. Необходимость разработки подобного метода была продиктована желанием выполнять эксперимент без использования стартового детектора с целью обеспечения максимально возможного

телесного угла, в котором происходит регистрация частиц, а также для уменьшения порога регистрации фрагментов. Суть метода состоит в восстановлении стартового сигнала для измерения времени пролета легкой частицы на основе времен пролета фрагментов деления, вычисляемых из значений их кинетических энергий  $E_i$  и масс, определенных в рамках  $E-E$  метода. Корреляция между реконструированным таким образом временем пролета легкой частицы  $TOF_3$  и ее кинетической энергией  $E_3$ , измеренной в эксперименте, приведена на рис. 11а, из которого видно, что различные типы частиц в таких координатах можно идентифицировать при помощи графических условий отбора, приведенных на рис. 11б. Достигнутое временное разрешение в таком подходе составило  $\Delta t \approx 570$  пс (ПШПВ, для  $\alpha$ -частиц тройного деления). Проведенный эксперимент показал не только применимость подобного метода идентификации частиц, но и его высокую эффективность. На сколько нам известно, такого рода эксперимент в подобной постановке выполнялся впервые. К числу преимуществ данного метода можно отнести:

1. низкие пороги регистрации заряженных продуктов деления (в настоящем эксперименте порог составил  $\sim 2.0$  МэВ)
2. в рамках одного эксперимента перекрывался достаточно широкий спектр масс легких частиц
3. возможность эффективной режекции событий упругого рассеяния фрагментов бинарного деления на ядрах атомов, входящих в состав материала мишени либо ее подложки, дающих основной фон в события тройных совпадений

Полученные в этих экспериментах результаты открывают новые перспективы для изучения редких многотельных распадов в такой постановке экспериментов и уже запланировано проведение дальнейших исследований в этом направлении в рамках развитой методики.

Поскольку детектор NESSI позволяет измерять энергетические и угловые распределения продуктов деления, множественность нейтронов деления, эти характеристики были измерены для различных

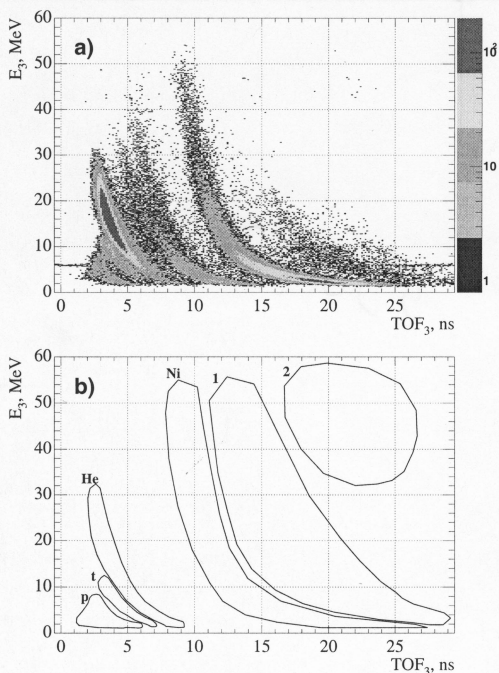


Рис. 11: а) Корреляция между кинетической энергией легкой частицы  $E_3$ , измеренной в эксперименте, и ее восстановленным временем пролета  $TOF_3$ . б) Графические условия отбора для идентификации легких частиц.

каналов тройного распада. Проанализированы различные корреляции между измеренными характеристиками. Полученные результаты представлены в третьем разделе пятой главы. Для тройного деления с образованием  $\alpha$ -частицы многие из таких характеристик были измерены ранее, поэтому сравнение наших результатов с литературными данными с одной стороны явилось методически независимым подтверждением полученных ранее результатов, с другой стороны – позволило убедиться в отсутствии каких-либо методических ошибок в наших данных.

