

Тюкавкин Андрей Николаевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРОЙНОГО
ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР НА СОПОСТАВИМЫЕ ПО МАССЕ
ОСКОЛКИ

Специальность: 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва – 2009

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флёрова Объединённого института ядерных исследований и в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Московском инженерно-физическом институте (государственном университете)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук профессор Пятков
Юрий Васильевич

Научный консультант: доктор философии Каманин Дмитрий Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Титаренко Юрий
Ефимович
кандидат физико-математических наук Еремин Николай
Владимирович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук Институт ядерных
исследований, г.Троицк

Защита состоится «24» июня 2009г. в «15.00» на заседании диссертационного совета
Д 212.130.07 при Московском инженерно-физическом институте по адресу: 115409, Москва,
Каширское шоссе, дом 31, в аудитории 401 главного корпуса, тел. 324-84-98, 323-95-26.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан «__»_____2009 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре,
заверенный печатью организации.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н. профессор

Улин С.Е.

Общая характеристика работы.

Актуальность темы.

Деление ядра открыто более 60 лет назад, но до сих пор нет единой теории, которая бы успешно объясняла все аспекты этого процесса. Наиболее хорошо изучено бинарное деление слабо возбуждённых ядер, однако существенные аспекты физики процесса проявляются в делении и на большее число осколков. Достаточно подробно исследовался процесс тройного, а в последнее время и четвёрного деления. В «обычном» тройном делении ядро делится на два тяжёлых осколка с вылетом лёгкой частицы вплоть до ^{37}S перпендикулярно оси деления («экваториальная эмиссия»). Новую информацию к размышлению дало открытие полярного тройного деления или «полярной эмиссии», преимущественно альфа-частиц, по оси деления.

Уже в 50-х годах прошлого века теоретики рассматривали возможность так называемого истинно тройного деления - распада ядра на три почти равных по массе осколка. Diehl и Greiner в рамках модели жидкой капли показали, что цепочко-подобная конфигурация из трех предосколков наиболее энергетически выгодна для реализации подобного распада. Как следствие, естественно ожидать кинематику разлета осколков, близкую к коллинеарной. Вместе с тем, в большинстве инструментальных экспериментальных работ по поиску истинно тройного деления предполагалось, что осколки будут разлетаться под углами около 120° друг к другу. Полученные в такой геометрии указания на эффект не получили надежного подтверждения. Поиски радиохимическими и масс-спектрометрическими методами также не увенчались успехом, возможно, в силу внутренних ограничений самих методов.

Первые указания на именно коллинеарный тройной распад спонтанно делящихся ядер ^{252}Cf и ^{248}Cm на сопоставимые по массе осколки были получены на время-пролетном спектрометре тяжелых ионов ФОБОС в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ около десяти лет назад. Использовался метод «потерянной массы». В рамках такого подхода реально регистрируются в совпадении только два фрагмента, а вывод о том, что распад не был бинарным, делается, если сумма масс зарегистрированных осколков значительно меньше массы исходного ядра. Основным источником фоновых событий при этом являются осколки, рассеявшиеся на поддерживающей входное окно решетке ионизационной камеры. Важным аргументом в пользу того, что наблюдаемый эффект не является методическим артефактом, была неизменная магичность одного или нескольких продуктов распада. В этом отношении процесс напоминает тяжелоионную радиоактивность (кластерный распад), открытую в 1984 году H.J. Rose и G.A. Jones. Именно в силу этой аналогии авторы назвали обнаруженный распад «тройным коллинеарным кластерным распадом» (ТККР).

Собранные к началу настоящей работы экспериментальные указания на наличие канала ТККР основаны на анализе массовых распределений осколков деления. Как отмечалось выше, рассеянные осколки могут имитировать искомый эффект, поэтому принципиально важно для надежной идентификации событий ТККР использование других переменных, таких как ядерный заряд осколков и нейтронная множественность событий распада. Актуальна также задача обнаружения ТККР в ранее не изученных ядерных системах. Решение перечисленных вопросов и стало предметом настоящей работы.

Цели исследования.

1. Экспериментальное доказательство гипотезы о существовании многотельных коллинеарных кластерных мод деления тяжёлых ядер.
2. Развитие методик идентификации многотельных распадов, в том числе, с использованием нейтронного канала регистрации и канала регистрации ядерного заряда.

Научная новизна и практическая ценность работы.

1. Впервые доказано существование двумерной области продуктов ТККР тяжелых ядер с экстремально высоким, по сравнению с известным тройным делением, выходом $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ на бинарное деление. Вывод сделан в результате выявления событий ТККР не только в распределении масса-масса осколков деления, как это делалось в предыдущих экспериментах, но и за счет отбора по ядерному заряду, удельным ионизационным потерям, времени дрейфа трека фрагмента в ионизационной камере, а также числу нейтронов, зарегистрированных в акте распада.
2. Получено прямое подтверждение ранее выдвинутой гипотезы относительно внутренней структуры области высоких выходов продуктов ТККР (двумерного бампа), а именно:

- в распределении масса-масса она ограничена, по крайней мере, с трех сторон массовыми числами, соответствующими магическим ядрам, т.е. имеет форму прямоугольника;
- включает наклонные хребты $M_s = M_1 + M_2 = \text{const}$, где M_1 , M_2 – массы зарегистрированных осколков, а const принимает ряд значений, соответствующих сумме масс магических ядер $^{128, 132}\text{Sn} + ^{80}\text{Ge}$, $^{128, 132}\text{Sn} + ^{68, 70}\text{Ni}$.

Вывод сделан в результате анализа обсуждаемой области, отсепарированной от фоновых событий применением отборов по ядерному заряду, удельным ионизационным потерям, времени дрейфа трека фрагмента в ионизационной камере.

Неизменность положения хребтов $M_s = \text{const}$ при переходе от ^{252}Cf к $^{236}\text{U}^*$, отличающихся по массе на 16 а.е.м., подтверждает гипотезу о том, что они порождены парами магических кластеров, перечисленных выше.

3. Анализ распределения масса-масса осколков деления ^{252}Cf с отбором событий по числу зарегистрированных нейтронов позволил сделать вывод, что события, формирующие двумерный бамп, представляют собой изотропный источник нейтронов с множественностью ~ 4 .

4. Для ранее неизученной системы $^{236}\text{U}^*$ подтверждено наличие прямоугольной структуры в окрестности равных масс зарегистрированных осколков, связанной с магическими ядрами $^{68, 70}\text{Ni}$.

5. Впервые обнаружена мода ТККР $^{236}\text{U}^*$ с выходом $\sim 8 \cdot 10^{-6}$ на бинарное деление, в рамках которой перед разрывом система представляет собой цепочку из трех ядер сопоставимых масс, причем крайние кластеры - одинаковые магические ядра.

6. Впервые для системы $^{242}\text{Pu}^*$ обнаружена кластеризация центрального кластера в предразрывной цепочке из трех магических ядер.

7. Впервые для системы $^{242}\text{Pu}^*$ обнаружена делительная мода $^{128-132}\text{Sn}/^{110-112}\text{Ru}$, в которой деформированное магическое ядро Ru после разрыва системы представляет собой ядерную молекулу, состоящую из сферического магического ядра (Ni или Ge) и легкого кластера.

Научная значимость полученных результатов заключается в том, что для ранее неизвестного типа ядерного превращения – ТККР выявлены проявления, существенные для построения его физической модели.

Вклад автора.

Автором лично были разработаны алгоритмы, реализованные в компьютерных программах, для временной калибровки двух плечевого время-пролетного спектрометра с учетом потерь энергии осколков деления (ОД) в стартовых детекторах, калибровки заряда осколков деления при его измерении широкоапертурной ионизационной камерой в составе двух плечевого время-пролетного спектрометра, а также математическая модель канала регистрации нейтронов модифицированного спектрометра ФОБОС.

Автор принял участие в экспериментах по поиску канала ТККР в делении $^{252}\text{Cf(sf)}$, $^{236}\text{U}^*$, $^{242}\text{Pu}^*$ и выполнил основной объем работ по обработке результатов этих экспериментов.

На защиту выносятся следующие результаты.

1. Математическая модель канала регистрации нейтронов модифицированного спектрометра ФОБОС.
2. Методика калибровки заряда осколков деления при его измерении широкоапертурной ионизационной камерой в составе двух плечевого время-пролетного спектрометра.
3. Методика временной калибровки двух плечевого время-пролетного спектрометра с учетом потерь энергии ОД в стартовых детекторах.
4. Экспериментальные доказательства существования острова больших выходов продуктов тройного коллинеарного кластерного распада ($\sim 4 \cdot 10^{-3}$ на бинарное деление) посредством анализа их зарядовых и нейтронных характеристик.
5. Обнаружения свидетельств существования моды коллинеарного распада в виде трех-кластерной цепочки магических ядер.
6. Экспериментальные подтверждения существования моды многотельного коллинеарного распада, базирующейся на двух магических кластерах Ni.

Публикации.

Диссертация написана на основе работ, опубликованных с 2003 по 2008 год. За это время опубликовано 28, из них 4 в реферируемых журналах.

Апробация диссертации.

Результаты, включённые в диссертацию, докладывались на следующих семинарах и научных конференциях:

- XVI Int. Workshop on Physics of Fission, Обнинск, Россия, 7-10 октября 2003 г.
- Научные сессии МИФИ. Конференция Научно Образовательного Центра CRDF. Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях. Москва, Россия, 2003-2008 года.
- VIII Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, Дубна, Россия, 2-6 февраля 2004 г.
- 13th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Дубна, Россия, 25-28 мая, 2005 г.
- 14th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Дубна, Россия, 24-27 мая 2006 г.

