

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-2013-16

На правах рукописи

СВИРИХИН
Александр Игоревич

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ
МНОЖЕСТВЕННОСТИ НЕЙТРОНОВ
СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ КОРОТКОЖИВУЩИХ ЯДЕР,
СИНТЕЗИРУЕМЫХ В РЕАКЦИЯХ ПОЛНОГО СЛИЯНИЯ
С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2013

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

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Александр Владимирович Еремин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ЗАО НПЦ АСПЕКТ

Владислав Иванович
Лушиков

кандидат физико-математических наук,
начальник сектора ЛНФ ОИЯИ

Юрий Николаевич
Копач

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится «__» _____ 2013г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д.720.001.06 на базе Объединенного института
ядерных исследований по адресу: 141980, Московская обл., г.Дубна, ул.
Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

Андрей Георгиевич
Попеко



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Настоящая работа посвящена изучению характеристик спонтанного деления ядер, лежащих в экзотической области короткоживущих нейтроно-дефицитных изотопов с $Z \geq 100$. Согласно современным представлениям, именно спонтанное деление определяет границы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева для тяжелых ядер. До настоящего времени для большей части известных спонтанно-делящихся ядер из области изотопов с $Z \geq 100$ были экспериментально измерены парциальные периоды полураспада, достаточно точно измерены полные кинетические энергии осколков и, для нескольких изотопов, построены массовые и энергетические распределения осколков [1]. Однако измерения такой важной характеристики как среднее число мгновенных нейтронов спонтанного деления, были проведены только для долгоживущих изотопов из области кюрия и калифорния, для изотопа ^{252}No и для нескольких долгоживущих нейтроно-избыточных изотопов фермия и менделеевия. Все эти изотопы имеют периоды полураспада, позволяющие изучать их характеристики в «офлайн»-экспериментах или с использованием механических систем транспорта ядер отдачи (ЯО).

Следует отметить, что изучение множественности мгновенных нейтронов спонтанного деления имеет большое значение как с теоретической, так и с методической точек зрения. Для теории деления ядер важно, что испускаемое в процессе деления количество нейтронов непосредственно зависит от степени возбуждения осколков деления и, таким образом, играет важную роль в восстановлении энергетического баланса реакции. С другой стороны, среднее число нейтронов на один акт спонтанного деления является уникальной характеристикой ядра.

Изучение зависимости этого числа от атомного номера ядра может в значительной степени облегчить идентификацию сверхтяжелых ядер, получаемых как в «оффлайн»-экспериментах, где образцы, содержащие искомые ядра, помещаются внутрь нейтронного детектора, так и в «онлайн»-экспериментах на пучках тяжелых ионов.

Целью работы являлось проведение экспериментов по синтезу короткоживущих нейтроно-дефицитных изотопов фермия и нобелия, а так же изучение свойств их радиоактивного распада с использованием новой комбинированной детектирующей системы.

В реакциях с тяжелыми ионами (^{48}Ca , ^{40}Ar) были синтезированы короткоживущие нейтроно-дефицитные изотопы ^{252}No ($T_{1/2} = 2.3$ с), ^{244}Fm ($T_{1/2} = 3$ мс) и ^{246}Fm ($T_{1/2} = 1.1$ с), определены периоды их полураспада, полные кинетические энергии (ТКЕ, total kinetic energy) осколков спонтанного деления и вероятности распада через спонтанное деление (b_{SF} , branching ratio). Полученные результаты сравнивались с ранее опубликованными.

На основе данных, полученных с использованием новой, детектирующей системы, состоящей из многострипового полупроводникового детектора и нейтронного детектора, восстанавливались распределения по множественностям нейтронов спонтанного деления перечисленных изотопов. Вычислялись средние числа нейтронов на одно спонтанное деление ^{252}No , ^{244}Fm и ^{246}Fm .

На защиту выносятся следующие результаты:

- Разработана и подготовлена к «онлайн»-экспериментам на пучках тяжелых ионов детектирующая система, расположенная в фокальной плоскости сепаратора ВАСИЛИСА. Система включает в себя кремниевый

многостриповый детектор ядер отдачи (ЯО) и нейтронный детектор на базе 54-х счетчиков с ^3He . Методика, реализуемая при помощи данной детектирующей системы, заключается в следующем: ядра отдачи, синтезируемые на пучках тяжелых ионов в реакциях полного слияния, при помощи сепаратора отделяются от ионов первичного пучка и продуктов побочных ядерных реакций, а затем имплантируются в фокальный полупроводниковый детектор, где и происходит спонтанное деление. В ходе эксперимента измеряется полная кинетическая энергия осколков, период полураспада, кроме того, сигналы осколков деления запускают схему опроса нейтронных счетчиков, расположенных вокруг вакуумной камеры фокального детектора, что позволяет достоверно измерять количество нейтронов, сопровождающих каждый акт деления.

- На сепараторе ВАСИЛИСА проведена серия экспериментов на пучках тяжелых ионов (^{48}Ca , ^{40}Ar), в которых синтезированы нейтронодефицитные изотопы ^{252}No , ^{244}Fm и ^{246}Fm . Измерялись и сравнивались с существующими литературными данными такие характеристики спонтанного деления как периоды полураспада, ТКЕ осколков деления и b_{SF} .

