

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флёрова

На правах рукописи



Исаев Андрей Владимирович

**Исследования множественности мгновенных
нейтронов спонтанного деления чётно-чётных изотопов
трансформиевых элементов**

Специальность 1.3.15 —
«физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких
энергий»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2023

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрова
Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель: **Свирихин Александр Игоревич**,
кандидат физико-математических наук,
Лаборатория ядерных реакций
им. Г. Н. Флёрова ОИЯИ,
начальник сектора

Официальные оппоненты: **Иноятов Анвар Хидоятovich**,
доктор физико-математических наук,
Лаборатория ядерных проблем
им. В. П. Джелепова ОИЯИ,
начальник сектора

Хлебников Сергей Васильевич,
кандидат физико-математических наук,
АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»,
ведущий научный сотрудник

Защита состоится «___» _____ 2023 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета ОИЯИ.03.02.2022.П при Объединённом институ-
те ядерных исследований по адресу: 141980, г. Дубна, Московская обл.,
ул. Жолио-Кюри, д. 6.

Электронная версия диссертации доступна на официальном сайте ОИЯИ
по адресу: <https://dissertations.jinr.ru>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-техниче-
ской библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ОИЯИ.03.02.2022.П,
канд. физ.-мат. наук



Попеко Андрей Георгиевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Спонтанное деление ядер было открыто Г.Н. Флёрвым и К.А. Петржаком в 1940 г. [1]. Процесс оказался характерным для многих атомных ядер с $Z \geq 92$ и определяет в данной области границу существования химических элементов.

Образовавшиеся в процессе деления осколки, могут снимать своё возбуждение испуская некоторое число нейтронов и γ -квантов. Количество нейтронов, испускаемое в процессе деления, зависит от степени возбуждения осколков и имеет важное значение для восстановления энергетического баланса реакции. Множественность мгновенных нейтронов может нести ценную информацию о динамике процесса, но является сегодня одной из наименее изученных характеристик для многих спонтанно делящихся изотопов.

С момента открытия О. Ганом и Ф. Штрассманом деления ядер урана в 1938 г. [2], и до сегодняшнего дня, не существует законченной модели, которая могла бы с единой позиции описать все свойства столь сложного процесса с участием большого числа нуклонов. Для развития теоретических подходов в физике деления ядер огромное значение имеет получение новых экспериментальных данных. Однако при изучении наиболее тяжёлых элементов возникают значительные трудности, связанные прежде всего с их короткими временами жизни и малыми сечениями образования, что требует от исследователей применения самых передовых методов.

Целью данной диссертационной работы является исследование мгновенных нейтронов, испаряющихся из осколков спонтанного деления короткоживущих изотопов фермия, нобелия и резерфордия.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. модернизировать сепаратор ядер отдачи ВАСИЛИСА [3];
2. создать новую высокоэффективную детектирующую систему SFiNx [A1];
3. написать программу анализа экспериментальных данных [4];
4. провести эксперименты, в ходе которых образовывались исследуемые изотопы, и обработать полученные данные [A1–A5].

Научная новизна:

1. впервые получены данные по эмиссии мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{254}No и ^{256}Rf ;
2. создана новая высокоэффективная детектирующая система для исследования спонтанного деления короткоживущих ядер.

Практическая значимость полученных экспериментальных данных о множественности мгновенных нейтронов определяется прежде всего их использованием для совершенствования теории деления атомных ядер и

для пополнения баз ядерных данных. При этом развитие в работе инструментальные методы могут успешно применяться и для экспериментального изучения свойств спонтанного деления сверхтяжёлых элементов синтезируемых на ускорителях тяжёлых ионов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. разработана новая детектирующая система SFiNx [A1] для изучения свойств спонтанного деления короткоживущих тяжёлых ядер на модернизированном сепараторе ядер отдачи SHELS [A6];
2. с использованием пучков тяжёлых ионов ускорителя У-400 в ЛЯР ОИЯИ была проведена серия экспериментов по синтезу чётно-чётных изотопов ^{246}Fm , $^{252,254}\text{No}$ и ^{256}Rf , в ходе которых были определены их периоды полураспада и коэффициенты ветвления;
3. впервые получены данные о выходах мгновенных нейтронов спонтанного деления изотопов ^{254}No [A3] и ^{256}Rf [A4; A5] (средние числа нейтронов в акте деления, дисперсии распределений нейтронов по множественностям и вероятности испускания нейтронов различной кратности);
4. с наилучшей точностью произведены измерения вероятностей испускания мгновенных нейтронов различной кратности и средних чисел нейтронов в акте деления изотопов ^{246}Fm [A2] и ^{252}No [A1];
5. выполнено сравнение полученных экспериментальных данных о выходах мгновенных нейтронов с теоретическими расчётами в рамках двух моделей деления [5; 6].

Личный вклад. Автор принимал активное участие в создании кинематического сепаратора ядер отдачи SHELS. Производил расчёты новой детектирующей системы SFiNx в программе MCNPX, участвовал в разработке детектирующей системы и её изготовлении. Принимал деятельное участие в каждом из описываемых экспериментов, в частности, обработал данные этих экспериментов в самостоятельно написанной программе.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались: на международном научном форуме «Ядерная наука и технологии» (Казахстан, Алматы, 2021 г.), на симпозиуме «Новые тенденции в ядерно-физических детекторах» (Польша, Варшава, 2021 г.), на симпозиуме «Ежегодное собрание NUSTAR» (Германия, Дармштадт, 2019 г.), на международных симпозиумах по экзотическим ядрам «EXON» (Россия, Петрозаводск, 2018 г.; Россия, Владивосток, 2012 г.; Россия, Сочи, 2009 г.), на международной конференции «ISTROS» (Словакия, Паперничка, 2017 г.)

