

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи
УДК 539.173.7

Зейналов Шакир Самед оглы

**ИССЛЕДОВАНИЕ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ПРИ
СПОНТАННОМ ДЕЛЕНИИ ^{252}Cf И ПРИ ДЕЛЕНИИ ^{235}U
РЕЗОНАНСНЫМИ НЕЙТРОНАМИ**

Специальность 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Д у б н а - 2010 г.

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

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
Фурман Вальтер Ильич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Даниель Андрей Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор
Пятков Юрий Васильевич

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

Защита состоится «__» _____2010 года в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 720.001.06 при Лаборатории нейтронной физики и
Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований
(141980, г. Дубна Московской области)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан: «__» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.Г. Попеко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Деление ядер является сложным процессом перестройки ядерной материи, в результате которой образуется широкий спектр масс и кинетических энергий осколков деления (ОД). Характеристики указанных распределений ОД и распределения мгновенных нейтронов (МНД), испускаемых ОД, содержат в себе уникальную информацию о динамике движения ядерной материи и конфигурациях ядра в момент, непосредственно предшествующий его разрыву. Открытое более 70 лет назад деление до сих пор является объектом интенсивного исследования с чрезвычайно бурным развитием экспериментальных методов и углублением теоретических представлений. В последнее десятилетие, благодаря быстрому прогрессу в развитии цифровой электроники и измерительных средств цифровой обработки сигналов (ЦОС), значительно увеличилась информативность измерений. Это связано с тем, что в процессе измерений имеется возможность цифровой записи и хранения дискретных импульсов. Благодаря этому появилась уникальная возможность многократного воспроизведения экспериментов с изменением условий измерения и концентрацией исследований на тех или иных особенностях исследуемых процессов. Это позволило без дополнительных затрат существенно повысить эффективность исследований, многократно увеличив объемы получаемой информации. Другим не менее важным преимуществом использования цифровых технологий в экспериментальной физике стало упрощение процедуры настройки аппаратуры, которая теперь попросту сводится к выбору подходящей временной и амплитудной шкалы подобно тому, как это делается при наблюдении импульсов с помощью цифрового осциллографа.

В конце 1980х была предложена модель, объясняющая деление в рамках модели деления с введением предположения о случайном разрыве шейки, так называемая модель ММ-RNR (Multi-Modal Random Neck-Rupture). Модель позволяет с достаточно высокой точностью рассчитывать потенциальную энергию ядер от A_c до F_m в зависимости от деформации. Метод расчета основан на коррекции жидко-капельной модели (ЖКМ) с помощью эффектов спаривания и оболочечных поправок по методу В. Струтинского. Несмотря на то, что расчеты по модели ММ-RNR предполагают нулевую энергию возбуждения (ЭВ) ядра, на сегодняшний день эта модель является

наиболее последовательной из всех известных макро-микроскопических моделей деления ядер и достаточно хорошо описывает экспериментальные данные в области низких энергий возбуждения. Вычисление карты потенциальной энергии заданного делящегося ядра позволяет определить количество делительных мод и вероятности их реализации.

В настоящей работе путем усовершенствованного анализа кинематики испускания МНД в процессе деления было показано, что подавляющее большинство нейтронов испускается из полностью ускоренных ОД. Доля предразрывных нейтронов пренебрежимо мала, как это следует из анализа угловых распределений МНД в системе центра масс (СЦМ) ОД. Наш результат подтверждает аналогичный вывод, сделанный ранее в известной работе К. Будц-Йоргенсена и Г.-Г. Книттера, где он был получен впервые, хотя и с некоторыми методическими погрешностями. До этой работы кинематика реакции испускания МНД анализировалась посредством параметризации общих соотношений, содержащих зависимости интенсивности МНД от их скоростей, скоростей ОД и угловых координат в лабораторной системе отсчета и в СЦМ. В эти зависимости включались свободные параметры, подгоняемые по методу наименьших квадратов (МНК) для получения согласия с экспериментальными данными. Такой подход имел явные ограничения, так как в математическую модель исследуемого явления, как правило, закладывался ограниченный набор параметров, не всегда учитывавших все детали исследуемого явления.

В ряде экспериментов, проведенных недавно в IRMM, была обнаружена анизотропия углового распределения МНД в СЦМ движущегося ОД. Для проверки этих результатов нами были детально исследованы угловые распределения МНД при спонтанном делении $^{252}\text{Cf(sf)}$. Было показано, что обсуждаемая анизотропия исчезает в результате корректного учета двух факторов: вычитания вклада нейтронов, испущенных из сопряженного осколка и коррекции анизотропии испускания ОД, возникшей вследствие поглощения энергии ОД в мишени. Кроме этого, недавно были обнаружены существенные расхождения между теоретическими расчетами и экспериментом в зависимости множественности МНД от массы и ПКЭ осколков деления, опубликованной в работе К. Будц-Йоргенсена и Г.-Г. Книттера. Детальные исследования указанных расхождений, проведенные в данной работе, позволили обнаружить причины расхождений и устранить их.

Цель работы состоит в измерении МЭР осколков деления и исследование испускания МНД, в том числе их угловых и энергетических распределений, множественности МНД и ее зависимости от массы и полной кинетической энергии ОД при спонтанном и вызванном резонансными нейтронами делении для сравнения с результатами расчетов по современным теоретическим моделям.