- в ходе обработки результатов экспериментов, восстанавливались распределения мгновенных нейтронов спонтанного деления по множественностям. Для изотопов $^{244,246}\text{Fm}$ впервые были получены значения среднего числа нейтронов на один акт спонтанного деления – $\bar{\nu}$. Для ^{252}No распределение нейтронов по множественностям сравнивались с ранее полученными результатами [2,3]

- представлен анализ данных в рамках существующих систематик и теоретических описаний процесса спонтанного деления.

Основные результаты и научная новизна

1. В фокальной плоскости сепаратора ВАСИЛИСА создана комбинированная детектирующая система, включающая в себя многостриповый детектор ядер отдачи (ЯО) и нейтронный детектор на базе 54-х счетчиков с ^3He . Подобная схема для измерения множественности нейтронов спонтанного деления тяжелых ядер применена впервые. Уникальность системы заключается в возможности измерений нейтронных характеристик деления короткоживущих ($T_{1/2} < 1\text{с}$) ядер, получаемых непосредственно в «онлайн»-экспериментах на пучках тяжелых ионов.
2. Впервые получены значения среднего числа нейтронов спонтанного деления для изотопов ^{244}Fm ($\bar{\nu} = 3.3 \text{ н/СФ}$), ^{246}Fm ($\bar{\nu} = 3.6 \text{ н/СФ}$).
3. Уточнены данные по нейтронной множественности изотопа ^{252}No ($\bar{\nu} = 4.06 \text{ н/СФ}$), в ходе эксперимента было зарегистрировано около 2000 событий спонтанного деления этого изотопа, что более чем в 10 раз превышает результаты прошлых экспериментов.

Практическая значимость работы

Важность изучения процесса спонтанного деления выражается в том, что именно оно определяет границы тяжелой области Периодической системы элементов.

Дальнейшее развитие методики позволит достичь приемлемого уровня идентификации спонтанно делящихся сверхтяжелых ядер по среднему числу нейтронов $\bar{\nu}$.

Кроме того, физика деления составляет научную основу ядерной энергетики, поэтому исследования в этой области в аспектах, связанных с

характеристиками нейтронного излучения, представляют непосредственный интерес с практической точки зрения.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на следующих научных мероприятиях:

Конференции и семинары (устные доклады):

1. The Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM'08) (Ryn, Poland, September 7 - 13, 2008)
2. 4th International Workshop on Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy (Cadarache, France, May 13- 16, 2009)
3. Nordic Conference on Nuclear Physics 2011 (Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, June 13-17, 2011)
4. 8-я Международная конференция ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА (Алматы, Республика Казахстан, 20-23 сентября, 2011)
5. 61-я международная конференции по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2011» (ВНИИЭФ, г.Саров, Россия, 10 - 14 октября, 2011)
6. BLTP/JINR - KLFTP/CAS Joint Workshop on nuclear physics (Dubna, Russia, August 2-6, 2012)
7. SAIP2012 Annual Conference (Pretoria, South Africa, 9 – 13 July, 2012)
8. The International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2012) (Владивосток, Россия, 1 – 6 октября, 2012)

Конференции и семинары (стендовые доклады):

1. The International Symposium on Exotic Nuclei (EXON2006) (Ханты-Мансийск, Россия, 17-22 июля, 2006)

2. The Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM'08) (Ryn, Poland, September 7 - 13, 2008)
3. The International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2009) (Сочи, Россия, 28 сентября – 2 октября, 2009)
4. 4th International Workshop on Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy (Cadarache, France, May 13- 16, 2009)
5. Symposium on Nuclear Physics (Birla Institute of Technology & Science, Pilani, India, December 20-24, 2010)
6. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND-2010) (Jeju Island, Korea April 26-30, 2010)
7. International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (TAN-2011) (Сочи, Россия, 5 – 11 сентября, 2011)

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка литературы и приложения.

Во введении рассматривается научная проблема, дается обоснование актуальности и задач исследования. Сформулирована цель работы и кратко изложен материал диссертации.

В первой главе кратко описано современное представление о роли спонтанного деления в проблеме стабильности тяжелых ядер, приводятся систематики экспериментально измеренных и расчетных характеристик спонтанного деления.

В капельной модели конкуренция сил поверхностного натяжения, удерживающих ядро от распада, и кулоновских сил отталкивания определяется параметром делимости, который пропорционален Z^2/A . С

увеличением параметра делимости стабильность атомного ядра относительно деления быстро падает. Стабилизирующее действие оболочечных эффектов, проявляющееся в увеличении времен жизни ядер по отношению к спонтанному делению с приближением к «магическим числам» нуклонов, подтверждается экспериментальной систематикой периодов полураспада спонтанно делящихся изотопов (рис. 1), а также экспериментальными данными по синтезу ядер с $Z > 107$. Выделение энергии на 1 акт деления тяжелого ядра составляет примерно 200 МэВ. Наибольшая часть энергии деления (до 90%) уносится в виде кинетической энергии осколков.