и на XLIX международной зимней конференции по ядерной физике (Италия, Бормио, 2011 г.).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 работах в рецензируемых изданиях [A1—A9].

Объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объём диссертации составляет 94 страницы, включая 48 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 109 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность проблемы и цель исследований. Излагается научная новизна работы, её практическая значимость и приводятся основные положения выносимые на защиту.

Первая глава посвящена краткому описанию механизма и основных характеристик спонтанного деления атомных ядер. Значительное внимание уделяется роли мгновенных нейтронов деления и приводится актуальное состояние их исследований.

Вторая глава посвящена сепаратору ядер отдачи SHELS (Separator for Heavy Element Spectroscopy) [A6], который установлен на канале №3 выведенного пучка тяжёлых ионов циклотрона «У-400» ЛЯР ОИЯИ. Установка (рис. 1) появилась в результате глубокой модернизации электростатического сепаратора ВАСИЛИСА [3], в ходе которой вместо селекции продуктов ядерных реакций полного слияния по электрической жёсткости была реализована схема разделения по скоростям искомых продуктов реакций. Сепаратор обеспечивает отделение продуктов реакций полного слияния от ионов пучка и продуктов побочных реакций и последующую транспортировку ядер к детекторам (время транспорта ~ 3 мкс).

Пучок тяжёлых ионов из ускорителя попадает на вращающуюся мишень, где в ходе реакций полного слияния образуются ядра отдачи (ЯО). После мишени расположен первый триплет магнитных квадрупольных линз, который осуществляет первичную фокусировку ЯО. Далее, с использованием комбинации скрещенных магнитных и электрических полей (фильтра скоростей), происходит отделение продуктов реакций полного слияния от продуктов побочных реакций и ионов пучка. Не взаимодействовавшие с ядрами мишени ионы пучка практически не отклоняются в первом дефлекторе и тормозятся в цилиндре Фарадея.

Фильтры скоростей в сепараторе установлены зеркально-симметричным образом, каждый из них состоит из дипольного магнита и электростатического дефлектора с двумя параллельными пластинами. Траектория пролёта ионов через два фильтра скоростей имеет *S*-образную форму.

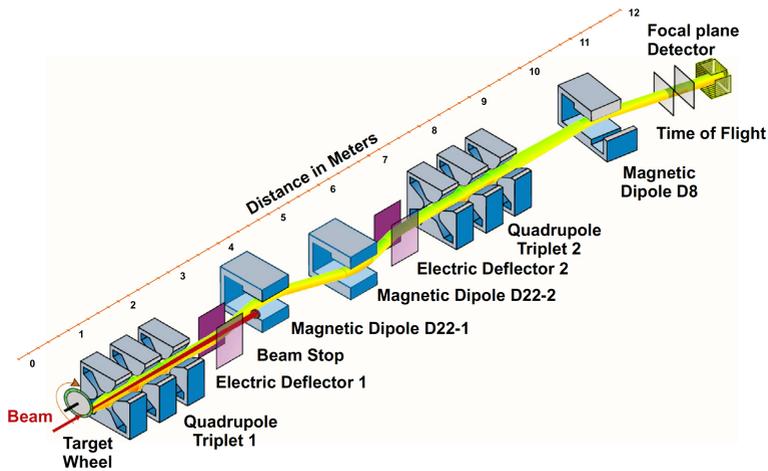


Рис. 1 — Схема сепаратора SHELS [A6].

Прошедшие через фильтры скоростей ЯО фокусируются вторым триплетом магнитных квадрупольных линз для транспортировки в детектирующую систему, установленную в фокальной плоскости сепаратора. Находящийся перед детектирующей системой дипольный магнит отклоняет ядра отдачи на 8° , чтобы обеспечить дополнительный фактор очистки от рассеянных ионов пучка, а также от нейтронов и γ -квантов, образующихся в цилиндре Фарадея и на мишени. Для дополнительного снижения фона, детектирующая система сепаратора расположена за защитной стеной из тяжёлого бетона толщиной около 2 метров.

Третья глава посвящена краткому обзору методов регистрации осколков деления и мгновенных нейтронов, а также развернутому описанию детектирующих систем [A1; A7], непосредственно использовавшихся в настоящей работе.

Система SFiNx (Spontaneous Fission, Neutrons and x-rays) была создана в ходе работы над диссертацией. Моделирование в программе MCNPX множества различных конфигураций, привело к оптимальному варианту, с использованием 116 ^3He -счётчиков нейтронов (рис. 2) трёх различных типов [A1]. Давление ^3He в счётчиках составляет 7 атм. Замедлитель изготовлен из полиэтилена в виде правильной восьмиугольной призмы. Для защиты от фоновых нейтронов, внешняя часть детектора покрыта плитой из борированного полиэтилена.

Счётчики нейтронов расположены вокруг вакуумной камеры, в которой помещена сборка из многостриповых кремниевых полупроводниковых детекторов (ППД). Фокальный ППД, с конфигурацией 128×128 -стрипов, имеет размер 100×100 мм и толщину 500 мкм. Перпендикулярно фокальному детектору располагаются 8 кремниевых ППД, образуя сборку в виде

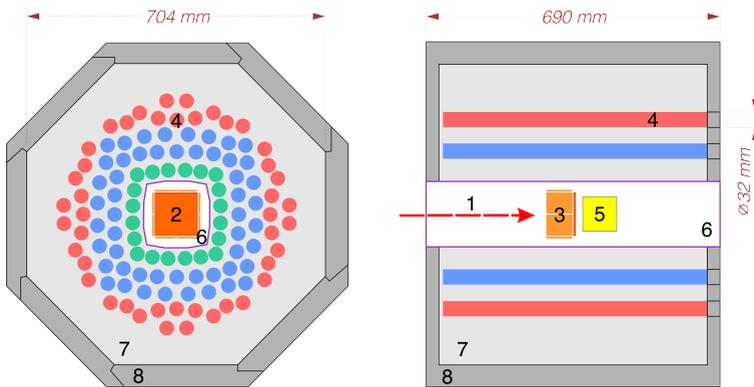


Рис. 2 — Схема SFiNx (вид спереди — слева; вид сбоку — справа). Условные обозначения: 1 — ЯО; 2 — фокальный Si-детектор; 3 — боковые Si-детекторы; 4 — ^3He -счётчики; 5 — сцинтиллятор; 6 — вакуумная камера; 7 — замедлитель; 8 — защита от внешнего фона.