- International Symposium on Exotic Nuclei "EXON2006", Ханты Мансийск, Россия, 17-22 июля 2006 г.
- 15th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Дубна, Россия, 16-19 мая 2007 г.
- 16th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Дубна, Россия, 11-14 июня 2008 г.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Общий объём диссертации 131 страница. Диссертация содержит 102 рисунка, 6 таблиц и список литературы, включающий 91 наименование.

Содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется предмет и цель диссертации, а так же излагается краткое содержание диссертации.

В первой главе представлен обзор основных экспериментальных и теоретических работ по тройному делению и тяжелоионной радиоактивности. Первая экспериментальная работа по поиску истинно тройного деления выполнена в 1950 году (Rosen и Hudson [1]) с помощью трёх секционной ионизационной камеры. Полученная оценка вероятности истинного тройного деления в реакции $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$, составила $6.7 \cdot 10^{-6}$. Наиболее спорные результаты были получены Muga et al [2-5]. Истинно тройное деление искалось в следующих реакциях $^{252}\text{Cf}(sf)$, $^{233}\text{U}(n_{\text{th}},f)$, $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$, $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}},f)$ и $^{241}\text{Pu}(n_{\text{th}},f)$. Экспериментальная установка состояла из трёх полупроводниковых детекторов, расположенных под углом 120° друг к другу. Выход тройных событий по отношению к бинарному делению составил порядка 10^{-6} . В 1970 году Steinberg [6] выступил с критикой этих результатов и показал, что их можно объяснить рассеянием. Эксперименты, проведённые радиохимическим методом Roy [7] и Stoenner [8], не подтвердили, но и не опровергли результаты Muga et.al. Подобный результат был получен и масс-спектрометрическим методом в работе Kugler и Clark [9]. Выход тройного деления в этой работе на 1-6 порядков ниже, чем у Muga et al. В эксперименте на детектирующей системе DIOGENES [10] для ^{252}Cf выход тройного деления в диапазоне масс $12 < A < 30$ составил $< 8 \cdot 10^{-8}$, а для $70 < A < 90$ порядка 10^{-9} .

В теоретической работе Струтинского [11] в 1963 году в рамках жидко-капельной модели было показано, что наряду с конфигурацией с одной шейкой существуют более сложные конфигурации делящейся системы с двумя и даже тремя шейками. Из теоретических вычислений [12, 13] для тройного деления следует, что вытянутые формы

системы энергетически более выгодны, чем сплюснутые. При этом, по крайней мере при последовательном разрыве цепочки из трех осколков, можно ожидать почти коллинеарной геометрии их разлета.

Таким образом, размещение детекторов в работах [2-5, 10], где предполагалось, что осколки будут разлетаться под углом 120° , не оптимально.

Хотя в «обычном» наиболее изученном и вероятном тройном делении легкая частица вылетает почти перпендикулярно оси деления, известны примеры и коллинеарных распадов, что свидетельствует об отсутствии принципиальных запретов на подобную кинематику.

Примером тройного коллинеарного деления может служить полярная эмиссия с вылетом лёгкой заряженной частицы. Данный тип распада был открыт *Piasecki* [15]. В работе [16] в реакции $^{32}\text{S} + ^{59}\text{Co}$ and $^{32}\text{S} + ^{63}\text{Cu}$ при $E \sim 5.6 \text{ А} \cdot \text{МэВ}$ получены указания на наличие тройного коллинеарного распада составной системы, при этом один из осколков испускается из шейки, соединяющей два фрагмента. В работе [17] сообщалось о коллинеарном тройном делении ядра ^{238}U индуцированном релятивистскими протонами. Часть калибровочных данных была использована для поиска спонтанного тройного коллинеарного деления ^{252}Cf . Авторы [18] искали только симметричный тройной коллинеарный распад с медленно движущимся третьим фрагментом. На массу третьего, центрального, фрагмента было наложено условие $M_3 > 75 \text{ а.е.м.}$. Искомый эффект не был обнаружен на уровне $7.5 \cdot 10^{-6}$ по отношению к бинарному делению. На спектрометре ФОБОС (ЛЯР, ОИЯИ) [19], было изучено тройное деление горячей тяжёлой составной системы с энергией возбуждения 1.5–2.5 МэВ/а.е.м. в реакциях ^{14}N (53 АМэВ) с ^{197}Au и ^{232}Th . Полученные данные согласуются с допущением о коллинеарном удлинении делительной конфигурации с лёгким фрагментом расположенным посередине между двумя тяжёлыми.

Еще один существенный момент для планирования экспериментов по поиску ранее неизвестных распадов – безусловно ожидаемое влияние оболочечных эффектов на физику процесса. Одним из самых ярких примеров такого рода является кластерный распад (тяжелоионная радиоактивность) [20, 21, 22].

Во второй главе описываются экспериментальные установки, на которых проводились исследования. Первые эксперименты выполнены на 4 π -спектрометре ФОБОС (рис.1) [23], с помощью которого были впервые найдены указания на существование тройного коллинеарного распада [24, 25]. Спектрометр был создан в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ для исследования реакций с тяжелыми ионами. Каждый из 29 модулей спектрометра ФОБОС состоит из позиционно-чувствительного плоскопараллельного

лавинного счетчика (ПЧЛС), большой ионизационной камеры (БИК) и мозаики из 7 сцинтилляционных детекторов. Последние в наших экспериментах не использовались.

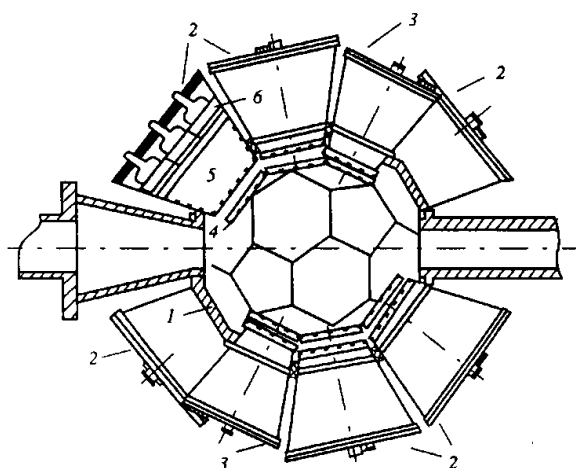


Рис. 1: Конструкция установки ФОБОС.

1– вакуумная камера; 2,3 – детекторные модули; 4–позиционно-чувствительные счетчики; 5– брегговская ионизационная камера; 6– сцинтилляционный счетчик.

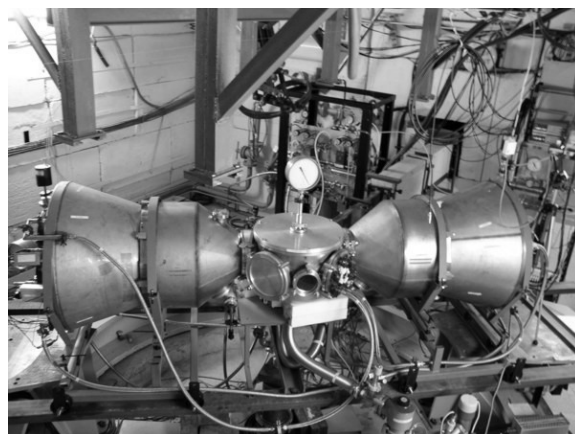


Рис.2. Спектрометр МиниФобос на пучке реактора ИБР-2.

Необходимость работы на различных пучках привела к созданию мобильного спектрометра МиниФобос (рис.2). Спектрометр включает два модуля ФОБОС и сменную реакционную камеру. Первый эксперимент на спектрометре МиниФобос был выполнен в ЛЯР ОИЯИ. Целью эксперимента являлся поиск коллинеарных многотельных распадов в реакции $^{252}\text{Cf(sf)}$. Для следующего эксперимента спектрометр МиниФобос был установлен на пучке тепловых нейтронов импульсного реактора ИБР-2 в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка (ОИЯИ). В эксперименте исследовалась реакция $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$.

Эксперименты по поиску многотельных кластерных распадов на спектрометрах ФОБОС и МиниФобос велись в рамках метода потерянной массы. В рамках коллаборации в Ускорительной лаборатории университета г. Ювяскюла (Финляндия) была предпринята попытка зарегистрировать все продукты многотельного коллинеарного распада в реакции $^{238}\text{U}+^4\text{He}(40 \text{ МэВ})$. Экспериментальная установка представляла собой двух плечевой спектрометр время-энергия и включала две мозаики PIN-диодов по 19 детекторов каждый. В качестве стартового использовался детектор на основе микроканальных пластин.

Важную роль в получении корректных данных играют процедуры их обработки. Так использование широкоапертурного стартового детектора сопряжено с заметными потерями энергии осколков во входных окнах. Была разработана оригинальная процедура калибровки времени пролёта для нахождения истинных скоростей осколков деления при использовании

относительно толстых плёнок временных детекторов. Она базируется на двух вложенных процедурах подгонки квазиэкспериментального спектра скоростей ОД к известному из литературы.

В данной главе описана также использованная в работе процедура восстановления масс осколков по измеренной скорости и части энергии (около 70% от исходной), выделявшейся в ионизационной камере [26]. Обработка данных с PIN-диодов существенно отличается от процедур, применяемых для газовых детекторов. В работе использовалась ранее разработанная в научной группе процедура измерения энергии осколков [27] и восстановления их масс использующая эмпирическое описание дефекта амплитуды для PIN-диодов, полученное Мульгиным и др. [28].

В третьей главе описаны каналы измерения ядерного заряда осколков и нейтронной множественности событий деления.