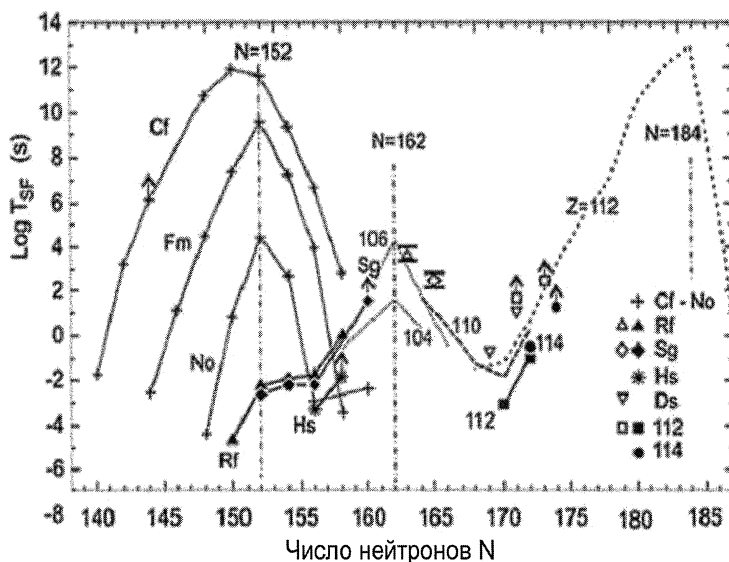


Рисунок 1 – систематика периодов полураспадов спонтанно делящихся четно-четных трансурановых ядер дополненная экспериментальными данными, полученными в экспериментах по синтезу СТЭ.

Полная кинетическая энергия осколков (ТКЕ) определяется их кулоновским ускорением и, следовательно, эта часть пропорциональна величине $Z^2/A^{1/3}$ делящегося ядра. Обращают на себя внимание

нейтроно-избыточные ядра из области фермия-дубния. Величины средних ТКЕ для этих ядер значительно превышают величины ТКЕ соседних ядер. Такое отклонение от плавной зависимости объясняется проявлением оболочечных эффектов: ядрам с зарядами $Z \approx 100$ и массами $A \approx 260$ энергетически выгодно разделиться на два «оловообразных» осколка с $Z \approx 50$ и $N \approx 82$. В этом случае реализуется максимальная величина ТКЕ при минимальной энергии возбуждения осколков. Основным типом деления является деление на 2 осколка, при этом наиболее характерной особенностью спонтанного деления и деления слабо возбужденных «дофермиевых» ядер является асимметрия распределения осколков по массе. Структура массового распределения осколков спонтанного деления и деления слабо возбужденных ядер также определяется оболочечными эффектами в формирующихся осколках. Наиболее сильным оказывается влияние замкнутых протонной $Z = 50$ и нейтронной $N = 82$ оболочек. При этом один осколок – тяжелый – формируется всегда в области «олова», а второй – легкий – является дополняющим к нему. При увеличении заряда делящегося ядра до $Z \approx 100$, а массы до $A \approx 260$ массы тяжелого A_H и легкого A_L осколков сближаются (становятся равными). Это приводит к изменениям структуры массового распределения осколков: в распределениях по массам могут проявляться две моды деления, либо распределение может стать «чисто» симметричным. При дальнейшем увеличении массы делящегося ядра массовое распределение осколков деления опять становится асимметричным.

Одним из важнейших, особенно с практической точки зрения, является процесс испускания нейтронов при делении ядер. Именно этот процесс позволяет реализовать при определенных условиях цепную ядерную реакцию. Более 99% (а, возможно, и 100%) нейтронов испускаются ускорившимися осколками деления. В момент образования

осколки, как правило, сильно деформированы, и избыток потенциальной энергии деформации переходит в энергию возбуждения осколков. Это возбуждение снимается "испарением" нейтронов и излучением γ -квантов.

Количество нейтронов, испускаемых в одном акте деления ($\bar{\nu}$) – величина, распределенная около среднего значения $2 \div 4$ нейтрона на одно делящееся ядро. Для всех ядер с Z в области Th \div Cf среднее число нейтронов, испускаемых каждым осколком растёт с массой, как для легкого, так и для тяжелого осколка. Наименьшее число нейтронов испускается тяжелыми осколками с массами, близкими к массе дважды магического ядра ($Z=50, A=132$). Для известных делящихся ядер от U до Md наблюдается сильная корреляция между средним числом нейтронов на акт деления $\bar{\nu}$ и суммарной кинетической энергией осколков. Величина $\bar{\nu}$ увеличивается с ростом Z делящегося ядра и меняется примерно от 2 для U до 4 в случае Fm.

Существуют несколько моделей описывающих закономерности испускания нейтронов деления трансактинидных ядер при низких энергиях возбуждения. Например, в усовершенствованной модели точки разрыва [4], выход нейтронов определяется путем вычисления энергии возбуждения осколков из энергетического баланса деления в точке разрыва.

Во второй главе кратко описывается кинематический сепаратор ВАСИЛИСА [5] и детектирующая система, использованные в данной работе.

Сепаратор ВАСИЛИСА, расположенный на 3-м отводе циклотрона У-400 (ЛЯР), более 20 лет использовался для изучения нейтронно-дефицитных нуклидов, образующихся в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами на актинидных и трансактинидных мишенях.

Установка состоит из системы диагностики пучка, мишенного узла с вращающейся мишенью, системы сепарации ядер отдачи (ЯО) и детектирующей системы, расположенной в фокальной плоскости сепаратора. Система сепарации, отделяющая искомые продукты реакций полного слияния от ионов пучка и фоновых продуктов, состоит из двух триплетов квадрупольных магнитных линз и трех высоковольтных (до 20кВ/см) дефлекторов. Первый триплет квадрупольных линз формирует квазипараллельный пучок ЯО на входе в первый высоковольтный дефлектор. Дефлекторы производят разделение траекторий ЯО от ионов пучка и продуктов побочных реакций по электрической жесткости (E/q). Второй триплет квадрупольных линз фокусирует искомые продукты ядерных реакций для их доставки в фокальную плоскость сепаратора, отделенную от зала ускорителя бетонной стеной (толщина 2 м), что значительно снижает фоновую нагрузку на детектирующую систему.