колотца. Боковые 16×16 -стриповые детекторы имеют размер 50×60 мм, толщину 700 мкм и размещаются попарно вдоль каждой из сторон фокального детектора. Энергетическое разрешение для α -частиц с энергией 8 МэВ составляет 20 кэВ и 30 кэВ для фокального и боковых ППД соответственно. Для уменьшения шумов и улучшения энергетического разрешения, сборка из ППД смонтирована на охлаждаемом держателе.

Четвёртая глава посвящена анализу данных экспериментов по исследованию свойств спонтанного деления ^{246}Fm [A2], $^{252,254}\text{No}$ [A1; A3] и ^{256}Rf [A4; A5].

Пучки тяжёлых ионов из ускорителя У-400 попадали на вращающиеся мишени, где в реакциях полного слияния (таблица 1) образовывались исследуемые изотопы. В экспериментах использовались мишени из $^{206,208}\text{PbS}$ (толщинами $350 - 450$ мкг/см 2) высокого обогащения ($^{206}\text{Pb} \sim 97\%$; $^{208}\text{Pb} > 99\%$), материал которых наносился на титановые подложки (1,5 – 2 мкм). Энергии пучков ионов подбирались таким образом, чтобы попасть на максимумы функций возбуждения 2n-каналов соответствующих реакций. Полученные ЯО, после сепарации в установке SHELS, пролетали через времяпролётный детектор и имплантировались в фокальный ППД [A1; A9]. Вылетающие из фокального детектора α -частицы и осколки деления регистрировались в боковых Si-детекторах. Испаряющиеся из осколков деления мгновенные нейтроны детектировались сборками из ^3He -счётчиков [A1; A7]. Эффективности регистрации единичных нейтронов (ϵ_n) сборками нейтронных счетчиков приводятся в таблице 1. Образующиеся в процессе деления γ -кванты регистрировались в сцинтилляционном детекторе, установленном непосредственно за фокальным ППД.

Таблица 1 — Основные сведения об экспериментах, набранных статистиках и полученных характеристиках распада тяжёлых ядер.

Изотоп	^{246}Fm [A2]	^{252}No [A1]	^{254}No [A3]	^{256}Rf [A5]
Реакция	$^{40}\text{Ar}+^{208}\text{Pb}$	$^{48}\text{Ca}+^{206}\text{Pb}$	$^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$	$^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$
ε_n , %	$54,8\pm 0,1$	$54,7\pm 0,1$	43 ± 1	45 ± 1
Δt	30 мс – 15,4 с	1 мс – 25 с	15 – 250 с	0 – 62 мс
\sum_{SF}	235	3260	130	1345
\sum_n	488	7574	273	2605
$\bar{\nu}$	$3,79\pm 0,30$	$4,25\pm 0,09$	$4,88\pm 0,53$	$4,30\pm 0,17$
σ_{ν}^2	2,1	2,1	1,2	3,2
$T_{1/2}$	$1,50^{+0,08}_{-0,07}$ с	$2,44\pm 0,05$ с	$44,1\pm 1,0$ с	$6,7\pm 0,2$ мс
$b_{\alpha, SF}$	$(SF) 0,061\pm 0,005$	–	–	$(\alpha) 0,003^{+0,005}_{-0,003}$

Для ЯО и осколков деления устанавливались строгие критерии отбора по энергии. При обнаружении осколка деления в фокальном ППД, сначала проверялось есть ли для него совпадение с ЯО, попавшем в тот же пиксель детектора. Временные интервалы поиска осколков (Δt) и статистика по найденным спонтанным делениям (\sum_{SF}) даны в таблице 1.

Из распределения времён жизни были получены значения периодов полураспада ($T_{1/2}$) всех исследуемых изотопов. $T_{1/2}$ для ^{246}Fm составил $1,50^{+0,08}_{-0,07}$ с и согласуется с ранее полученными $1,54\pm 0,04$ с [7] и $1,3\pm 0,2$ с [8]. $T_{1/2}$ для ^{252}No составил $2,44\pm 0,05$ с и согласуется с известными значениями $2,44\pm 0,04$ с [9] и $2,30\pm 0,22$ с [10]. $T_{1/2}$ для ^{254}No составил $44,1\pm 1,0$ с, что довольно близко к известному значению $51,2\pm 0,4$ с [11]. Наконец $T_{1/2}$ для ^{256}Rf составил $6,7\pm 0,2$ мс, что согласуется с известными значениями $6,2\pm 0,2$ мс [12] и $6,7\pm 0,2$ мс [13].

Для оценки коэффициента ветвления по пути спонтанного деления (b_{SF}) ядра ^{246}Fm производился поиск «ЯО – α »-корреляций (найдено 1809 событий). Значение коэффициента для ^{246}Fm составило $b_{SF} = 0,061\pm 0,005$, что согласуется с ранее опубликованными $0,068\pm 0,006$ [7] и $0,05\pm 0,03$ [8]. Коэффициент ветвления по пути α -распада (b_{α}) ядра ^{256}Rf определялся на основе 1 найденной «ЯО – α – α »-корреляции, все события которой были локализованы в одном пикселе фокального детектора. Для ^{256}Rf было получено значение $b_{\alpha} = 0,003^{+0,005}_{-0,003}$, которое согласуется с уже известным $0,0032\pm 0,0017$ [12].