Четвертый раздел главы посвящен анализу характеристик четверного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$ . Всего было зарегистрировано 34  $\alpha$ - $\alpha$  совпадения, 8  $\alpha$ -p совпадений и 5  $\alpha$ -t совпадений. Оцененные выходы таких событий по отношению к бинарному делению составили  $(1.5 \pm 0.4) \times 10^{-6}$ ,  $(0.4 \pm 0.2) \times 10^{-6}$  и  $(0.2 \pm 0.1) \times 10^{-6}$ , соответственно. Несмотря на небольшое число событий, была предпринята попытка

проанализировать некоторые характеристики четверных распадов с образованием двух  $\alpha$ -частиц. Из анализа углов эмиссии  $\alpha$ -частиц по отношению к легкому фрагменту деления было установлено, что частицы сфокусированы в направлении, перпендикулярном оси деления, подобно  $\alpha$ -частицам тройного деления. Из этого был сделан вывод о том, что  $\alpha$ -частицы четверного деления также испускаются из области шейки делящегося ядра, как и  $\alpha$ -частицы тройного деления. Из анализа углов разлета  $\alpha$ -частиц было сделано заключение о том, что большинство частиц, по всей видимости, являются коррелированными. Одним из возможных источников таких частиц мог бы быть распад нестабильного ядра  ${}^8\text{Be}$ , образовавшегося в тройном делении. Анализ скоростей разлета  $\alpha$ -частиц показал, что большинство из зарегистрированных событий действительно можно отнести за счет распада  ${}^8\text{Be}$  из основного ( $Q = 94$  кэВ) и первого возбужденного ( $E^* = 2.9$  МэВ) состояний (рис. 12). Однако три из зарегистрированных событий не являются результатом распада  ${}^8\text{Be}$ , а обусловлены независимым испусканием двух  $\alpha$ -частиц. Некоторые характеристики четверных распадов для трех диапазонов по  $v_{\text{rel}}$  приведены в таблице 1.

Таблица 1: Некоторые характеристики  $\alpha$ - $\alpha$  совпадений.

	$V_{\text{rel}}$ см/нс	число событий	$\bar{\nu}$	$\overline{\text{TKE}}_{\alpha}$ , МэВ	$Y/Y_{\text{binary}}$
1	$0 \div 1.5$	18	$3.0 \pm 0.3$	$20 \pm 1$	$1.5 \times 10^{-6}$
2	$1.5 \div 3.5$	13	$2.3 \pm 0.3$	$26 \pm 2$	$0.6 \times 10^{-6}$
3	$4 \div 6$	3	$1.2 \pm 0.6$	$34 \pm 5$	$0.1 \times 10^{-6}$

$\bar{\nu}$  – средняя множественность нейтронов;

$\overline{\text{TKE}}_{\alpha}$  – средняя суммарная кинетическая энергия  $\alpha$ -частиц;

$Y/Y_{\text{binary}}$  – выход по отношению к бинарному делению.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

**В приложении** приведены некоторые геометрические характеристики спектрометра ФБОС, которые могут оказаться полезны-

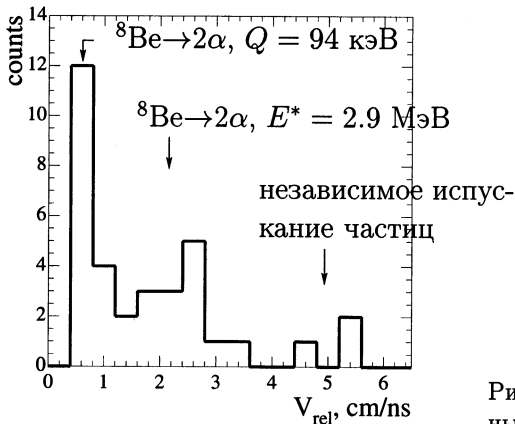


Рис. 12: Распределение относительных скоростей разлета  $\alpha$ -частиц.

ми при анализе экспериментальных данных. Дан список калибровочных коэффициентов для эксперимента  $^{40}\text{Ar}(36\text{АМэВ}) + ^{248}\text{См}$ .