Детектирующая система, расположенная в фокальной плоскости сепаратора ВАСИЛИСА, состоит из двух (старт-стоп) время-пролетных детекторов и сборки многостриповых позиционно-чувствительных кремниевых полупроводниковых детекторов. Детектор нейтронов, смонтированный вокруг вакуумной камеры ППД-сборки, описывается в третьей главе.

Третья глава посвящена описанию методик исследования эмиссии нейтронов деления, приводятся сравнения различных типов нейтронных детекторов, даны характеристики созданных ранее и существующих детектирующих систем, а также подробно описан процесс создания и подготовки к работе в «он-лайн» экспериментах нейтронного детектора на базе ^3He счетчиков в фокальной плоскости сепаратора ВАСИЛИСА.

Ввиду того, что нейтрон является нейтральной частицей, он не может быть непосредственно зарегистрирован обычными детекторами, в которых используется явление ионизации, поэтому детектирование нейтронов производится не непосредственно, а при помощи ядерных реакций, в результате которых появляются вторичные заряженные частицы. Наиболее широко для регистрации нейтронов спонтанного деления применяются сцинтилляционные или газонаполненные детекторы. Сцинтилляционные детекторы представлены системами на базе жидких сцинтилляторов (с добавлением $^{155,157}\text{Gd}$), кристаллов стиблена, органических сцинтилляторов (Saint Gobain BC-501A, BC-509, BC-523), литиевых или борных стекол, люминофоров ($\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{Li}$). Для изготовления газонаполненных счетчиков, как правило, применяют смеси газов с ${}^3\text{He}$ или соединениями ${}^{10}\text{B}$ (${}^{10}\text{BF}_3$ -счетчики, пропорциональные счетчики со стенками покрытыми ${}^{10}\text{B}$).

Нейтронный детектор, описываемый в диссертации, состоит из счетчиков на базе ${}^3\text{He}$. Регистрация нейтронов в таких счетчиках осуществляется по продуктам реакции ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p + 780 \text{ кэВ}$ ($\sigma_{\text{th}} = 5320 \text{ барн}$). Каждый счетчик помещен в замедлитель из капролона или оргстекла, из-за чего энергетический порог реакции практически отсутствует. Каждый нейтрон регистрируется только один раз, что исключает эффект “cross talk”. Так же, для счетчиков на базе ${}^3\text{He}$ характерна малая чувствительность к γ -квантам, сопровождающим процесс спонтанного деления.

При помощи программы MCNP было рассчитано несколько конфигураций будущего детектора. Из соображений оптимизации стоимости детектора было решено использовать счетчики с давлением ${}^3\text{He}$ 4 атмосферы, в отличие от предыдущих детекторов, которые наполнялись ${}^3\text{He}$ под давлением свыше 7 атмосфер. Расчет показал, что

общая эффективность регистрации единичных нейтронов снизится всего на 5-6%, при снижении стоимости почти в два раза. Каждый счетчик, помещенный в шестигранный модуль из замедлителя, представляет собой трубку из нержавеющей стали диаметром 30мм и длиной 500мм, с преусилителем на конце. Модули со счетчиками в три коаксиальных слоя окружают вакуумную камеру фокального ППД. Для увеличения эффективности регистрации нейтронов вокруг сборки из счетчиков с замедлителем размещены плиты из оргстекла толщиной 5 см, которые служат для отражения вылетевших из сборки нейтронов. С целью защиты от фоновых нейтронов вся детектирующая система дополнительно окружена плитами из борированного полиэтилена толщиной 5 см. Такие же плиты установлены и со стороны зала У-400 для дополнительной защиты. Счет фоновых нейтронов при работе циклотрона (интенсивность пучка ^{48}Ca на мишени $\sim 0.5 \text{ pA}$) составляет величину ~ 100 нейтронов/сек. Конфигурация фокального полупроводникового детектора оптимизирована для размещения в вакуумной камере малого диаметра (120 см). Это позволяет разместить нейтронные счетчики максимально близко к ППД что бы захватывать максимальное количество нейтронов, испускаемых осколками деления имплантированных в ППД ядер. Схематическое изображение ППД внутри сборки нейтронного детектора представлено на рис. 2. Признаком происшедшего деления считалось появление импульса от фокального детектора, соответствовавшего энерговыделению $> 40 \text{ МэВ}$. Сигналы с быстрых выходов спектрометрических усилителей фокального ППД запускают схему опроса нейтронных счетчиков («окно» на 128 мкс), расположенных вокруг вакуумной камеры сборки полупроводниковых детекторов, что позволяет достоверно измерять количество нейтронов сопровождающих каждый акт деления. Разрешение временного счетчика для опроса

детекторов нейтронов составляет 1 мксек. Все события от нейтронных счетчиков после оцифровки записываются в файл на жестком диске ПК.