Поиск мгновенных нейтронов для всех изотопов осуществлялся во временном интервале 0 – 128 мкс от регистрации осколка деления в фокальном ППД. Статистика по числу найденных мгновенных нейтронов (\sum_n), средние испущенные числа нейтронов а акте деления ($\bar{\nu}$) и оценки дисперсии (σ_{ν}^2) распределений мгновенных нейтронов по множественностям приводятся в таблице 1. Для ^{246}Fm полученное $\bar{\nu} = 3,79\pm 0,30$ согласуется

с уже измеренным $3,55 \pm 0,50$ [8]. Для ^{252}No полученное $\bar{\nu} = 4,25 \pm 0,09$ согласуется с уже известными $4,15 \pm 0,30$ [14] и $4,43 \pm 0,45$ [15]. Подчеркнём, что влияние нейтронного фона в экспериментах было незначительно в сравнении с уровнем полученных статистических ошибок.

Поскольку эффективности используемых детекторов нейтронов [A1; A7] не были равны 100% и имели место значительные статистические ошибки экспериментальных данных, для восстановления истинных распределений нейтронов по множественностям применялся метод статистической регуляризации А.Н. Тихонова [A4]. Восстановленные множественности мгновенных нейтронов ^{246}Fm , $^{252,254}\text{No}$ и ^{256}Rf показаны на рис. 5 и 6.

Пятая глава посвящена обсуждению полученных экспериментальных данных по выходам мгновенных нейтронов и их сравнению с теоретическими расчётами.

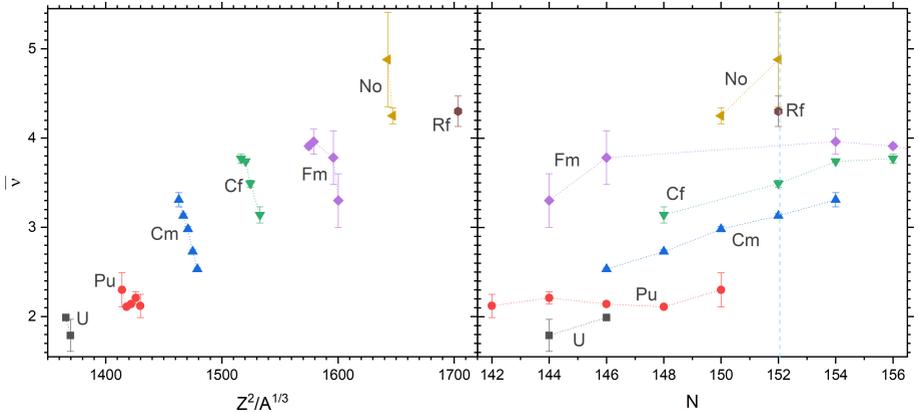


Рис. 3 — Зависимости среднего числа нейтронов в акте деления чётно-чётных ядер от кулоновского параметра (слева) и от числа нейтронов (справа). Данные из [16] и текущей работы.

Обновлённые систематики среднего числа нейтронов в акте деления показаны на рис. 3. В целом для чётно-чётных ядер не выявлено каких-либо аномалий в поведении $\bar{\nu}$, прослеживается тенденция к его увеличению по мере движения к более тяжёлым элементам. Наибольшее значение $\bar{\nu}$ сейчас зарегистрировано для ^{254}No и составляет $4,88 \pm 0,53$. Обращают на себя внимание достаточно высокие значения дисперсии распределений мгновенных нейтронов по множественностям для изотопов ^{246}Fm , ^{252}No и ^{256}Rf . Так наибольшее значение $\sigma_{\nu}^2 = 3,2$ было отмечено для ^{256}Rf , что приблизительно в 2 – 2,5 раза выше, чем ранее установлено для более лёгких спонтанно делящихся ядер ^{252}Cf ($\sigma_{\nu}^2 = 1,59$ [17]) и ^{248}Cm ($\sigma_{\nu}^2 = 1,29$ [17]).

Теоретический расчёт нейтронной множественности был проведён в рамках GEF [6] и ISP [5] моделей деления. Сперва был произведён расчёт распределения мгновенных нейтронов по кратностям для ^{252}Cf и ^{248}Cm (рис. 4, таблица 2). Можно наблюдать достаточно хорошее соответствие модельных предсказаний и экспериментальных данных как для средних чисел нейтронов, так и для формы распределений.

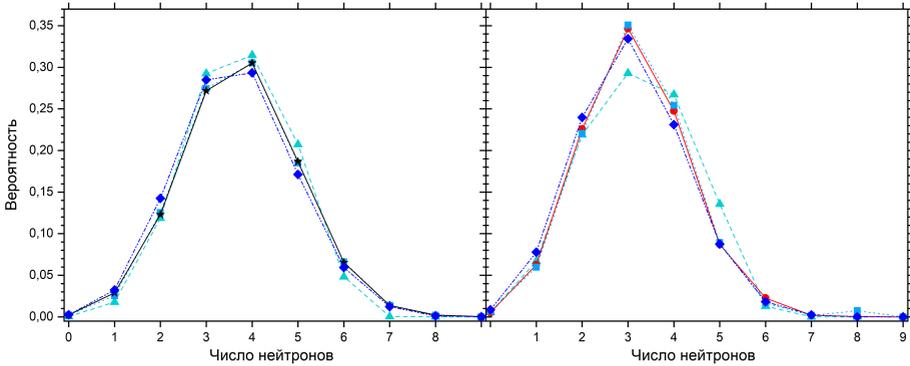


Рис. 4 — Распределения множественности мгновенных нейтронов ^{252}Cf (слева) и ^{248}Cm (справа). Экспериментальные данные: \blacksquare — [17]; \star — [18] и \bullet — текущая работа. Теоретические расчёты: \blacktriangle — ISP и \blacklozenge — GEF.