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Создан специализированный программный комплекс для обработки многопараметрических экспериментальных данных, получаемых с помощью  $4\pi$  спектрометра ФОБОС.
2. Развита методика “внутренней” энергетической и временной калибровки газонаполненных детекторов спектрометра ФОБОС, позволяющая определять калибровочные коэффициенты непосредственно по массиву анализируемых экспериментальных данных без специальных калибровочных измерений.
3. Получены экспериментальные свидетельства того, что наиболее вероятным механизмом образования трех сравнимых по массе тяжелых фрагментов в выходных каналах реакций  $^{14}\text{N}(53\text{АМэВ}) + ^{197}\text{Au}$ ,  $^{14}\text{N}(53\text{АМэВ}) + ^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{Ar}(36\text{АМэВ}) + ^{248}\text{См}$  является распад составной системы из коллинеарной предразрывной конфигурации.
4. Разработан оригинальный метод идентификации легких частиц

тройного и четверного спонтанного деления на основе кинетических энергий и относительных времен пролета продуктов деления.

5. Получено методически независимое подтверждение изученных ранее характеристик тройного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$  (энергетических и угловых распределений легких частиц, средней множественности нейтронов, зависимости средней множественности нейтронов и средней энергии мгновенных  $\gamma$ -квантов от кинетической энергии легкой частицы).
6. Получены экспериментальные данные о характеристиках тройного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$  в области низких кинетических энергий легкой частицы ( $E/A \lesssim 3$  МэВ/нуклон).
7. Получены экспериментальные значения выходов четверного деления ядра  $^{252}\text{Cf}$ .
8. Сделан вывод о том, что  $\alpha$ -частицы в четверном делении ядра  $^{252}\text{Cf}$  образуются как вследствие распада ядра  $^8\text{Be}$ , так и в результате независимой эмиссии частиц.

#### Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. *C.-M. Herbach, H.-G. Ortlepp, P. Gippner, D.V. Kamanin, Yu.E. Penionzhkevich, G. Renz, K.D. Schilling, O.V. Strekalovsky, V.G. Tichtchenko, W. Wagner.* Decay study of hot nuclei below the multifragmentation threshold with the FOBOS detector at Dubna // Preprint FZR-159, Forschungszentrum Rossendorf e.V. (FZR), Dresden (Germany), 1996, 16 p.
2. *W. Wagner, C.-M. Herbach, H.-G. Ortlepp, A.A. Alexandrov, I.A. Alexandrova, L. Dietterle, V.N. Doronin, S. Dshemuchadse, P. Gippner, D.V. Kamanin, A. Matthies, G. Paush, Yu. E. Penionzhkevich, G. Renz, K.D. Schilling, D.I. Shishkin, O.V. Strekalovsky, V.G. Tishchenko, I.P. Tsurin, C. Umlauf,*



*D.V. Vakatov, V.M. Vasko, M. Wilpert, V.E. Zuchko.* The binary and ternary decay of hot heavy nuclei produced in the reaction  $^{14}\text{N}(34\text{A MeV})+^{197}\text{Au}$  // Int. Conf. "Dynamical aspects of nuclear fission", Casta Papiernicka (Slovak Republic), August 30 - September 4, 1996. Conf. proc., Ed. by Jan Kliman and Boris I. Pustylnik, Dubna 1996, 425 p., p. 104-112.

3. *C.-M. Herbach, H.-G. Ortlepp, P. Gippner, D.V. Kamanin, Yu.E. Penionzhkevich, G. Renz, K.D. Schilling, O.V. Strelakovsky, V.G. Tichtchenko, W. Wagner.* Decay study of hot nuclei below the multifragmentation threshold with the FOBOS detector at Dubna // Int. research workshop "Heavy ion physics at low, intermediate and relativistic energies using  $4\pi$  detectors. Poina Brasov (Romania) 7-14 October 1996. Conf. proc., Ed. by M. Petrovici, A. Sandulescu, D. Pelte, H. Stoecker, J. Randrup. World Scientific, 1997, 454 p., p. 67-80.
4. *C.-M. Herbach, H.-G. Ortlepp, P. Gippner, D.V. Kamanin, Yu.E. Penionchkevich, G. Renz, K.D. Schilling, O.V. Strelakovsky, V.G. Tichtchenko, W. Wagner.* Three-fragment decays in the reaction  $^{14}\text{N}(53\text{A MeV})+^{197}\text{Au}$  and  $^{232}\text{Th}$  // Spring meeting of Fachverband Physik der Hadronen und Kerne of Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (DPG). Goettingen (Germany). 24-28 February 1997. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, vol. 32(1), 1997, p. 13.
5. *V.G. Tichtchenko, C.-M. Herbach, H.-G. Ortlepp, P. Gippner, D.V. Kamanin, Yu.E. Penionzhkevich, K.D. Schilling, W. Wagner.* Mass-symmetric tripartition studied in the reactions  $^{40}\text{Ar}(36\text{A MeV})+^{248}\text{Cm}$  and  $^{232}\text{Th}$  // Nuclear physics spring meeting of Fachverband Hadronen und Kerne of the Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (DPG), the Nederlandse Natuurkundige Vereniging (NNV) and the Belgische Natuurkundige Vereniging/Societe Belge de Physique (BNV/SBP) with physics and book exhibition. Bochum (Germany). 16-20 Mar 1998. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft,