Для выявления экзотических делительных мод спектрометр ФОБОС был дополнен поясом из 140 ^3He нейтронных счётчиков. Пояс располагался перпендикулярно средней оси деления. Благодаря такой геометрии обеспечивается существенная разница в эффективности регистрации нейтронов, испускаемых из движущихся осколков и изотропного источника (приблизительно вдвое). Таким источником после разрыва системы может быть, например, малоподвижный, деформированный центральный осколок, расположенный между двумя соседями равных масс. В диссертации разработана модель тракта регистрации нейтронов учитывающая статистику регистрации нейтронов, сопровождающих бинарное деление, случайные совпадения и фоновые события [29]. На рис.3 представлено сравнение экспериментальных данных по числу зарегистрированных нейтронов с результатами моделирования. Наблюдается хорошее согласие расчетных и экспериментально полученных распределений по числу зарегистрированных нейтронов на акт деления в диапазоне 0÷5. Хвост экспериментального распределения при больших экспериментальных множественностях указывает на наличие нейтронного источника, не учтенного в модели.

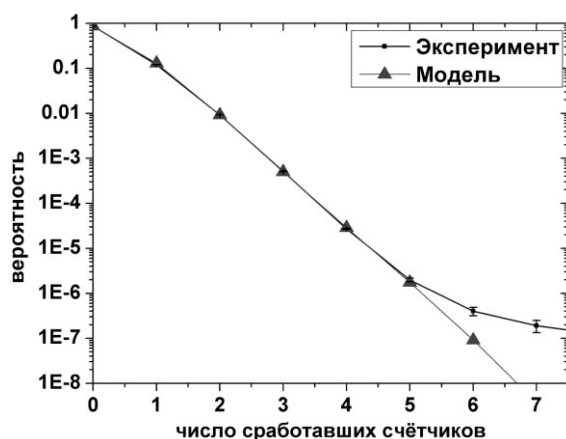


Рис. 3: Сравнение модельных расчетов с экспериментальным распределением по числу сработавших счётчиков.

для этого, как известно, тяжёлые ионы должны иметь энергию больше 1 МэВ/а.е.м. Для осколков деления пик Брэгга отсутствует, поэтому была использована методика определения заряда по времени дрейфа трека, образованного фрагментом в газе камеры [30]. Для ее реализации в экспериментах на спектрометре МиниФобос измерялся параметр «время дрейфа» D , соответствующий интервалу между временным сигналом стопового лавинного счетчика (т.е. практически моментом образования трека) и сигналом временной привязки к фронту импульса с сетки Фриша БИК. Измерение ядерного заряда осколков деления представляет собой технически более сложную задачу, чем измерение энергии. Разрешение по заряду непосредственно зависит от однородности электрического поля и постоянства массы газа в рабочем объеме камеры. Для обеспечения второго из условий недостаточно стабилизировать только давление и состав газовой смеси – дополнительно необходима термостабилизация камеры. Перечисленные условия были обеспечены в эксперименте на спектрометре МиниФобос по исследованию реакции $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$ на пучке реактора ИБР-2.

Для вычисления ядерного заряда осколков по полученным в эксперименте данным было разработано два варианта калибровки по заряду. Общая идея калибровки состоит в нахождении вектора параметров в зависимости «импульс осколка - время дрейфа трека в камере» подгонкой к экспериментальным данным для ряда фиксированных значений ядерного заряда, известного через первичную массу M_{tt} , найденную по скоростям совпадающих осколков [31]. Тестирование на модельных данных показало, что использованная параметризация заряда из работы [30] в рамках разработанной в настоящей работе процедуры калибровки позволяет удовлетворительно восстанавливать ядерный заряд ОД в широком энергетическом диапазоне. Оцененное разрешение по заряду в легком пике

Принципиального увеличения надежности идентификации событий ТККР можно достичь привлечением экспериментальных переменных не зависящих, с точки зрения методики измерения, от массы осколков. Одна из таких переменных – число регистрируемых на акт деления нейтронов - обсуждалась выше. Другой переменной может быть ядерный заряд осколков. Для измерения заряда тяжёлых ионов могут использоваться ионизационные камеры. Детекторные модули ФОБОС позволяют определять заряд по пику Брэгга, но

осколков $\sigma \approx 1.6$ единиц заряда. Средние значения заряда (таблица 1) согласуются с литературными данными из работы [32].

Таблица 1. Средние значения зарядового спектра.

	МиниФобос		Lang et al [32]
	Модуль 1	Модуль 2	
$\langle Z \rangle$ Лёгкий пик	38.18	38.22	37.92
ширина на полувысоте	6.45	7.06	5.43
$\langle Z \rangle$ Тяжёлый пик	52.26	53.02	53.92
ширина на полувысоте	10.43	10.71	5.43

В четвёртой главе представлены основные экспериментальные результаты. В наших предыдущих работах по изучению спонтанного деления ядра ^{252}Cf , наблюдалась хорошо заметная особенность в распределении масса-масса осколков деления (ОД) без какого-либо отбора регистрируемых событий. Имеется в виду специфический двумерный бамп, расположенный ниже локуса событий обычного двойного деления [29, 30] с выходом $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ на бинарное деление (рис.4).

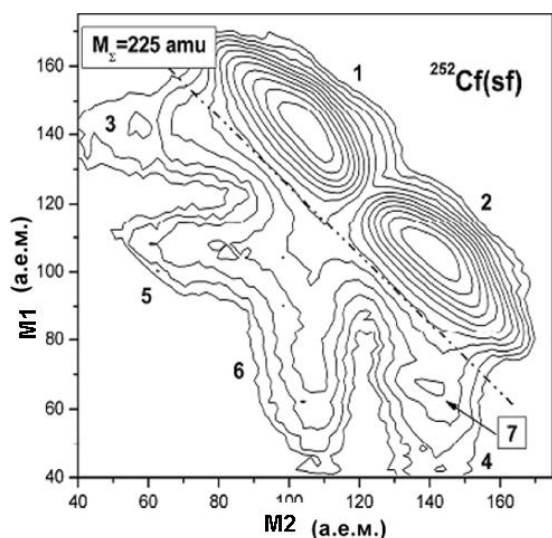


Рис.4: Распределение масса-масса коллинеарных осколков (в логарифмическом масштабе), зарегистрированных в совпадении с противоположным плечом (соответственно 1 и 2) спектрометра для реакции $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$. 1,2- локусы бинарного деления; 3-6 "хвосты", рассеянных осколков; 7- особенность, расположенная ниже линии суммы масс $M1+M2=225$ a.e.m.

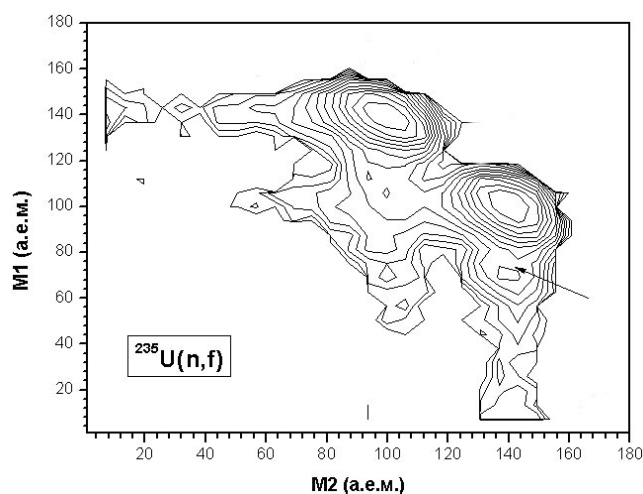


Рис. 5: Распределение масса-масса продуктов реакции $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}},\text{f})$. Стрелкой отмечена особенность, аналогичная бампу 7 на рис.4.

Поиск проводился методом потерянной массы. В этом случае регистрируются только два участника процесса. Если их суммарная масса значительно меньше массы исходной делящейся системы, подобное событие выделяется для дальнейшего анализа на предмет реализации многотельного распада. Наличие особенности в массовом распределении ОД в виде бампа подтверждено в настоящей работе для другой ядерной системы – $^{236}\text{U}^*$. Эксперимент по исследованию реакции $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$ был выполнен на спектрометре МиниФобос установленном на пучке тепловых нейтронов реактора ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ. На рис.5 представлено распределение масса-масса ОД полученное в этой реакции. Хорошо видна структура, помеченная стрелкой, аналогичная обнаруженной для $^{252}\text{Cf}(sf)$ с выходом $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ /бинарное деление.

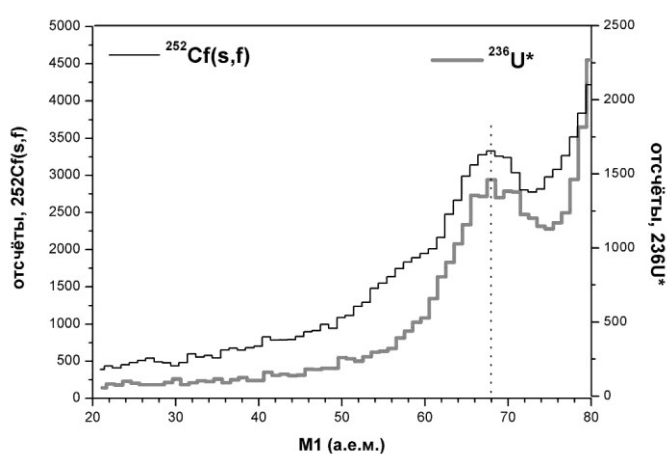


Рис. 6. Проекция бампа в распределении масса-масса ОД (рис.4, 5) на ось M1.

На рис.6 для сравнения показаны проекции бампа на ось M1. Несмотря на разницу в 16 а.е.м. в массах делящихся систем, положение характерных пиков в спектрах совпадает. Массовое число (68), соответствующее их центру, ассоциируется с «полумagicским» изотопом ^{68}Ni (сферическая оболочка $Z=28$ и нейтронная подболочка $N=40$).