Далее был произведён расчёт для ^{246}Fm и ^{252}No (рис. 5, таблица 2). Для расчётов в рамках ISP модели наблюдается практически идеальная сходимость по средним числам нейтронов в одном акте распада с экспериментальными значениями. Для расчётов в рамках GEF модели сходимость с экспериментом по $\bar{\nu}$ несколько хуже. Формы теоретических распределений предсказанных в ISP модели сильно отличаются от форм экспериментальных распределений. В то же самое время GEF модель лучше описывает форму для ^{246}Fm и практически в рамках статистических ошибок описывает форму распределения для ^{252}No .

Сравнение теоретических распределений, полученных в рамках ISP модели, для ^{252}Cf , ^{248}Cm и ^{246}Fm , ^{252}No показывает, что для последних имеет место сильное подавление событий с малыми кратностями нейтронов. Чтобы понять причину этого, был проведён сравнительный анализ соответствующих поверхностей потенциальной энергии. Замечено, что для наиболее вероятных конфигураций деления ^{252}Cf и ^{248}Cm потенциальная энергия как функция деформации фрагментов имеет два минимума; более компактный и сильно деформированный. Компактный минимум приводит к большей полной кинетической энергии осколков и меньшему числу испускаемых нейтронов. В предположении о статистическом равновесии

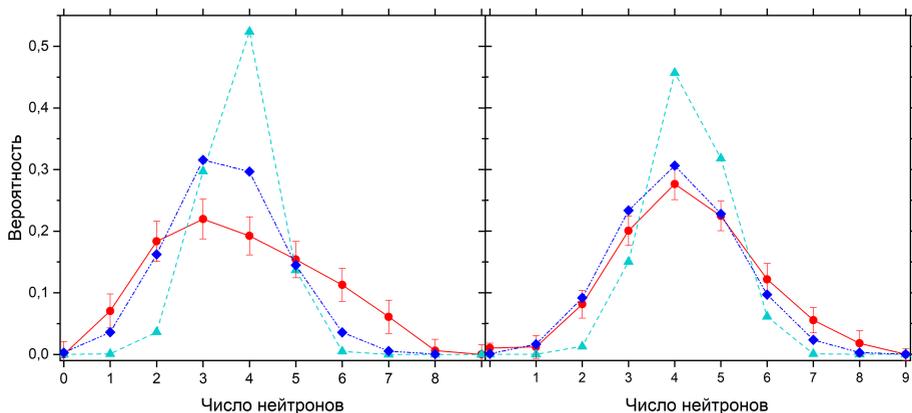


Рис. 5 — Распределения множественности мгновенных нейтронов ^{246}Fm (слева) и ^{252}No (справа). Значения полученные в текущей работе (●) и теоретические расчёты (▲ — ISP и ◆ — GEF).

вероятность реализации различных деформаций разбивается на две значительные части, соответствующие этим двум минимумам. Однако в случае ^{246}Fm и ^{252}No компактный минимум в потенциальной энергии как функции деформации отсутствует. Распределение вероятностей полностью сосредоточено в области больших деформаций. Компактные системы, связанные с малым числом испускаемых нейтронов, реализуются с пренебрежимо малыми вероятностями. Последнее не может быть существенно скорректировано в текущей реализации ISP модели, поскольку требуется более точный учёт неравновесных процессов для ^{246}Fm и ^{252}No .

Отдельного рассмотрения заслуживают теоретические расчёты для ^{254}No и ^{256}Rf (рис. 6, таблица 2). Оба данных изотопа имеют полностью заполненную подоболочку нейтронов $N = 152$, что усиливает влияние оболочечных эффектов на процесс деления. ISP модель тут даёт значения среднего числа нейтронов в акте деления более близкие к экспериментальным, при этом формы теоретических распределений существенно отличаются от экспериментальных. GEF модель для ^{254}No и ^{256}Rf предсказывает слишком заниженные значения средних чисел нейтронов и существенное отличие форм распределений, что вероятно говорит о необходимости более детального учёта роли оболочек в данном подходе.

Интересным представляется и обнаруженный в эксперименте подъём в области нулевой кратности распределения мгновенных нейтронов по множественностям у ^{256}Rf (рис. 6). Похожий эффект (более выраженный) наблюдался у изотопа ^{260}Md [19], для которого было открыто бимодальное симметричное деление [20]. Как было показано в работе [21] распределение полной кинетической энергии осколков (ТКЕ) у ^{256}Rf также содержит две

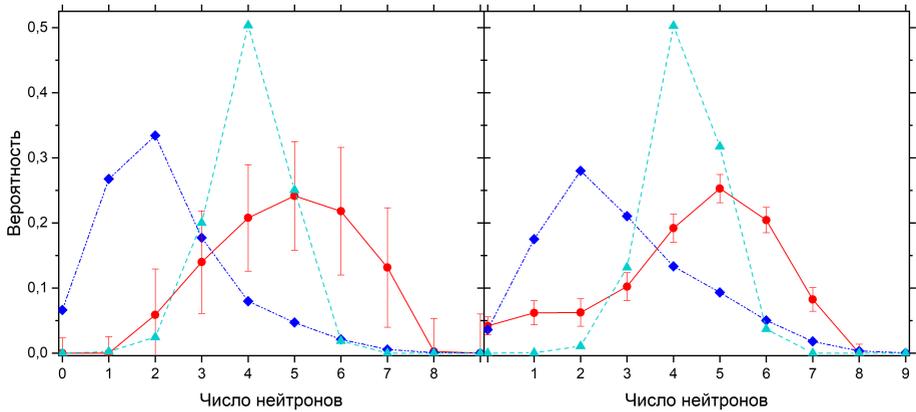


Рис. 6 — Распределения множественности мгновенных нейтронов ^{254}No (слева) и ^{256}Rf (справа). Значения полученные в текущей работе (●) и теоретические расчёты (▲ — ISP и ◆ — GEF).