vol.33(4), p. 478-479.

6. *H.-G. Ortlepp, W. Wagner, C.-M. Herbach, A.A. Aleksandrov, I.A. Aleksandrova, M. Andrassy, A. Budzanowski, B. Czech, M. Danziger, L. Dietterle, V.N. Doronin, S. Dshemuchadse, A.S. Fomichev, W.D. Fromm, M. Gebhardt, P. Gippner, K. Heidel, Sh. Heinitz, H. Homeyer, S.A. Ivanovsky, D.V. Kamanin, I.V. Kolesov, A. Matthies, D. May, S.I. Merzlyakov, W. von Oertzen, Yu.Ts. Oganessian, G. Pausch, Yu.E. Penionzhkevich, Yu.V. Pyatkov, S.V. Radnev, G. Renz, L.A. Rubinskaya, I.D. Sandrev, K.D. Schilling, W. Seidel, D.I. Shishkin, A.P. Sirotin, H. Sodan, O.V. Strekalovsky, V.G. Tishchenko, V.V. Trofimov, I.P. Tsurin, C. Umlauf, D.V. Vakotov, V.M. Vasko, V.A. Vitenko, E. Will, M. Wilpert, R. Yanez, V.E. Zhuchko, P. Ziem, and L. Zrodowski.* The 4pi-fragment-spectrometer FOBOS // Nucl. Instr. Meth. A. – 1998. – v. 403. – p. 65-97.
7. *C.-M. Herbach, D. Hilscher, V.G. Tishchenko, P. Gippner, D.V. Kamanin, W. v. Oertzen, H.-G. Ortlepp, Yu.E. Penionzhkevich, Yu.V. Pyatkov, G. Renz, K.D. Schilling, O.V. Strekalovsky, W. Wagner, and V.E. Zhuchko.* Search for Mass-Symmetric Ternary Fission in the Reactions  $^{14}\text{N}(53\text{A MeV})+^{197}\text{Au}$  and  $^{232}\text{Th}$  // Nucl. Phys. A. – 2002. – v. 712. – p. 211-250.
8. *V.G. Tishchenko, C.-M. Herbach, D. Hilscher, H.-G. Ortlepp, P. Gippner, D.V. Kamanin, Yu.E. Penionzhkevich, K.D. Schilling, and W. Wagner.* Ternary Decay of Hot Heavy Nuclei Studied in the Reaction  $^{40}\text{Ar}(36\text{A MeV})+^{248}\text{Cm}$  // Proc. of Int. Symposium on Exotic Nuclei, Lake Baikal, Russia, July 24-28, 2001. Editors Yu.E. Penionzhkevich, and E.A. Cherepanov. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. – 2002. – 704 p. – p. 167-180.
9. *V.G. Tishchenko, U. Jahnke, C.-M. Herbach and D. Hilscher.* Study of ternary and quaternary spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$  with the NESSI detector // preprint HMI-B 588. – 2002.