Применение газовых детекторов позволило измерять заряд осколков деления. На рис.7 представлены зарядовые спектры ОД из реакции $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$, полученные на спектрометре МиниФобос. В плече спектрометра со стороны подложки источника (модуль 1, на рис.7), т.е. в том же, где виден бамп в распределении масса-масса (рис. 5), наблюдается повышенный выход ОД с зарядами, соответствующими массам осколков, формирующих пик на рис.6. Влияние на выход эффекта подложки требует дальнейшего изучения. Текущая гипотеза состоит в том, что именно в подложке за счет неупругого взаимодействия разваливается ядерная молекула, компоненты которой летят далее независимо с небольшим углом между ними. Для исключения, или, по крайней мере, существенного подавления фона в области обсуждаемого бампа использовался отбор событий, основанный на переменных, чувствительных к ядерному заряду ОД – времени дрейфа трека в ионизационной камере и удельных ионизационных потерях (dE) ОД в стоповом лавинном счетчике. На рис.8 показаны результаты, полученные при отборе с использованием окна на матрице V-dE.

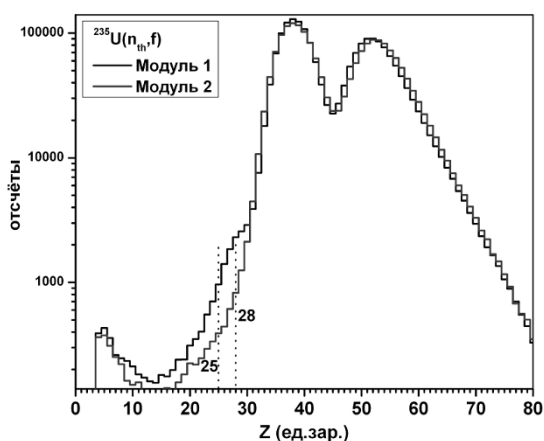
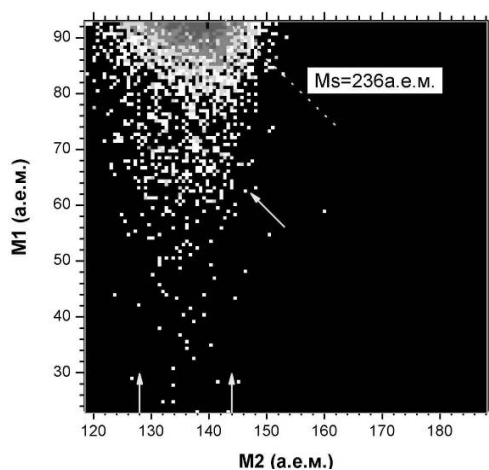
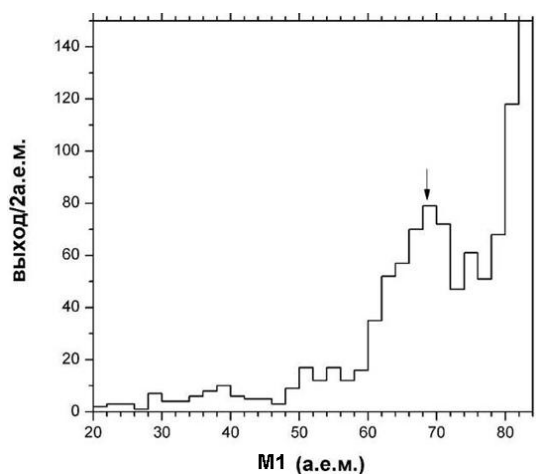


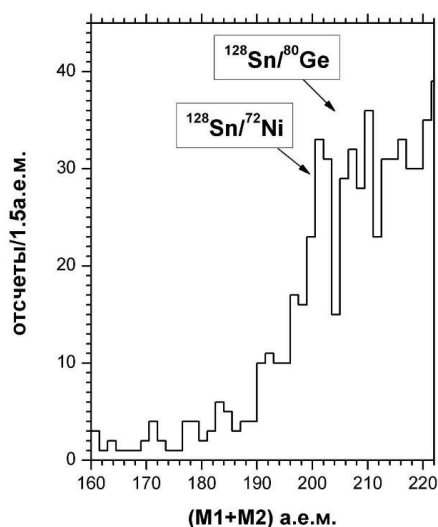
Рис. 7. Спектр ядерного заряда ОД из реакции $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, зарегистрированных, соответственно, в первом и втором плече спектрометра. Видно различие в спектрах в области зарядов меньше 30.



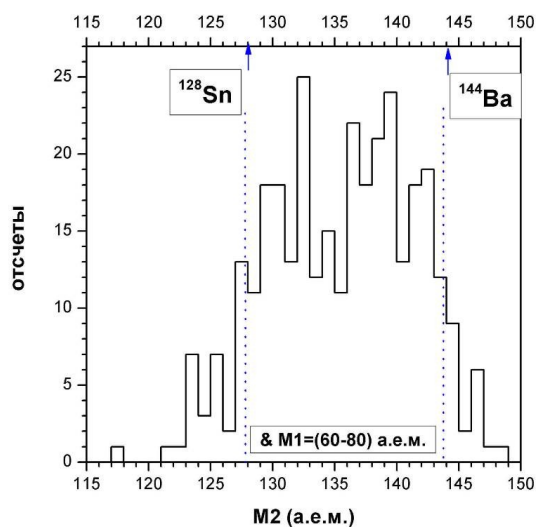
а



б



в



г

Рис. 8. Распределение масса-масса ОД из реакции $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ с отбором событий в окне на матрице V-dE (а). Проекция распределения на ось M1 (б) и на направление $M1+M2=\text{const}$ (в), на ось M2 (г). Детали в тексте.

Наряду с уже обсуждавшимся пиком в проекции на ось M1 (рис. 8б), проявилась еще одна структурная особенность бампа. Речь идет о наклонных хребтах $M1+M2=\text{const}$ (это направление указано наклонной стрелкой на рис. 8а, а проекция в этом направлении представлена на рис. 8в). Как видно из рис. 8г, по горизонтали бамп ограничен массовыми числами известных магических ядер – ^{128}Sn и ^{144}Ba .

Как уже отмечалось, эффективным средством повышения надежности идентификации событий ТККР является выявление таких событий с использованием экспериментальных переменных, не зависящих от основного фоновых фактора – рассеяния осколков. Такой переменной является число нейтронов, зарегистрированных в акте деления. Наряду с уже обсуждавшимся пиком в проекции на ось M1 (рис. 8б), проявилась еще одна структурная особенность бампа. Речь идет о наклонных хребтах $M1+M2=\text{const}$ (это направление указано наклонной стрелкой на рис. 8а, а проекция в этом направлении представлена на рис. 8в). Как видно из рис. 8г, по горизонтали бамп ограничен массовыми числами известных магических ядер – ^{128}Sn и ^{144}Ba .

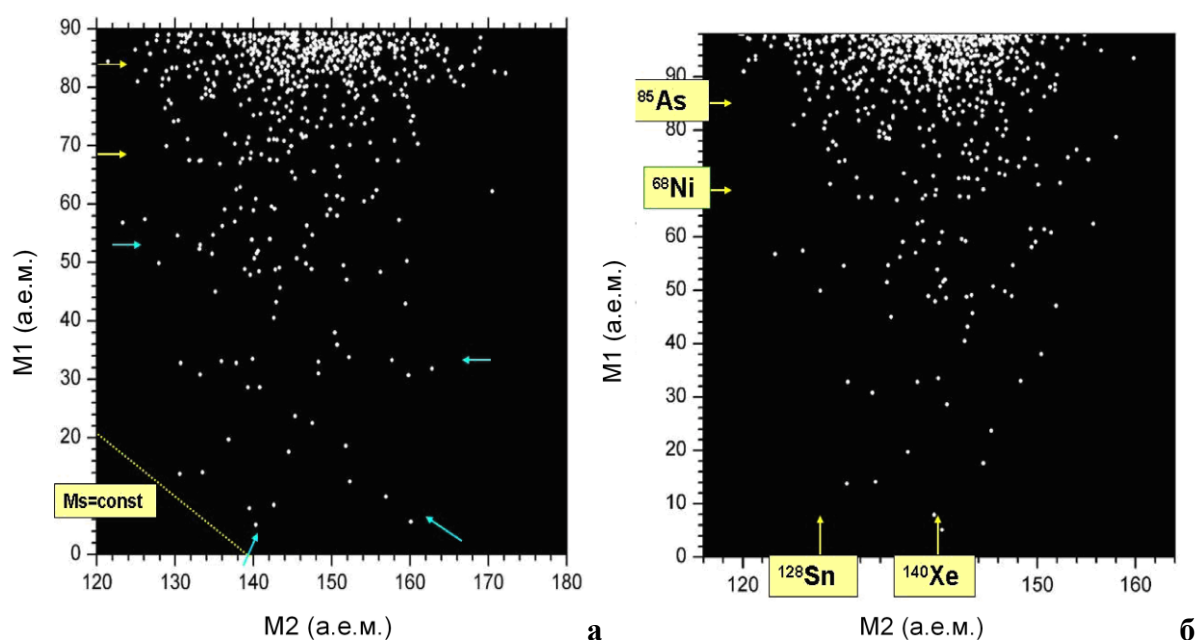


Рис. 9. Распределение масса-масса ОД $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ при условии регистрации 2-х и более нейтронов (а) и при дополнительном отборе событий по скоростям осколков (б).

На рис.9а показан плот масса-масса для событий, в которых было зарегистрировано два и более нейтрона. Такое распределение наблюдается только в плече со стороны подложки источника. Представляется, что точки ниже основного сгущения (локуса) расположены упорядоченно на прямых, параллельных координатным осям, вдоль направления $M_s=\text{const}$ и почти перпендикулярного ему. Если соответствующим отбором отсечь события с экстремальными скоростями, то в анализируемом распределении хорошо просматривается прямоугольник, ограниченный магическими осколками ^{85}As , ^{68}Ni , ^{128}Sn и ^{140}Xe (рис. 9б).