Таблица 2 — Сравнение параметров экспериментальных и модельных распределений мгновенных нейтронов по кратностям для отдельных чётно-чётных изотопов тяжёлых элементов.

Изотоп	Свойство	Эксперименты				Модель	
		[17]	[8]	[14]	Данная работа	ISP	GEF
^{248}Cm	$\bar{\nu}$	3,13	—	—	3,13	3,21	3,05
	$\Delta\bar{\nu}$	0,03	—	—	0,01	0,25	0,04
	σ_{ν}^2	1,3	—	—	1,4	1,4	1,4
^{246}Fm	$\bar{\nu}$	—	3,55	—	3,79	3,77	3,47
	$\Delta\bar{\nu}$	—	0,50	—	0,30	0,13	0,02
	σ_{ν}^2	—	4,0	—	2,1	0,6	1,4
^{252}No	$\bar{\nu}$	—	—	4,15	4,25	4,27	4,04
	$\Delta\bar{\nu}$	—	—	0,30	0,09	0,15	0,01
	σ_{ν}^2	—	—	4,0	2,1	0,7	1,6
^{254}No	$\bar{\nu}$	—	—	—	4,88	4,03	2,20
	$\Delta\bar{\nu}$	—	—	—	0,53	—	0,83
	σ_{ν}^2	—	—	—	1,2	0,7	1,9
^{256}Rf	$\bar{\nu}$	—	—	—	4,30	4,24	2,83
	$\Delta\bar{\nu}$	—	—	—	0,17	0,12	0,12
	σ_{ν}^2	—	—	—	3,2	0,6	2,6

компоненты, что согласуется с модельными расчётами [22]. При этом теоретический расчёт [22] для ^{256}Rf показывает, что компонента с большим значением $\overline{\text{TKE}}$, будет характеризоваться симметричным массовым распределением осколков, в то время как компонента с меньшим значением $\overline{\text{TKE}}$ соответствует ассиметричному массовому распределению осколков. Мода характеризующаяся симметричным массовым распределением осколков и большим значением $\overline{\text{TKE}}$ может объяснить наличие большого числа делений, в которых осколки рождаются без значительного внутреннего возбуждения и как следствие практически не испаряют нейтронов.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Для изучения свойств спонтанного деления короткоживущих тяжёлых ядер была разработана новая детектирующая система SFiNx на основе 116 ^3He -счётчиков нейтронов и сборки из Si-детекторов с большим 128×128 -стриповым фокальным ППД. Подбор оптимальной геометрии расположения нейтронных счётчиков определялся на основе моделирования в программе MCNPX. Эффективность регистрации единичного нейтрона и среднее время жизни нейтрона в сборке были установлены с использованием ^{248}Cm -источника.
2. В ходе экспериментов на сепараторе SHELS изучались характеристики спонтанного деления ^{246}Fm , $^{252,254}\text{No}$ и ^{256}Rf . Изотопы синтезировались в реакциях полного слияния ускоренных на циклотроне U-400 тяжёлых ионов с ядрами свинцовых мишеней. Данные по выходам мгновенных нейтронов деления впервые получены для ^{254}No и ^{256}Rf , а также уточнены для ^{246}Fm и ^{252}No . Кроме того, для искоемых ядер были определены коэффициенты ветвления и периоды полураспада.
3. Полученные экспериментальные данные по характеристикам мгновенных нейтронов спонтанного деления сравнивались с расчётами в рамках двух моделей деления. Показано, что только ISP модель хорошо описывает полученные в экспериментах средние числа нейтронов в акте деления для всех рассматриваемых ядер. Обе модели для ^{248}Cm хорошо описали форму распределения мгновенных нейтронов по множественностям, а GEF к тому же хорошо описала форму и для ^{252}No . На основе произведённого сравнения, можно сделать вывод, что требуется более детальный учёт неравновесных процессов в ISP модели и оболочечных эффектов в GEF модели.