Для проверки совместной работы полупроводниковых детекторов и нейтронной сборки, а также для измерения эффективности регистрации нейтронов в условиях, максимально приближенных к эксперименту на пучке тяжелых ионов, на минимальном расстоянии от чувствительной области фокального полупроводникового детектора помещалась рамка с алюминиевой фольгой, на которую было нанесено небольшое количество спонтанно-делящегося изотопа ^{248}Cm . Интенсивность этого источника составляла 2-3 акта спонтанного деления в секунду. Среднее число нейтронов на акт деления ^{248}Cm принималось равным $\bar{\nu} = 3.14$ [6]. Эффективность регистрации единичных нейтронов, измеренная при помощи источника ^{248}Cm , составляла от 36% до 40%.

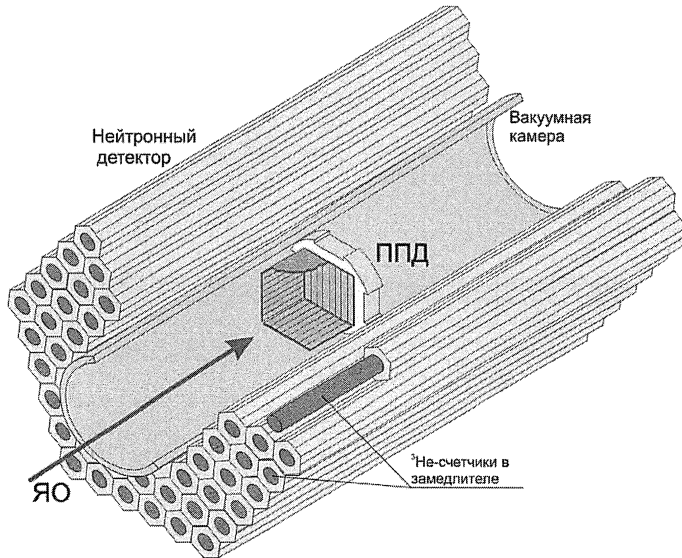


Рисунок 2 – комбинированная детектирующая система в фокальной плоскости сепаратора ВАСИЛИСА.

Измеренное среднее время жизни нейтронов в объеме детектора составляло $22,9 \pm 0,3$ мкс, наиболее вероятное время захвата нейтрона ≈ 5 мкс. Измеренное и восстановленное распределения по множественностям нейтронов спонтанного деления ^{248}Cm представлены на рис. 3. Распределение, восстановленное с применением метода статистической регуляризации (СТРЕГ) [7], хорошо согласуется с ранее опубликованными расчетами множественности нейтронов спонтанного деления изотопа ^{248}Cm [8].

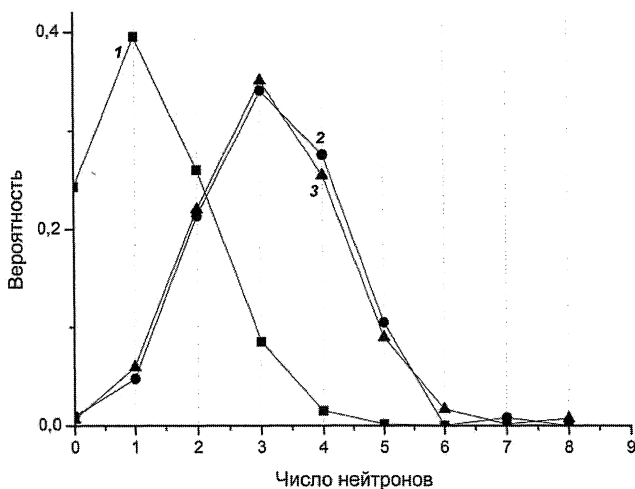


Рисунок 3 – распределение по множественностям нейтронов спонтанного деления ^{248}Cm : 1 – измеренное, 2 – восстановленное при помощи метода СТРЕГ [7], 3 – опубликованное ранее [8]

В четвертой главе описаны эксперименты по изучению множественности мгновенных нейтронов спонтанного деления, приводятся данные по эмиссии нейтронов для изотопов ^{252}No , ^{244}Fm и ^{246}Fm , а так же результаты измерений важнейших характеристик спонтанного деления этих изотопов: периодов полураспада, ТКЕ и b_{SF} .

Первый эксперимент на сепараторе с модернизированной детектирующей системой проводился в октябре 2008 года. Впервые измерялись выходы нейтронов спонтанного деления ядра ^{246}Fm , получаемого в реакции полного слияния ионов ^{40}Ar с ядрами мишени ^{208}Pb . Ранее для этого изотопа были измерены период полураспада, полная кинетическая энергия (ТКЕ) и вероятность распада спонтанным делением (b_{SF}). В ходе 10-дневного эксперимента для ^{246}Fm было зарегистрировано 108 событий спонтанного деления и около 1000 α -распадов. Измеренный период полураспада составил величину 1.3 ± 0.2 секунды. Вероятность распада посредством спонтанного деления составила $b_{\text{SF}} = (5 \pm 3)\%$. Эти величины хорошо согласуются с ранее опубликованными значениями [9]. Для измеренного распределения нейтронов, при помощи метода статистической регуляризации [7], проводилась процедура восстановления реальной множественности нейтронов с учетом величины эффективности нейтронного детектора (в этом эксперименте она составляла $\varepsilon = 36 \pm 1\%$). Среднее число нейтронов на один акт спонтанного деления ядра ^{246}Fm составило величину $\bar{\nu} = 3.6 \pm 0.5$.