Таким образом, при отборе по нейтронам в массовом распределении ОД проявляется одна из структур, формирующих бамп (см. рис. 6, 8б,г)

При отборе событий с тремя и более зарегистрированными нейтронами (снова в плече, обращенном к подложке источника) также наблюдается прямоугольная структура со сторонами $M1=\text{const}$ и $M2=\text{const}$ (рис. 10). В этом случае границы прямоугольника определяются магическими ядрами $^{80,82}\text{Ge}$, ^{132}Sn , ^{144}Ba .

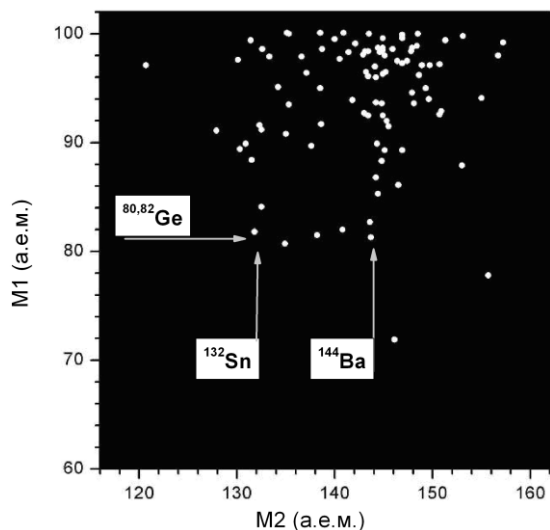


Рис. 10. Распределение масса-масса ОД $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ для событий, в которых зарегистрировано три и более нейтрона при дополнительном отборе событий по скоростям осколков.

ТККР, порождающего упорядоченные структуры, представленные на рис. 9, 10. Экспериментальный выход образующих их событий распада сравнивался с расчетной зависимостью для модельного изотропного источника с множественностью $3 \div 6$. Наилучшее согласие получено для множественности 4 (рис. 11).

По модельной кривой, наложенной на экспериментальные точки, получена оценка полного выхода рассматриваемой моды ТККР $Y \sim 10^{-3}$ / бинарное деление, что разумно согласуется с выходом событий, образующих бамп в распределении масса-масса ОД (рис.5). Действительно, из двух структур, формирующих бамп – $M=\text{const}$ и $M_s=\text{const}$ (рис. 8) – только первые обнаруживают себя при отборе по нейтронам. Таким образом, за счет привлечения новых экспериментальных переменных удалось не только подтвердить ранее обнаруженное в распадах $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ проявление ТККР в виде двумерного бампа в распределении масса-масса ОД, и оценить эти события как источник нейтронов.

Могут ли обсуждаемые структуры образоваться случайно? Количественная оценка соответствующей вероятности получена в работе [37] с использованием алгоритма Хаффа формальной идентификации прямой, состоящей из отдельных точек. Так вероятность случайной реализации прямой из 10 точек на рис.9а (идет вверх-направо от $M2=140$ а.е.м.) не превышает 2%. Очевидно, что более сложные структуры, такие как прямоугольники, могут случайно реализоваться со значительно меньшей вероятностью.

Наличие адекватной модели тракта регистрации нейтронов (рис.3) позволило оценить нейтронные характеристики канала

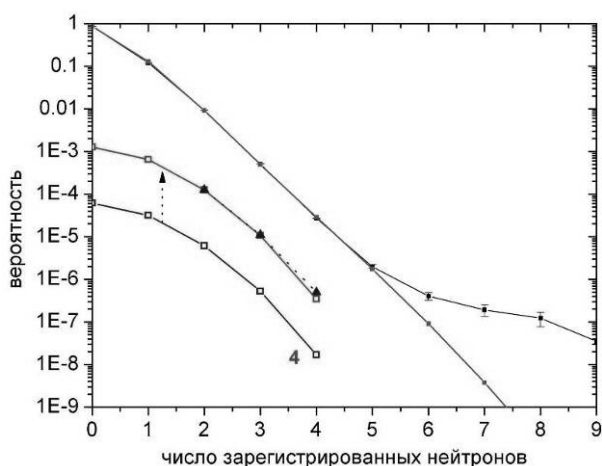


Рис.11. Вероятность регистрации фиксированного числа нейтронов для изотропного источника с множественностью 4 (нижняя кривая, условно отнормированная на полный выход 10^{-4}), экспериментальные точки (треугольники) для $n \geq 2, 3, 4$ (где n -число зарегистрированных нейтронов). Стрелкой указано направление перемещения расчетной кривой для наложения на экспериментальные точки.

подоблолочка $N=40$)

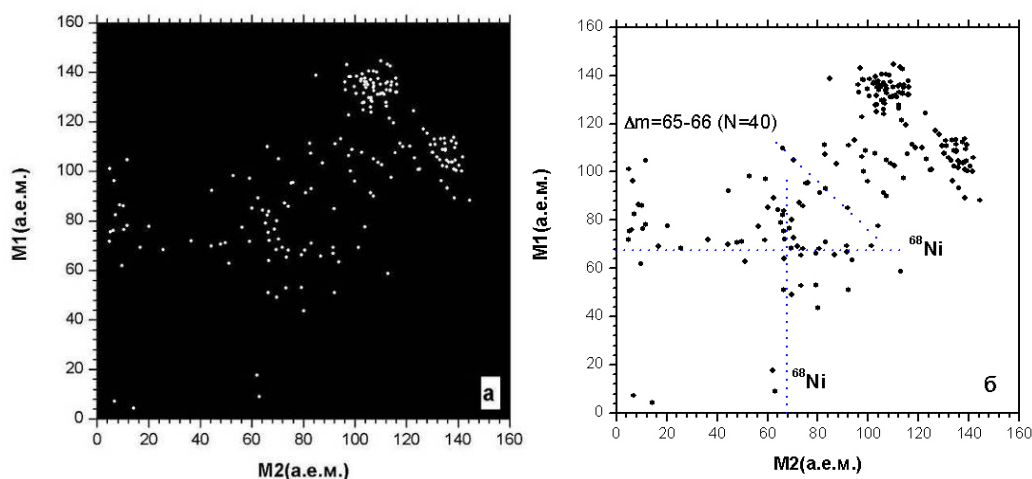


Рис. 12. Распределение событий деления реакции $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, имеющих приблизительно равные импульсы и скорости генетически связанных осколков (а). В центре изображения хорошо видна специфическая структура в виде прямого угла. События в вершине угла, расположенной в точке (68, 68), вероятно, связаны с магическим изотопом ^{68}Ni (б).

Дополнительный отбор событий с примерно равными зарядами показывает, что события в вершине треугольника имеют заряды 28 и 30, что согласуется с гипотезой о регистрации двух ядер Ni. Несколько завышенные значения заряда для второго плеча,

Наряду с обсуждавшейся выше особенностью наблюдались и другие эффекты, которые можно трактовать как проявления ТККР. На рис. 12 показаны события, имеющие приблизительно равные импульсы и скорости генетически связанных осколков из реакции $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$. В центральной части распределения выделяется структура в виде прямого угла с вершиной, лежащей на диагонали графика в окрестности точек (68, 68) а.е.м. (рис. 12). Некоторые точки распределения, возможно, лежат на линии $M1+M2=\text{const}$ (наклонная пунктирная линия на рис. 12б). В этом случае соответствующая «недостающая масса» близка к 65 а.е.м. (магическая

ожидаемы. Согласно проведенному моделированию калибровка по заряду несколько смещена во втором плече спектрометра. Аналогичная структура наблюдалась ранее для $^{252}\text{Cf(sf)}$, что дает уверенность в физической природе эффекта.

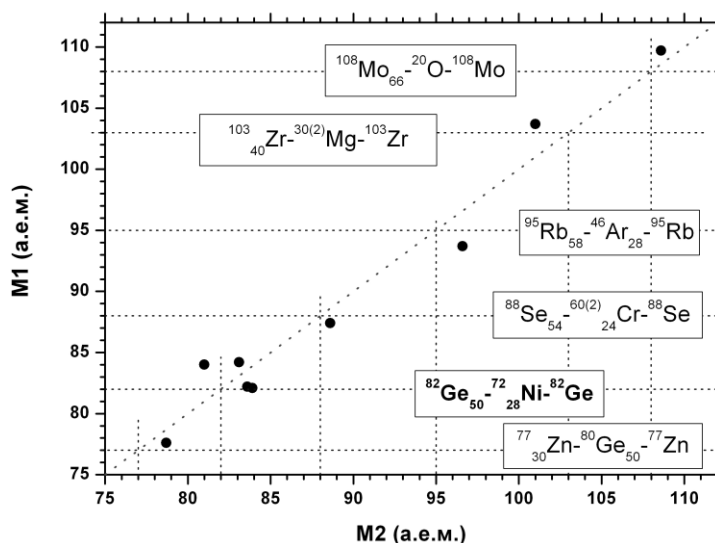


Рис. 13. Кластерные конфигурации, соответствующие точкам в окрестности прямой $M_a=M_b$ при отборе генетически связанных осколков по энергии, импульсу и времени дрейфа.

существенно подавляет фон, обусловленный рассеянием осколков. Экспериментальные точки соответствуют парам магических ядер с равными, в пределах массового разрешения, массами: $^{108}\text{Mo}+^{20}\text{O}+^{108}\text{Mo}$, $^{103}\text{Zr}+^{30}\text{Mg}+^{103}\text{Zr}$, $^{95}\text{Rb}+^{46}\text{Ar}+^{95}\text{Rb}$, $^{88}\text{Se}+^{60}\text{Cr}+^{88}\text{Se}$, $^{82}\text{Ge}+^{72}\text{Ni}+^{82}\text{Ge}$, $^{77}\text{Zn}+^{80}\text{Ge}+^{77}\text{Zn}$. В четырех последних конфигурациях все три фрагмента – магические ядра. При увеличении статистики растет и заселенность области в окрестности линии $M_a=M_b$, достигая выхода $\sim 8 \cdot 10^{-6}$ /бинарное деление.