Наконец в **приложении** к диссертации подробно рассказано о моделировании детектирующей системы SFiNx [A1] в программе MCNPX.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. *Isaev A. V., Yeregin A. V., Zamyatin N. I., Izosimov I. N., Kuznetsova A. A., Malyshev O. N., Mukhin R. S., Popeko A. G., Popov Yu. A., Sailaubekov B., Svirikhin A. I., Sokol E. A., Tezkebayeva M. S., Testov D. A., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Antalic S., Mosat P., Brionnet P., Gall B., Dorvaux O., Kessaci K., Sellam A., Lopez-Martens A., Hauschild K.* The SFiNx detector system // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2022. — Vol. 19, no. 1. — P. 37–45.
- A2. *Isaev A. V., Mukhin R. S., Andreev A. V., Bychkov M. A., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Devaraja H. M., Dorvaux O., Forge M., Gall B., Hauschild K., Izosimov I. N., Kessaci K., Kuznetsova A. A., Lopez-Martens A., Malyshev O. N., Popeko A. G., Popov Yu. A., Rahmatinejad A., Sailaubekov B., Shneidman T. M., Sokol E. A., Svirikhin A. I., Testov D. A., Tezkebayeva M. S., Yeregin A. V., Zamyatin N. I., Zhumadilov K. Sh.* Prompt neutron emission in the spontaneous fission of ^{246}Fm // *The European Physical Journal A*. — 2022. — Vol. 58, no. 6. — P. 108.
- A3. *Isaev A. V., Andreev A. V., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Izosimov I. N., Kuznetsova A. A., Malyshev O. N., Mukhin R. S., Popeko A. G., Popov Yu. A., Shneidman T. M., Sokol E. A., Svirikhin A. I., Tezkebayeva M. S., Yeregin A. V., Zamyatin N. I., Brionnet P., Dorvaux O., Gall B., Kessaci K., Sellam A., Hauschild K., Lopez-Martens A., Antalic S., Mosat P.* Comparative study of spontaneous-fission characteristics of ^{252}No and ^{254}No isotopes // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2021. — Vol. 18, no. 4. — P. 449–456.
- A4. *Mukhin R. S., Dushin V. N., Yeregin A. V., Izosimov I. N., Isaev A. V., Svirikhin A. I.* Reconstruction of spontaneous fission neutron multiplicity distribution spectra by the statistical regularization method // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2021. — Vol. 18, no. 4. — P. 439–444.
- A5. *Svirikhin A. I., Yeregin A. V., Izosimov I. N., Isaev A. V., Kuznetsov A. N., Malyshev O. N., Popeko A. G., Popov Yu. A., Sokol E. A., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Andel B., Asfari M. Z., Gall B., Yoshihiro N., Kalaninova Z., Mullins S., Piot J., Stefanova E., Tonev D.* Spontaneous fission of ^{256}Rf , new data // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2016. — Vol. 13, no. 4. — P. 480–482.
- A6. *Popeko A. G., Yeregin A. V., Malyshev O. N., Chepigin V. I., Isaev A. V., Popov Yu. A., Svirikhin A. I., Hauschild K., Lopez-Martens A., Rezyunkina K., Dorvaux O.* Separator for Heavy Element Spectroscopy – velocity filter SHELS // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. — 2016. — Vol. 376. — P. 140–143. — Proceedings of the

XVIIth International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2015), Grand Rapids, MI, U.S.A., 11-15 May 2015.

- A7. *Svirikhin A. I., Isaev A. V., Yeremin A. V., Kuznetsov A. N., Malyshev O. N., Popeko A. G., Sokol E. A., Chelnokov M. L., Chepigina V. I.* A detector for studying the characteristics of spontaneous fission of short-lived heavy nuclei // *Instruments and Experimental Techniques*. — 2011. — Vol. 54, no. 5. — P. 644–648.
- A8. *Isaev A. V., Yeremin A. V., Zamyatin N. I., Izosimov I. N., Kuznetsova A. A., Malyshev O. N., Mukhin R. S., Popeko A. G., Popov Yu. A., Sailaubekov B., Svirikhin A. I., Sokol E. A., Tezekbayeva M. S., Testov D. A., Chelnokov M. L., Chepigina V. I., Antalic S., Mosat P., Brionnet P., Gall B., Dorvaux O., Kessaci K., Sellam A., Lopez-Martens A., Hauschild K.* Study of spontaneous fission using the SFiNx system // *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement*. — 2021. — Vol. 14, no. 4. — P. 835–839.
- A9. *Isaev A. V., Yeremin A. V., Zamyatin N. I., Kuznetsov A. N., Malyshev O. N., Svirikhin A. I., Chelnokov M. L., Chepigina V. I., Hauschild K., Lopez-Martens A., Dorvaux O.* Application of a double-sided stripped Si detector in the focal plane of the VASILISSA separator // *Instruments and Experimental Techniques*. — 2011. — Vol. 54, no. 1. — P. 37–42.

Список литературы

1. *Петржак К. А., Флёров Г. Н.* Спонтанное деление урана // *ЖЭТФ*. — 1940. — Т. 10, № 9/10. — С. 1013–1017.
2. *Hahn O., Strassman F.* Verification of the creation of radioactive barium isotopes from uranium and thorium by neutron irradiation; Identification of additional radioactive fragments from uranium fission // *Naturwissenschaften*. — 1939. — Vol. 27. — P. 89–95.
3. *Yeremin A. V., Bogdanov D. D., Chepigina V. I., Gorshkov V. A., Kabachenko A. P., Malyshev O. N., Popeko A. G., Sagaidak R. N., Ter-Akopian G. M., Lavrentjev A. Yu.* The electrostatic separator VASILISSA Performance and experimental results // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. — 1997. — Vol. 126, no. 1. — P. 329–333. — International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to Their Applications.
4. Исходный код программы NeutronBarrel. — URL: <https://github.com/siberianisaev/NeutronBarrel>.