## цитированная литература

- [1] Hahn O., Strassmann F. Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle // Naturwiss. – 1939. – v. 27. – p. 11–13.
- [2] Present R.D. Possibility of ternary fission // Phys. Rev. – 1941. – v. 59. – p. 466.
- [3] Fleischer R. L., Price P. B., Walker R. M., Hubbard E. L. Ternary fission of heavy compound nuclei in thorite track detectors // Phys. Rev. – 1966. – v. 143, N 3. – p. 943–946.
- [4] Карамян С. А., Кузнецов И. В., Оганесян Ю. Ц., Пенионжкевич Ю. Э. Деление ядер тяжелыми ионами на три осколка // Яд. Физ. – 1967. – Т. 5, N 5. – с. 959–965.
- [5] Perelygin V. P., Shadieva N. H., Tretyakova S. P., Boos A. H., Brandt R. Ternary fission produced in Au, Bi, Th and U with Ar ions // Nucl. Phys. A. – 1969. – v. 127. – p. 577–585.
- [6] Музычка Ю. А., Оганесян Ю. Ц., Пустыльник Б. И., Флеров Г. Н. О механизме деления ядер на три осколка в реакциях с тяжелыми ионами // Яд. Физ. – 1967. – Т. 6, N 2. – с. 306–310.
- [7] Bertsch G., Das Gupta S. A guide to microscopic models for intermediate energy heavy ion collisions // Phys. Rep. – 1988. – v. 160. – p. 189–233.
- [8] Suraud E., Grégoire Ch., Tamain B. Birth, life and death of hot nuclei // Progr. Nucl. Part. Sci. – 1989. – v. 23. – p. 357.
- [9] Bizard G., Bougault R., Brou R., Colin J., Durand D., Genoux-Lubain A., Laville J. L., Brun C. Le, Lecolley J. F., Louvel M., Péter J., Steckmeyer J. C., Tamain B., Badala A., Motobayashi T., Rudolf G., Stuttgé L. From binary fission to multifragmentation in the decay of heavy excited nuclei // Phys. Lett. B. – 1993. – v. 302. – p. 162–166.

- [10] Bizard G., Durand D., Genoux-Lubain A., Louvel M., Bougault R., Brou R., Doubre H., El-Masri Y., Fugiwara H., Hagel K., Hajfani A., Hanappe F., Jeong S., Jin G. M., Kato S., Laville J. L., Brun C. Le, Lecolley J. F., Lee S., Matsuse T., Motobayashi T., Patry J. P., Péghaire A., Péter J., Prot N., Regimbart R., Saint-Laurent F., Steckmeyer J. C., Tamain B. Three fragment sequential decay of heavy nuclei around 3 MeV/u excitation energy. // Phys. Lett. B. – 1992. – v. 276. – p. 413–417.
- [11] Bougault R., Colin J., Delaunay F., Genoux-Lubain A., Hajfani A., Brun C. Le, Lecolley J. F., Louvel M., Steckmeyer J. C. Time-scale analysis of events with three heavy fragments in the  $^{22}\text{Ne}+\text{Au}$  collisions at 60 MeV/u // Phys. Lett. B. – 1989. – v. 232, N 3. – p. 291–295.
- [12] Wagemans Cyriel. The nuclear fission process // Boca Raton: CRC Press. – 1991.
- [13] Fomichev A.S., David I., Ivanov M.P., Sobolev Yu.G. Investigation of quaternary fission of  $^{248}\text{Cm}$  and  $^{252}\text{Cf}$  using two CsI(Tl) counters // Nucl. Instr. Meth. A. – 1997. – v. 384. – p. 519–521.
- [14] Fields D. E., Kwiatkowski K., Morley K. B., Renshaw E., Wile J. L., Yennello S. J., Viola V. E., Korteling R. G. Neck emission of intermediate-mass fragments in the fission of hot heavy nuclei // Phys. Rev. Lett. – 1992. – v. 69. – p. 3713–3716.
- [15] Chen S. L., de Souza R. T., Cornell E., Davin B., Hamilton T. M., Hulbert D., Kwiatkowski K., Lou Y., Viola V. E., Korteling R. G., Wile J. L. Emission of intermediate mass fragments during fission // Phys. Rev. C. – 1996. – v. 54. – p. R2114–R2118.

---

Получено 4 декабря 2002 г.

*Макет Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 05.12.2002.

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

Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,65. Тираж 100 экз. Заказ № 53648.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)