Аналогичные кластерные конфигурации были обнаружены нами и при исследовании реакции $^{238}\text{U}+^4\text{He}$ (40 МэВ) на спектрометре с мозаиками PIN-диодов [36]. В таблице 2 представлены события, для которых, в пределах массового разрешения, выполняется закон сохранения массы – т.е. сумма масс трех зарегистрированных осколков в каждом событии близка к массе исходного ядра. Во всех трех случаях тяжелый осколок соответствует магическому (дважды магическому) ядру Sn, а дополнительный легкий – деформированному магическому ядру Ru. Де факто, в эксперименте регистрировалось не само ядро Ru, а два более легких фрагмента, по нуклонному составу ему эквивалентных. Для понимания возможного сценария процесса важно отметить, что ни в одном из анализируемых событий закон сохранения импульса не выполнялся. Можно предположить, что сразу после разрыва ядро Ru представляет собой двойную ядерную систему (ядерную молекулу), состоящую из сферического магического кластера (Ni, Ge) и соответствующего легкого ядра. В результате

Использование для выявления событий МКР экспериментальных переменных чувствительных к заряду впервые позволило обнаружить моду многотельного распада обсуждаемую ниже. Исходные данные получены на спектрометре МиниФобос в эксперименте по исследованию реакции $^{235}\text{U}(n_{th},f)$ с помощью спектрометра [35]. На рис.13 представлено распределение масса-масса генетически связанных осколков с отбором по импульсу, энергии и времени дрейфа, что

неупругого рассеяния на ядрах подложки мишени или сетках стартового детектора молекула разваливается.

Таблица 2. Экспериментально обнаруженные трехтельные распады. Все три фрагмента зарегистрированы.

Номер точки	Схема распада
1	$^{128}\text{Sn} + ^{32}\text{Mg} + ^{60}\text{Ge} + 2n$
2	^{112}Ru $^{132}\text{Sn} + ^{68}\text{Ni} + ^{42}\text{S}$
3	^{110}Ru $^{130}\text{Sn} + ^{72}\text{Ni} + ^{40}\text{S}$ ^{112}Ru

пределах экспериментального разрешения). Общим является также то, что предразрывная конфигурация системы выглядела как цепочка из трех магических кластеров, при этом один из них после разрыва фрагментировал на два более легких иона. Следует отметить, идентичность схем распада в 1-ом и 4-ом событиях при их экспериментальной независимости.

Таблица 3. Многотельные распады, для которых выполнены законы сохранения массы, импульса и энергии.

Номер точки	Схема распада	Номер точки	Схема распада
1	$^{98}\text{Sr} + ^{42}\text{S} + ^{28}\text{Mg} + ^{72}\text{Ni} + 2n$ missed	5	$^{120}\text{Pd} + ^{32}\text{Mg} + ^{18}\text{O} + ^{72}\text{Ni}$
2	^{70}Ni $^{108}\text{Mo} + ^{40}\text{S} + ^{18}\text{N} + ^{72}\text{Ni} + 4n$	6	^{50}Ca $^{95}\text{Rb} + ^{42}\text{S} + ^{22}\text{F} + ^{82}\text{Ge} + n$
3	^{58}V $^{84}\text{Se} + ^{52}\text{Ca} + ^{30}\text{Mg} + ^{72}\text{Ni} + 4n$	7	^{65}Mn $^{142}\text{Xe} + ^{34}\text{Al} + ^{14}\text{N} + ^{52}\text{Ca}$
4	^{82}Ge $^{98}\text{Sr} + ^{42}\text{S} + ^{28}\text{Mg} + ^{72}\text{Ni} + 2n$ ^{70}Ni	8	^{48}Ca $^{126}\text{In} + ^{30}\text{Mg} + ^{20}\text{O} + ^{66}\text{Mn} + n$ ^{50}Ca

Перечисленные свойства могут соответствовать следующему качественному сценарию эффекта. На некоторой стадии удлинения компаунд системы происходит ее кластеризация с преформированием трех магических кластеров, образующих цепочку. Центральный кластер испытывает растяжение, так, что на момент отрыва крайних кластеров он представляет собой двойную ядерную систему. Образующие ее легкие ионы становятся

свободными за счет энергии отдачи разлетающихся крайних кластеров первоначальной цепочки.

Таким образом, в двух независимых экспериментах, выполненных на разных время-пролетных спектрометрах, в разных делящихся системах выявлены сходные моды многотельного распада с кинематикой разлета осколков, близкой к коллинеарной. Исходной физической причиной существования всех мод является кластеризация делящейся системы на пути к разрыву, выражающаяся в преформировании в ее объеме магических ядер-кластеров. Наблюдаемые в выходном канале продукты распада образуются как непосредственно в результате разрывов исходной системы, так и, предположительно, в результате распада «приготовленных» перед разрывом двойных ядерных систем в неупругих рассеяниях на конструктивных элементах спектрометра (подложке мишени, сетках стартового детектора и т.д.).

В заключении приведены основные результаты диссертации.

Основные публикации по теме диссертации.

В реферируемых научных журналах:

1. Yu.V.Pyatkov, D.V.Kamanin, A.A.Alexandrov, I.A.Alexandrova, S.V.Khlebnikov, S.V.Mitrofanov, V.V.Pashkevich, Yu.E.Penionzhkevich, Yu.V.Ryabov, E.A.Sokol, V.G.Tishchenko, A.N.Tyukavkin, A.V.Unzhakova and S.R.Yamaletdinov. New Indications of Collinear Tripartition in $^{252}\text{Cf(sf)}$ Studied at the Modified FOBOS Setup // Physics of Atomic Nuclei.- 2003.- v.66, N 9.- p.1631-1635.
2. D.V.Kamanin, Yu.V.Pyatkov, E.A.Sokol, S.V.Mitrofanov, S.R.Yamaletdinov, V.G.Tishchenko, A.N.Tyukavkin, B.V.Florko, E.A.Kuznetsova, O.Yu.Gapienko. Neutron Channel of the FOBOS Spectrometer for the Study of Spontaneous Fission // Physics of Atomic Nuclei.- 2003.- v.66, N 9.- p.1655-1658.
3. D.V. Kamanin, Yu.V. Pyatkov, A.N. Tyukavkin, Yu.N. Kopatch. Experimental evidences of clustering in low excited heavy nuclear systems // Int. Journal of Modern Physics E.- 2008.- v.17.- No.10.- p.2226-2230.
4. Yu.V. Pyatkov, D.V. Kamanin, W.H. Trzaska, W.von Oertzen, S.R. Yamaletdinov, A.N. Tyukavkin, V.G. Tishchenko, V.G.Lyapin, Yu.E. Penionzhkevich, A.A. Alexandrov, S.V. Khlebnikov. Island of the high yields of $^{252}\text{Cf(sf)}$ collinear tripartition in the fragment mass space // Romanian Reports in Physics.- 2007.- v.59, N 2.- p.569-581

Препринты:

1. A.N.Tyukavkin, Yu.V.Pyatkov, D.V.Kamanin, Yu.N.Kopatch, A.A.Alexandrov, I.A.Alexandrova, S.B.Borzakov, Yu.N.Voronov, S.V.Denisov, G.L.Efimov, V.E.Zhuchko,

- N.A.Kondratyev, E.A.Kuznetsova, Yu.E.Lavrova, S.V.Mitrofanov, Ts.Pantelev, V.S.Salamatin, I.P.Tsurin. Measurement of nuclear charges of fission fragments using big ionization chamber in the frame of a double-armed time-of-flight spectrometer // препринт ОИЯИ Р15-2008-88.- Дубна, 2008.- 20 с.
2. Д.В. Каманин, Ю.Н. Копач, Ю.В. Пятков, А.А. Александров, И.А. Александрова, С.Б. Борзаков, Ю.Н. Воронов, С.В. Денисов, Г.Л. Ефимов, В.Е. Жучко, Е.А. Кузнецова, Ю.Е. Лаврова, С.В. Митрофанов, Ц. Пантелеев, В.С. Саламатин, А.Н. Тюкавкин, И.П. Цурин. Исследование реакции $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}},\text{f})$ с помощью спектрометра МиниФобос на реакторе ИБР-2 // препринт ОИЯИ Р15-2007-182, Дубна, 2007.- 17 с.
 3. Yu.V. Pyatkov, D.V. Kamanin, W. H. Trzaska, W. von Oertzen, S.R. Yamaletdinov, V.G. Tishchenko, A.N. Tyukavkin, V.G. Lyapin, Yu.E. Penionzhkevich, A.A. Alexandrov, S.V. Khlebnikov. Island of the high yields of $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ collinear tripartition in the fragments mass space // препринт ОИЯИ Е15-2005-99.- Дубна, 2005.- 12 с.
 4. Yu.V.Pyatkov, D.V.Kamanin, W.Trzaska, S.R.Yamaletdinov, E.A.Sokol, A.N.Tyukavkin, A.A.Alexandrov, I.A.Alexandrova, S.V.Denisov, V.P.Krajnov, S.V.Khlebnikov, T.E.Kuzmina, E.A.Kuznetsova, S.V.Mitrofanov, Yu.E.Penionzhkevich, Yu.V.Ryabov, V.G.Tishchenko, B.V.Florko. New results in studying of the collinear cluster tripartition of the ^{252}Cf nucleus // препринт ОИЯИ Е15-2004-65.- Дубна, 2004.- 17 с.