В июле 2010 года был проведен эксперимент, в котором измерялась множественность нейтронов спонтанного деления изотопа ^{252}No . Ранее уже проводились эксперименты [2,3], нацеленные на изучение множественности нейтронов спонтанного деления этого изотопа, но статистика была недостаточна для точного восстановления распределений. В описываемом эксперименте ядра ^{252}No синтезировали в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb} = 2n + ^{252}\text{No}$. Сечение этой реакции составляет около 200 нанобарн в максимуме функции возбуждения. С мишенью провзаимодействовало 1.7×10^{17} ионов ^{48}Ca . В результате было зарегистрировано около 2000 актов спонтанного деления ^{252}No . Это

позволило нам с высокой точностью измерить распределения нейтронов по множественностям и протестировать работу всей детектирующей системы. Величина среднего числа нейтронов на один акт спонтанного деления ^{252}No составила $\bar{\nu} = 4.06 \pm 0.12$. Это значение хорошо согласуется с полученными ранее результатами $\bar{\nu} = 4.43 \pm 0.45$ [2] и $\bar{\nu} = 4.15 \pm 0.30$ [3].

Учитывая достаточно высокую статистику событий спонтанного деления ^{252}No , полученное в эксперименте значение ТКЕ ^{252}No было использовано для калибровки тракта осколков фокального полупроводникового детектора.

Следующим был эксперимент по изучению свойств ^{244}Fm , получаемого в $2n$ канале реакции слияния $^{40}\text{Ar} + ^{206}\text{Pb}$. Сечение реакции образования ядра отдачи составляет около 3 нанобарн. Эксперимент продолжался 7 суток (1.6×10^{18} ионов ^{40}Ar на мишени). За это время были зарегистрированы 212 событий, которые относятся к спонтанному делению ^{244}Fm . Период полураспада для этого ядра составил $T_{1/2} = (3.47 \pm 0.26)$ мс (в работе [10] $T_{1/2} = 3.12 \pm 0.08$). Среднее число нейтронов на один акт спонтанного деления ^{244}Fm измерялось впервые и составило $\bar{\nu} = 3.3 \pm 0.3$. Кроме того, для ядра ^{244}Fm была оценена полная кинетическая энергия осколков. Значение ТКЕ рассчитывалось сложением амплитуды сигналов в фокальном и боковых детекторах с учетом калибровочных данных, полученных при измерениях ^{252}No . После корректировки на число вылетевших нейтронов, эта величина составила приблизительно 198 ± 15 МэВ. Вычисленное значение хорошо согласуется с ранее опубликованными данными [11]. В результате поиска ЯО-а корреляций не было зарегистрировано ни одного события, которое можно отнести к α -распаду ^{244}Fm , таким образом наш эксперимент подтверждает что вероятность распада спонтанным делением b_{SF} для этого изотопа близка к 100% (в работе [10] $b_{\text{SF}} \approx 99.7\%$).

В пятой главе полученные результаты сравниваются с расчетами, сделанными в рамках модели точки разрыва [4], приводится систематика среднего числа нейтронов на одно спонтанное деление ($\bar{\nu}$) и описывается роль измеренных величин в восстановлении энергетического баланса процесса деления.

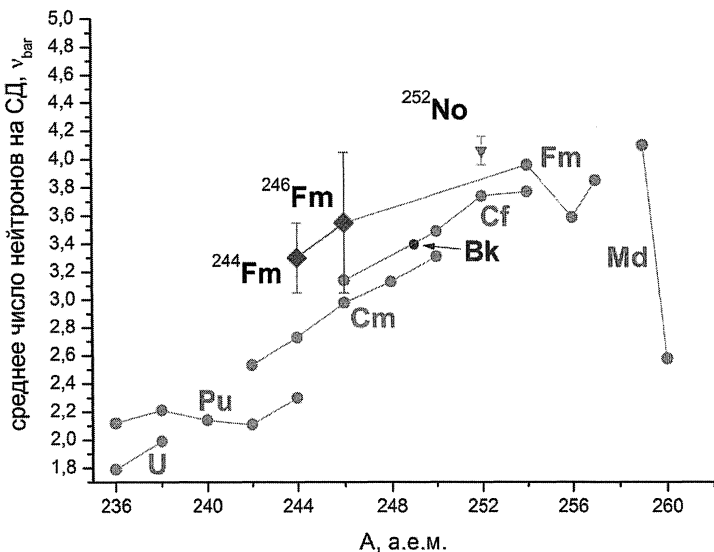


Рисунок 4 – систематика среднего числа нейтронов спонтанного деления ($\bar{\nu}$). Ромбами отмечены результаты, описанные в данной работе. Перевернутые треугольники обозначают результаты ранее полученные для ^{252}No [2,3].