5. *Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V., Ivanova S. P., Kuklin S. N., Scheid W.* Ternary fission within statistical approach // *The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*. — 2006. — Vol. 30, no. 3. — P. 579–589.
6. *Schmidt K.-H., Jurado B., Amouroux C., Schmitt C.* General Description of Fission Observables: GEF Model Code // *Nuclear Data Sheets*. — 2016. — Vol. 131. — P. 107–221. — Special Issue on Nuclear Reaction Data.
7. *Venhardt M., Heßberger F. P., Ackermann D., Antalic S., Gray-Jones C., Greenlees P. T., Heinz S., Herzberg R.-D., Hofmann S., Ketelhut S., Kindler B., Kojouharov I., Leino M., Lommel B., Mann R., Papadakis P., Rostron D., Rudolph D., Šáro Š., Sulignano B.* Decay study of ^{246}Fm at SHIP // *The European Physical Journal A*. — 2011. — Vol. 47, no. 2. — P. 20.
8. *Svirikhin A. I., Dushin V. N., Chelnokov M. L., Chepigina V. I., Izosimov I. N., Katrasev D. E., Malyshev O. N., Minkova A., Popeko A. G., Sokol E. A., Yerebin A. V.* Neutron multiplicity at spontaneous fission of ^{246}Fm . // *The European Physical Journal A*. — 2010. — Vol. 44, no. 3. — P. 393–396.
9. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Lobanov Yu. V., Abdullin F. Sh., Polyakov A. N., Shirokovsky I. V., Tsyganov Yu. S., Mezentsev A. N., Iliev S., Subbotin V. G., Sukhov A. M., Subotic K., Ivanov O. V., Voinov A. N., Zagrebaev V. I., Moody K. J., Wild J. F., Stoyer N. J., Stoyer M. A., Loughheed R. W.* Measurements of cross sections for the fusion-evaporation reactions $^{204,206,207,208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ and $^{207}\text{Pb} + ^{34}\text{S}$: Decay properties of the even-even nuclides ^{238}Cf and ^{250}No // *Physical Review C*. — 2001. — Vol. 64, issue 5. — P. 054606.
10. *Bemis C. E., Ferguson R. L., Plasil F., Silva R. J., Pleasonton F., Hahn R. L.* Fragment-mass and kinetic-energy distributions from the spontaneous fission of ^{252}No // *Physical Review C*. — 1977. — Vol. 15, issue 2. — P. 705–712.
11. *Herzberg R.-D., Greenlees P. T., Butler P. A., Jones G. D., Venhardt M., Darby I. G., Eeckhaudt S., Eskola K., Grahn T., Gray-Jones C., Hessberger F. P., Jones P., Julin R., Juutinen S., Ketelhut S., Korten W., Leino M., Leppänen A.-P., Moon S., Nyman M., Page R. D., Pakarinen J., Pritchard A., Rahkila P., Sarén J., Scholey C., Steer A., Sun Y., Theisen Ch., Uusitalo J.* Nuclear isomers in superheavy elements as stepping stones towards the island of stability // *Nature*. — 2006. — Vol. 442, no. 7105. — P. 896–899.

12. *Heßberger F. P., Hofmann S., Ninov V., Armbruster P., Folger H., Münzenberg G., Schött H. J., Popeko A. G., Yeremin A. V., Andreyev A. N., Saro S.* Spontaneous fission and alpha-decay properties of neutron deficient isotopes $^{257-253}104$ and $^{258}106$ // *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*. — 1997. — Vol. 359, no. 4. — P. 415–425.
13. *Oganessian Yu. Ts., Demin A. G., Hussonnois M., Tretyakova S. P., Kharitonov Yu. P., Utyonkov V. K., Shirokovsky I. V., Constantinescu O., Bruchertseifer H., Korotkin Yu. S.* On the stability of the nuclei of element 108 with $A = 263 - 265$ // *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei*. — 1984. — Vol. A319. — P. 215–217.
14. *Lazarev Yu. A., Nefediev O. K., Oganessian Yu. Ts., Dakowski M.* Multiplicity of prompt neutrons from spontaneous fission of the isotope $^{252}102$ // *Physics Letters B*. — 1974. — Vol. 52, no. 3. — P. 321–324.
15. *Yeremin A. V., Belozero A. V., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Gorshkov V. A., Kabachenko A. P., Malyshev O. N., Popeko A. G., Sagaidak R. N., Shutov A. V., Sokol E. A., Svirikhin A. I.* Neutron detector at the focal plane of the set up VASSILISSA // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2005. — Vol. 539, no. 1. — P. 441–444.
16. Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR). — URL: <https://www.oecd-nea.org/janisweb/tree/RDD/EXFOR/NU>.
17. *Holden N. E., Zucker M. S.* Prompt neutron multiplicities for the transplutonium nuclides // *Radiation Effects*. — 1986. — Vol. 96, no. 1–4. — P. 289–292.
18. *Vorobyev A. S., Dushin V. N., Hamsch F.-J., Jakovlev V. A., Kalinin V. A., Laptev A. B., Petrov B. F., Shcherbakov O. A.* Distribution of prompt neutron emission probability for fission fragments in spontaneous fission of ^{252}Cf and $^{244,248}\text{Cm}$ // *AIP Conference Proceedings*. — 2005. — Vol. 769, no. 1. — P. 613–616.
19. *Wild J. F., van Aarle J., Westmeier W., Loughheed R. W., Hulet E. K., Moody K. J., Dougan R. J., Koop E.-A., Glaser R. E., Brandt R., Patzelt P.* Prompt neutron emission from the spontaneous fission of ^{260}Md // *Physical Review C*. — 1990. — Vol. 41, issue 2. — P. 640–646.
20. *Hulet E. K., Wild J. F., Dougan R. J., Loughheed R. W., Landrum J. H., Dougan A. D., Baisden P. A., Henderson C. M., Dupzyk R. J., Hahn R. L., Schädel M., Sümmerer K., Bethune G. R.* Spontaneous fission properties of ^{258}Fm , ^{259}Md , ^{260}Md , ^{258}No , and $^{260}104$: Bimodal fission // *Physical Review C*. — 1989. — Vol. 40, issue 2. — P. 770–784.

21. *Mosat P., Heßberger F. P., Antalic S., Ackermann D., Andel B., Block M., Hofmann S., Kalaninova Z., Kindler B., Laatiaoui M., Lommel B., Mistry A. K., Piot J., Vostinar M.* K isomerism in ^{255}Rf and total kinetic energy measurements for spontaneous fission of $^{255,256,258}\text{Rf}$ // *Physical Review C*. — 2020. — Vol. 101, issue 3. — P. 034310.
22. *Carjan N., Ivanyuk F. A., Oganessian Yu. Ts., Ter-Akopian G. M.* Fission of transactinide elements described in terms of generalized Cassinian ovals: Fragment mass and total kinetic energy distributions // *Nuclear Physics A*. — 2015. — Vol. 942. — P. 97–109.