Отчёты лаборатории:

1. Yu.V. Pyatkov, D.V. Kamanin, W.H.Trzaska, S.R. Yamaletdinov, A.A. Alexandrov, I.A. Alexandrova, S.V. Khlebnikov, E.A. Kuznetsova, V.G. Lyapin, S.V. Mitrofanov, Yu.E. Penionzhkevich, Yu.V. Ryabov, E.A. Sokol, V.G. Tishchenko, A.N. Tyukavkin, B.V. Florko, V.E. Zhuchko. New experimental data on collinear cluster tripartition of the ^{252}Cf nucleus // Heavy Ion Physics, FLNR JINR Scientific Report 2003 – 2004.- Дубна, 2006.- с.94-95.
2. Yu.V.Pyatkov, A.N.Tyukavkin, D.V.Kamanin, E.A.Sokol, E.A.Kuznetsova, S.R.Yamaletdinov. Mathematical model of the neutron registration channel of the modified FOBOS spectrometer // Heavy Ion Physics, FLNR JINR Scientific Report 2001-2002.- Дубна, 2003.- с.229-230.

В сборниках трудов научных конференций:

1. Yu.V.Pyatkov, A.N.Tyukavkin, D.V.Kamanin, O.V.Falomkina, Yu.E.Lavrova, E.A.Sokol, E.A.Kuznetsova. Exotic high neutron multiplicity modes in $^{252}\text{Cf(sf)}$ // Proceedings of 16th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics". Dubna, June 11-14, 2008.-Дубна, 2009.- с.386-393.
2. A.N.Tyukavkin, Yu.V.Pyatkov, D.V.Kamanin, Yu.N.Kopatch, A.A.Alexandrov, I.A.Alexandrova, S.B.Borzakov, Yu.N.Voronov, S.V.Denisov, G.L.Efimov, V.E.Zhuchko, N.A.Kondratyev, E.A.Kuznetsova, Yu.E.Lavrova, S.V.Mitrofanov, Ts.Panteleev, V.S.Salamatin, I.P.Tsurin. Measuring of the fragments nuclear charges at the MINI-FOBOS spectrometer. // Proceedings of 16th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics". Dubna, June 11-14, 2008.-Дубна, 2009.- с.393-401.
3. D.V.Kamanin, Yu.N.Kopach, Yu.V.Pyatkov, A.A.Alexandrov, S.B.Borzakov, Yu.E.Lavrova, Ts.Panteleev, A.N.Tyukavkin. Study of the multy-cluster decays in the neutron induced fission of ^{235}U // Proceedings of 15th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics".- Дубна, 2008.- с.274 - 280.
4. A.A.Alexandrov, I.A.Alexandrova, S.B.Borzakov, Yu.N.Voronov, S.V.Denisov, G.L.Efimov, D.V.Kamanin, Yu.N.Kopatch, E.A.Kuznetsova, Yu.E.Lavrova, S.V.Mitrofanov, Ts.Panteleev, Yu.V.Pyatkov, V.S.Salamatin, I.P.Tsurin, A.N.Tyukavkin, V.E.Zhuchko. Experimental setup and data processing in studying of the reaction $^{235}\text{U(nth, f)}$ at the IBR-2 beam// Proceedings of 15th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics".- Дубна, 2008.- с.248-255.
5. Ю.В. Пятков, Д.В. Каманин, А.Н. Тюкавкин. Мода коллинеарного мультикластерного распада в реакции $^{238}\text{U}+^4\text{He}(40\text{ мэВ})$ // Труды научной сессии МИФИ-2008,- Москва, 2008.- с.66-68.
6. Yu.Pyatkov, W.Trzaska, M.Mutterer, S.Yamaletdinov, A.Tjukavkin, D.Bolgov, D.Kamanin, S.Khlebnikov, Yu.Kopach, E.Kuznetsova, Yu.Lavrova, V.Lyapin, M.Sillanpää, V.Tishchenko, G.Tyurin. Peculiarities of data processing in experiment aimed at searching for rare decays of Pu^* isotopes // Proceedings of 14th International Seminar on Interaction of

Neutrons with Nuclei: "Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics".- Дубна, 2007.- с.134-143.

7. Yu.Pyatkov, W.Trzaska, M.Mutterer, S.Yamaletdinov, A.Tjukavkin, D.Bolgov, D.Kamanin, S.Khlebnikov, Yu.Kopach, E.Kuznetsova, J.Lavrova, V.Lyapin, M.Sillanpaa, V.Tishchenko, G.Tyurin. Searching for Rare Decay Modes in the Reaction $^{238}\text{U}+^4\text{He}$ (40 MeV) // Proc. International Symposium on Exotic Nuclei, Khanty-Mansiysk, Russia, 17-22 July 2006. AIP, Melville, New-York, 2007,- p.144-152
8. Ю.В. Пятков, А.Н. Тюкавкин, С.Р. Ямалетдинов, В. Трзаска, Д.В. Каманин, Д.В. Болгов, Е.А. Кузнецова, Ю.Е. Лаврова. Эксперимент по поиску редких мод распада в реакции $^{238}\text{U}+^4\text{He}$ (40 mev) // Труды научной сессии МИФИ-2007.- Москва, 2007.- с.15-18.
9. Д.В. Каманин, В. Трзаска, С.Р. Ямалетдинов, А.Н. Тюкавкин, Ю.В. Пятков. Область повышенных выходов продуктов тройного коллинеарного распада в $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ // Труды научной сессии МИФИ-2006.- Москва, 2006.- с.21-22.
10. Ю.В. Пятков, Д.В. Каманин, А.А. Александров, Д.В. Болгов, В.Е. Жучко, Е.А. Кузнецова, А.Н. Тюкавкин. Предварительные результаты первого эксперимента на установке MiniFOBOS». Труды научной сессии МИФИ-2006.- Москва, 2006, с.23
11. Yu.V. Pyatkov, D.V. Kamanin, A.A. Alexandrov, I.A. Alexandrova, S.V. Khlebnikov, E.A. Kuznetsova, V.G. Lyapin, S.V. Mitrofanov, Yu.E. Penionzhkevich, Yu.V. Ryabov, E.A. Sokol, V.G. Tishchenko, W.Trzaska, A.N. Tyukavkin, S.R. Yamaletdinov, B.V. Florko. Experimental confirmation of the collinear cluster tripartition of the ^{252}Cf nucleus // International Symposium on Exotic Nuclei, Peterhof, Russia, 5-12 July 2004: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005.- p.351-356
12. D.V.Kamanin, Yu.V.Pyatkov, A.A.Alexandrov, I.A.Alexandrova, S.V.Denisov, S.V.Khlebnikov, T.E.Kuzmina, E.A.Kuznetsova, S.V.Mitrofanov, V.G.Tishchenko, A.N.Tyukavkin, I.P.Tsurin, Yu.E.Penionzhkevich, E.A.Sokol, Yu.V.Ryabov, S.R.Yamaletdinov. The modified mini-FOBOS setup // International Symposium on Exotic Nuclei, Peterhof, Russia, 5-12 July 2004: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005.- p.588-591.

13. Д.В. Каманин, В. Трзаска, С.Р. Ямалетдинов, А.Н. Тюкавкин, Ю.В. Пятков. Новые экспериментальные подтверждения тройного коллинеарного кластерного распада ядра ^{252}Cf // Труды научной сессии МИФИ-2005.- Москва, 2005, с.26-28.
14. А.Н. Тюкавкин, С.Р. Ямалетдинов, В. Трзаска, Д.В. Каманин, Ю.В. Пятков. Об одной процедуре обработки данных для выявления канала тройного кластерного распада // Труды научной сессии МИФИ-2005.- Москва, 2005.- с.29-30.
15. С.Р. Ямалетдинов, А.Н. Тюкавкин, Ю.В. Пятков, В. Трзаска. Процедура энергетической калибровки при больших потерях во входном окне // Труды научной сессии МИФИ-2004.- Москва, 2004.- с.49-50.
16. Ю.В. Пятков, Д.В. Каманин, В. Трзаска, С.Р. Ямалетдинов, Е.А. Сокол, А.А. Александров, И.А. Александрова, С.В. Хлебников, Е.А. Кузнецова, С.В. Митрофанов, Ю.Э. Пенионжкевич, Ю.В. Рябов, В.Г. Тищенко, А.Н. Тюкавкин, Б.В. Флорко. Новые результаты по поиску спонтанного мультикластерного распада // Труды научной сессии МИФИ-2004.- Москва, 2004, с.51-52.
17. D.V.Kamanin, Yu.V.Pyatkov, E.A.Sokol, A.A.Alexandrov, I.A.Alexandrova, S.V.Khlebnikov, S.V.Mitrofanov, Yu.E.Penionzhkevich, Yu.V.Ryabov, V.G.Tishchenko, A.N.Tjukavkin, S.R.Yamaletdinov. New step in searching for collinear tripartition in $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ at the FOBOS setup //Proceedings of 10th Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics".- Дубна, 2003.- с.447-454.
18. А.Н. Тюкавкин, Д.В. Каманин, Ю.В. Пятков, Е.А. Сокол. Модель нейтронного канала спектрометра FOBOS // Труды научной сессии МИФИ-2003.- Москва, 2003.- с.57.

Список литературы

1. Rosen Louis and Hudson Alvin M. Symmetrical tripartition of ^{235}U by thermal neutrons // Phys. Rev.-1950.- v.78.N 5.-, p.533-538.
2. Muga M. L. Ternary fission of ^{235}U induced by thermal neutrons // Phys. Rev. Lett.- 1963.- v.11.- p.129-131.
3. Muga M. L., Rice C. R., Sedlacek W. A. Ternary fission of heavy nuclei // Phys. Rev. Lett.- 1967.- v.18.- p.404-508.