Имеющиеся экспериментальные данные о величине $\bar{\nu}$, полученные для спонтанного деления изотопов Cm, Cf, Fm и No, дополняют систематику $\bar{\nu}$ в ряде интересных точек (рис. 4). Наиболее интересны данные по изотопам фермия, с учетом опубликованных ранее данных [1], удастся проследить уменьшение $\bar{\nu}$ в зависимости от A при $A > 254$, которое приходит на смену заметному увеличению $\bar{\nu}$ с ростом A для ядер с $A = 244-254$. Экспериментальные значения для ^{244}Fm (3.3 ± 0.3) и для

^{246}Fm (3.55 ± 0.5) оказываются примерно такими, какими и можно было ожидать на основе экстраполяции имевшихся ранее данных. Это означает, что в тех аспектах, которые определяют величину средней энергии возбуждения осколков, спонтанное деление нейтроно-дефицитных изотопов фермия аналогично скорее делению ядер из традиционной области Cm - Cf нежели делению нейтроно-избыточных изотопов фермия, в котором начинает преобладать симметричная мода в распределении осколков по массам. В то же время, значительный интерес для изучения представляют изотопы нобелия. Полученное значение $\bar{\nu} = 4.06 \pm 0.12$ для ^{252}No , хорошо вписывается в систематику. Это ядро находится на границе перехода от ассиметричного к двухмодальному делению, однако, оценить степень влияния двухмодальности на количество нейтронов деления можно лишь после экспериментов по изучению свойств спонтанного деления соседних изотопов нобелия.

Экспериментальные значения $\bar{\nu}$, полученные в работе, сравнивались с расчетными значениями, вычисленными с использованием усовершенствованной модели точки разрыва [4]. Как видно из табл.1, соответствие расчетов и экспериментальных данных находится на высоком уровне.

Таблица 1

Расчетные и экспериментально измеренные значения среднего числа нейтронов спонтанного деления и полной кинетической энергии осколков.

<i>ядро</i>	<i>Расчетное значение $\bar{\nu}$</i>	<i>Измеренное значение $\bar{\nu}$</i>	<i>Расчетное значение ТКЕ (MeV)</i>	<i>Измер. значение ТКЕ (MeV)**</i>
^{252}No	4.1	$4.06 \pm 0.12^*$	201	202.4 ± 1.2
^{244}Fm	3.5	$3.3 \pm 0.3^*$	196	$198 \pm 15^*$
^{246}Fm	3.6	$3.6 \pm 0.5^*$	196	199 ± 4
^{248}Cm	3.1	3.13 ± 0.01	183	182
^{252}Cf	3.6	3.77 ± 0.01	186	184.1 ± 1.3

* - результаты, полученные в ходе подготовки диссертационной работы.

** - приводятся скорректированные значения ТКЕ до вылета нейтронов.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. В фокальной плоскости сепаратора ВАСИЛИСА создана комбинированная детектирующая система, включающая в себя кремниевый многостриповый детектор ядер отдачи (ЯО) и нейтронный детектор на базе 54-х счетчиков с ^3He .
2. На сепараторе ВАСИЛИСА в реакциях полного слияния на пучках тяжелых ионов (^{48}Ca , ^{40}Ar), были синтезированы изотопы ^{252}No , ^{244}Fm и ^{246}Fm . Измерялись и сравнивались с существующими данными такие характеристики спонтанного деления как периоды полураспада, ТКЕ осколков деления и b_{SF} .
3. Для перечисленных изотопов восстанавливались распределения мгновенных нейтронов спонтанного деления по множественностям. Для изотопов $^{244,246}\text{Fm}$ впервые были получены значения среднего числа нейтронов на один акт спонтанного деления, $\bar{\nu}$.
4. Распределение по множественностям нейтронов спонтанного деления ^{252}No сравнивалось с ранее полученными результатами.

В приложении, следующим после списка литературы, приводятся результаты расчетов в программе MCNP для разных конфигураций нейтронного детектора.

Список публикаций с основными результатами диссертации:

1. A.V. Yeregin, A.V. Belozero, M.L. Chelnokov V.I. Chepigin, V.A. Gorshkov, A.P. Kabachenko, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, R.N. Sagaidak, A.V. Shutov, E.A. Sokol, A.I. Svirikhin Neutron detector at the focal plane of the set up VASSILISSA. // Nucl. Instr. Meth. A539 (2005) p.441
2. A.I. Svirikhin, V.N. Dushin, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, I.N. Izosimov, D.E. Katrasev, O.N. Malyshev, A. Minkova, A.G. Popeko, E.A. Sokol, A.V. Yeregin Neutron multiplicity at spontaneous fission of ^{246}Fm . // Eur. Phys. J. A44, (2010) p.393
3. А. И. Свирихин, А. В. Исаев, А. В. Ерёмин, А. Н. Кузнецов, О. Н. Мальшев, А. Г. Попеко, Е. А. Сокол, М. Л. Челноков, В. И. Чепигин Детектор для изучения характеристик спонтанного деления короткоживущих тяжелых ядер. // ПТЭ, №5, (2011), с.50
4. А. И. Свирихин, М. Гупта, А. В. Ерёмин, И.Н. Изосимов, А. В. Исаев, А. Н. Кузнецов, О. Н. Мальшев, С. Мулинс, А. Г. Попеко, Е. А. Сокол, М. Л. Челноков, В. И. Чепигин Изучение множественности нейтронов спонтанного деления короткоживущих трансураниевых ядер на сепараторе ВАСИЛИСА. // Письма в ЭЧАЯ.. т.9 №1 (171) (2012) с.45
5. A.I. Svirikhin, A.V. Andreev, V.N. Dushin, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, M. Gupta, A.V. Isaev, I.N. Izosimov, D.E. Katrasev, A.N. Kuznetsov, O.N. Malyshev, S. Mullins, A.G. Popeko, E.A. Sokol, A.V. Yeregin The emission of prompt neutrons from the spontaneous fission of ^{252}No and ^{244}Fm . // Eur. Phys. J. A48, (2012), p.121
6. A.I. Svirikhin, A.V. Yeregin, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, I.N. Izosimov, D.E. Katrasev, O.N. Malyshev, A. Minkova, A.G. Popeko, E.A. Sokol Neutron Multiplicity At Spontaneous Fission Of ^{246}Fm // Proc. Of The International Symposium on Exotic Nuclei (EXON): Sochi, Russia, September 28 – October 2, 2009, - AIP Conf. Proc. 1224, (2010), p.334
7. A.I. Svirikhin, A.V. Yeregin, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, I.N. Izosimov, D.E. Katrasev, O.N. Malyshev, A. Minkova, A.G. Popeko, E.A. Sokol Neutron multiplicity at spontaneous fission of ^{246}Fm // Proc. Of 4th International Workshop on Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy: Cadarache, France, May 13- 16, 2009, AIP Conf. Proc. 1175, (2009), p.397

8. A.I. Svirikhin, Ch. Brianson, S.N. Dmitriev, Yu.Ts. Oganessian, E.A. Sokol, D.A. Testov, A.V. Yeremin Neutrons From Spontaneous Fission Of Long-Lived Super-heavy Nuclei // Proc. Of 4th International Workshop on Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy: Cadarache, France, May 13-16, 2009, AIP Conf.Proc. 1175, (2009), p.297
9. A.I. Svirikhin, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, M. Gupta, I.N. Izosimov, D.E. Katrasev, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, E.A. Sokol, A.V. Yeremin The investigation of properties of short-lived SF isotopes ($Z > 100$) at the focal plane of VASSILISSA separator. // Proc. Of the DAE Symposium on Nuclear Physics: Birla Institute of Technology & Science, Pilani, India, December 20-24, 2010, Volume 55, (2010), p.796
10. A.I. Svirikhin, A.V. Yeremin, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, I.N. Izosimov, D.E. Katrasev, O.N. Malyshev, A. Minkova, A.G. Popeko, E.A. Sokol The investigation of properties of short-lived SF isotopes ($Z > 100$) at the focal plane of VASSILISSA separator. // Proc. Of The International Symposium on Exotic Nuclei (EXON): Vladivostok, Russia, October 1 – 6, World Scientific Publishing, (2012), p.175

Цитированная литература:

1. D.C. Hoffman Spontaneous fission properties and life-time systematics. // Nucl. Phys. A502, (1989), p.21
2. Yu.A. Lazarev, O.K. Nefediev, Yu.Ts. Oganessian, M. Dakowski Multiplicity of prompt neutrons from spontaneous fission of the isotope $^{252}102$. // Phys. Lett. B52, (1974), p.321
3. A.V. Yeremin, A.V. Belozerov, M.L. Chelnokov V.I. Chepigin, V.A. Gorshkov, A.P. Kabachenko, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, R.N. Sagaidak, A.V. Shutov, E.A. Sokol, A.I. Svirikhin Neutron detector at the focal plane of the set up VASSILISSA. // Nucl. Instr. Meth. A539, (2005), p.441
4. A.V. Andreev, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, S.P. Ivanova, S.N. Kuklin, W. Scheid Ternary fission within statistical approach. // Eur. Phys. J. A30, (2006), p.579
5. A.V. Yeremin, A.N. Andreyev, D.D. Bogdanov, G.M. Ter-Akopian, V.I. Chepigin, V.A. Gorshkov, A.P. Kabachenko, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, R.N. Sagaidak, S. Sharo, E.N. Voronkov, A.V. Taranenko, A.Yu. Lavrentjev The kinematic separator VASSILISSA performance and experimental results // Nucl. Instr. And Meth. A350, (1994), p.608

6. E.A. Sokol, V.I. Smirnov, S.M. Lukyanov, Yu.E. Penionzhkevich A detector for measuring the multiplicities and the angular correlations of neutrons. // Nucl. Instr. And Meth. A400, (1997), p.96
7. M. Dakowski, Yu. A. Lazarev, V. F. Turchin, L. S. Turovtseva Reconstruction of particle multiplicity distributions using the method of statistical regularization. // Nucl. Instr. And Meth. 113, (1973), p.195
8. N. E. Holden and M.S. Zucker Prompt neutron multiplicities for the transplutonium nuclides. // in: Nucl. Data for Basic and Applied Science, Proc. of the Int. Conf., Santa Fe, New Mexico, 13-17 May 1985, vol. 2, p.1631
9. D.C. Hoffman, D. Lee, A. Ghiorso, M. Nurmia, K. Aleklett Fragment mass and kinetic-energy distributions from spontaneous fission of the neutron-deficient isotopes, 1.2-s ^{246}Fm and 38-s ^{248}Fm . // Phys. Rev. C22, (1980), p.1581
10. J. Khuyagbaatar, S. Hofmann, F.P. Heßberger, D. Ackermann, H.G. Burkhard, S. Heinz, B. Kindler, I. Kojouharov, B. Lommel, R. Mann, J. Maurer, K. Nishio, Yu. Novikov Spontaneous fission of neutron-deficient fermium isotopes and the new nucleus ^{241}Fm . // Eur. Phys. J. A37, (2008), p.177.

Получено 22 февраля 2013 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 25.02.2013.

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

Усл. печ. л. 1,69. Уч.-изд. л. 1,35. Тираж 100 экз. Заказ № 57921.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/