4. Muga M. L., Rice C. R., Sedlacek W. A. Ternary fission of Uranium-236* and -234 // Phys. Rev. Lett.- 1967.- v.161.- p.1266-1283.
5. Muga M. L., Rice C. R. Ternary fission of 240Pu and 242Pu // Proc. of 2nd IAEA Symp. on. Physics and Chemistry of Fission. Vienna, 28 July 1 August 1969: IAEA-SM-211/99.- 1969.- p.107.
6. Steinberg E. P., Wilkins B. D., Kaufman S. B., Fluss M. J. Alternative evaluation of ternary-fission data // Phys. Rev. C.- 1970.- v.1.- p.2046 - 2050.
7. Roy J. C. On the production of 7Be, 28Mg, and 66Ni in the slow neutron fission of 235U// Can. J. Phys.- 1961.- v.39, N 2.- p.315-325.
8. Stoenner R. W., Hillman M. Search for radiochemical evidence for ternary fission of 235U by thermal neutrons // Phys. Rev.- 1966.- v.142, N3.- p.716 - 719.
9. Kugler G., Clarke W. B. Mass-spectrometric search for neon and argon isotopes in ternary fission of 235U // Phys. Rev. C.- 1971.- v.3, N2.- p.849 - 853.
10. Shall P., Heeg P., Mutterer M., Theobald J. P. On symmetric tripartition in the spontaneous fission of 252Cf // Phys. Lett. B.- 1987.- v.191, N4.- p.339 - 342.
11. Strutinsky V. M., Lyashchenko N. Ya., Popov N. A. Symmetrical shapes of equilibrium for a liquid drop model // Nucl. Phys.-1963.- v.46.- p.639.
12. Diehl H., Greiner W. Ternary fission in the liquid drop model // Phys. Lett. B.- 1973.-v.45.- p.35.
13. Diehl H., Greiner W. Theory of ternary fission in the liquid drop model // Nucl. Phys. A.-1974.- v.229.- p.29
14. Poenaru D.N. et al. Multicluster accompanied fission // Phys. Rev. C.- 1999.- v.59.- p.3457.
15. Piasecki E., Dakowski M., Krogulski T., Tys J. and Chwaszczewska J. Evidence of the polar emission of alpha-particles in the thermal neutron fission of 235U // Physics Letters B.- 1970.- v.33.- p.568.
16. Vannucci L. Boccaccio P, Bologna A, et al. Prompt ternary break-up in S-32+Co-59 and S-32+Cu-63 reactions at 5.6 AMeV // Eur. Phys. J. A.- 2000.- v.7, N 1.- p.65-67.
17. Solyakin G. E. and Kravtsov A.V. Nuclear fission beyond two-body kinematics // Phys. Rev. C.- 1996.- v.54.- p.1798 - 1804.
18. Kravtsov A. V. and Solyakin G. E. Search for spontaneous collinear tripartition of 252Cf nuclei // Phys. Rev. C.- 1999.- v.60.- 017601.
19. Herbach C.-M., Hilscher D., Tishchenko V.G., Gippner P., Kamanin D.V., von Oertzen W., Ortlepp H.-G., Penionzhkevich Yu.E., Pyatkov Yu.V., Renz G., Schilling K.D., Strekalovsky O.V., Wagner W., Zhuchko V.E. Search for mass-symmetric ternary fission in the reactions 14N(53AMeV)+197Au and 232Th // Nuclear Physics A.- 2002.- v.712.- p.207-246.

20. Price P. B. Heavy-particle radioactivity ($A > 4$) // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*- 1989.- v.39.- p.19.
21. Gönnerwein F., Börsig B., Nast-Linke U., Mutterer M., Theobald J.P., Faust und H., Geltenbort P. Emission of Clusters in Nuclear Fission // *Proc. 6th International Conference on Nuclei far from Stability and 9th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants*, Bernkastel-Kues, 19.-24. July 1992; IOP Publ. Ltd.- London.- 1993.- p. 453.
22. Ogloblin A. A., Pik-Pichak G. A. and Tretyakova S. P. Cluster radioactivity // *Proceedings of the International Workshop "Fission Dynamics of Atomic Clusters and Nuclei"*, Luso, Portugal 15 - 19 May 2000.- Published in World Scientific.- 2001.- p.143.
23. Ortlepp H.-G. et al. The 4π -fragment-spectrometer FOBOS // *Nucl. Instr. and Meth. A* -1998.- v.403.- p.65-97.
24. Yu.V.Pyatkov, V.V.Pashkevich, Yu.E.Penionzhkevich, V.G.Tishchenko, C.-M.Herbach. Collinear tripartition of ^{248}Cm and ^{252}Cf nuclei as a probe of clustering // *International Conference on Nuclear Physics "NUCLEAR SHELLS - 50 YEARS"*, 49th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure, Dubna, Russia, 21-24 April 1999. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. p.144-150.
25. Yu.V.Pyatkov et al. Search for collinear tripartition of the ^{252}Cf nucleus // *Heavy Ion Physics*, FLNR JINR Scientific Report 1999 - 2000, Dubna, Russia, 2001, p. 77-78.
26. Yu.V.Pyatkov, D.V.Kamanin, W.Trzaska, S.R.Yamaletdinov, E.A.Sokol, A.N.Tyukavkin, A.A.Alexandrov, I.A.Alexandrova, S.V.Denisov, V.P.Krajnov, S.V.Khlebnikov, T.E.Kuzmina, E.A.Kuznetsova, S.V.Mitrofanov, Yu.E.Penionzhkevich, Yu.V.Ryabov, V.G.Tishchenko, B.V.Florko. New results in studying of the collinear cluster tripartition of the ^{252}Cf nucleus // *Preprint JINR E15-2004-65*, Dubna, Russia, 2004, 17 c.
27. Yu.Pyatkov, W.Trzaska, M.Mutterer, S.Yamaletdinov, A.Tjukavkin, D.Bolgov, D.Kamanin, S.Khlebnikov, Yu.Kopach, E.Kuznetsova, J.Lavrova, V.Lyapin, M.Sillanpaa, V.Tishchenko, G.Tyurin Searching for Rare Decay Modes in the Reaction $^{238}\text{U}+4\text{He}$ (40 MeV) // *International Symposium on Exotic Nuclei*, Khanty-Mansiysk, Russia, 17-22 July 2006. Conference proceedings. AIP Conference Proceedings, 2007, p. 144-152.
28. S. Mulgin, V. N. Okolovich, S. V. Zhdanov. Two-parametric method for silicon detector calibration in heavy ion and fission fragment spectrometry // *NIM A.*- 1997.- v.388.- p.254 - 259.
29. D.V.Kamanin, Yu.V.Pyatkov, E.A.Sokol, S.V.Mitrofanov, S.R.Yamaletdinov, V.G.Tishchenko, A.N.Tyukavkin, B.V.Florko, E.A.Kuznetsova, O.Yu.Gapienko. Neutron Channel of the FOBOS Spectrometer for the Study of Spontaneous Fission // *Physics of Atomic Nuclei.*- 2003.- v.66, N 9.- p.1655-1658.

30. Подшибякин С.Л., Пятков Ю.В. и др. Измерение электрических зарядов продуктов деления ^{235}U ионизационной камерой в составе времяпролётного спектрометра. // Приборы и техника эксперимента.- 1992.- с.66-68.
31. A.N.Tyakavkin, Yu.V.Pyatkov, D.V.Kamanin, Yu.N.Kopatch, A.A.Alexandrov, I.A.Alexandrova, S.B.Borzakov, Yu.N.Voronov, S.V.Denisov, G.L.Efimov, V.E.Zhuchko, N.A.Kondratyev, E.A.Kuznetsova, Yu.E.Lavrova, S.V.Mitrofanov, Ts.Panteleev, V.S.Salamatin, I.P.Tsurin. Measurement of nuclear charges of fission fragments using big ionization chamber in the frame of a double-armed time-of-flight spectrometer // препринт ОИЯИ Р15-2008-88.- Дубна, 2008.- 20 с.
32. Lang.W, H. -G. Clerc, H. Wohlfarth, H. Schrader, K. -H. Schmidt. Nuclear charge and mass yields for ^{235}U (nth, f) as a function of the kinetic energy of the fission products // Nucl. Phys. A.- 1980.- v.345.- p.34 - 71.
33. Yu. V. Pyatkov et. al. Island of the high yields of $^{252}\text{Cf(sf)}$ collinear tripartition in the fragments mass space // Preprint JINR E15-2005-99, Dubna, 2005.- 12 p.
34. Yu.V. Pyatkov, D.V. Kamanin, W.H. Trzaska, W.von Oertzen, S.R. Yamaletdinov, A.N. Tjukavkin, V.G. Tishchenko, V.G.Lyapin, Yu.E. Peinionzhkevich, A.A. Alexandrov, S.V. Khlebnikov. Island of the high yields of $^{252}\text{Cf(sf)}$ collinear tripartition in the fragment mass space // Romanian Reports in Physics.- 2007.- v.59, N 2.- p.569-581.
35. D.V.Kamanin. Experimental evidences of clustering in low excited heavy nuclear systems // Proceedings of the First Workshop on State of the Art in Nuclear Cluster Physics "SOTANCP2008", France, Strasbourg, 13-16 May, 2008. Int. Journal of Modern Physics E. 2008. V. 17, No. 10. p. 2250-2254.
36. Yu.Pyatkov. Observation of the collinear multi-body decays in the reaction $^{238}\text{U} + 4\text{He}(40 \text{ MeV})$ // Proceedings of the First Workshop on State of the Art in Nuclear Cluster Physics "SOTANCP2008", France, Strasbourg, 13-16 May, 2008. Int. Journal of Modern Physics E. 2008. V. 17, No. 10. p. 2226-2230.
37. Yu.V.Pyatkov, A.N.Tyukavkin, D.V.Kamanin, O.V.Falomkina, Yu.E.Lavrova, E.A.Sokol, E.A.Kuznetsova. Exotic high neutron multiplicity modes in $^{252}\text{Cf(sf)}$ // Proceedings of 16th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics". Dubna, June 11-14, 2008.- Dubna.- 2009.- p.386-392.