В соответствии с целью работы поставлены следующие основные задачи:

1. Провести экспериментальные исследования МЭР и испускания МНД при делении ядер, вызванном резонансными нейтронами ^{235}U , и при спонтанном делении ^{252}Cf .
2. Провести анализ и обсуждение полученных результатов в рамках модели MM-RNR, а также сравнить экспериментальные результаты с расчетами по современным теоретическим моделям.
3. Разработать экспериментальную аппаратуру и программное обеспечение (ПО) сбора и накопления данных для реализации измерений МЭР ОД в корреляции с МНД с применением методов ЦОС.
4. Разработать и использовать алгоритмы ЦОС, реализующие обработку детекторных импульсов по стандартным правилам ядерной электроники.
5. Разработать и реализовать цифровой метод исключения наложений импульсов ОД с импульсами альфа-частиц при спектроскопии ОД с помощью двойной ионизационной камеры с сетками Фриша.
6. Разработать ПО сбора, накопления и анализа данных в реальном масштабе времени под управлением ОС Windows с использованием возможностей популярных программ анализа и визуализации графических данных типа ORIGIN компании Microcal.
7. Реализовать алгоритмы ЦОС в виде рекурсивных процедур удобных для программирования с помощью современных алгоритмических языков. Эти процедуры должны позволять обработку дискретных сигналов, эквивалентную аппаратным средствам, реализованным в аналоговых модулях ядерной электроники таких, как спектрометрические усилители, аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), дискриминаторы по форме импульса, дискриминаторы со следящим порогом и др.

Результаты, выносимые на защиту

1. Впервые были получены зависимости эмиссии МНД от массово-энергетических распределений ОД при спонтанном делении ^{252}Cf , которые хорошо согласуются с расчетами по современным теоретическим моделям. Скорректированы методические неточности, обнаруженные в известной работе К. Будц-Йоргенсена и Г.-Г. Книттера.
2. Впервые был обнаружен и исследован эффект имитации анизотропии испускания ОД в лабораторной системе отсчета, связанный с поглощением энергии ОД в мишени. Обнаруженный эффект позволил объяснить наблюдение анизотропии испускания МНД в СЦМ движущегося ОД в экспериментах по исследованию угловых распределений МНД в реакции деления ядра ^{235}U резонансными нейтронами.
3. Впервые измерение угловых распределений МНД при спонтанном делении ^{252}Cf было проведено с помощью оригинального метода учета вклада нейтронов, испущенных одним ОД, в измеряемую множественность мгновенных нейтронов другого осколка деления. В результате было показано, что избыток МНД при углах между осью деления и нейтронами близких к 90° в системе отсчета исследуемого ОД, исчезает при вычитании вклада МНД, испущенных сопряженным ОД.
4. Измеренное угловое распределение МНД реакции $^{252}\text{Cf}(sf)$ с учетом указанных выше эффектов продемонстрировало, что не менее 99% нейтронов испускается изотропно в СЦМ движущегося ОД. Это снизило порог обнаружения предразрывных нейтронов до уровня не более 1%.
5. Эксперименты были проведены с помощью разработанной в диссертации аппаратуры и ПО сбора и накопления данных для реализации измерений МЭР ОД в корреляции с МНД. Кроме этого, были разработаны и реализованы алгоритмы ЦОС, осуществлявшие обработку импульсов по стандартным правилам ядерной электроники. Разработан и реализован цифровой метод исключения наложений импульсов ОД с импульсами альфа-частиц при спектроскопии ОД с помощью двойной ионизационной камеры с сетками Фриша.

6. Разработанная в работе методика определения угла между осью деления и нормалью к плоскости катода в ДИК с сетками Фриша с помощью измерения времени дрейфа «центра тяжести» ионизационного заряда, образованного в процессе торможения ОД в рабочем газе камеры, позволила повысить разрешение по энергии и массе ОД.
7. Разработанные методы и алгоритмы для разделения МНД и гамма-лучей по форме импульса позволяли проводить автоматическое вычитание фона при регистрации нейтронов с помощью сцинтилляционного детектора на базе жидкости NE213. Разработан метод и алгоритмы восстановления энергетических спектров МНД методом регуляризации по времяпролетным спектрам, пригодные для приложения к единичным событиям деления.

Научная новизна

Разработанные в диссертации экспериментальные методы исследования корреляций испускания МНД с массово-энергетическими характеристиками ОД лишены систематических погрешностей, приводивших ранее к противоречиям между экспериментальными данными и теоретическими расчетами. Разработанные в работе алгоритмы и методы ЦОС представляют собой практическую базу для широкого применения аппаратуры и методов ЦОС в экспериментальной ядерной физике. На их основе получены следующие новые результаты:

- измерена зависимость среднего числа МНД от массы ОД в реакции $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ и получено лучшее, чем в более ранних работах, согласие с расчетами по модифицированной Лос-Аламосской модели;
- измерено угловое распределение МНД реакции $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ в СЦМ осколка деления и МНД, показано, что не менее 99% МНД испускается изотропно;
- получены новые данные о зависимости среднего числа МНД от полной кинетической энергии ОД, лишенные методических погрешностей, обнаруженных в известной работе Будц-Йоргенсена и Книттера. Было показано, что указанная зависимость является линейной, как того требовала теория;
- разработана цифровая методика определения угла между направлением движения ОД и нормалью к плоскости катода двойной ионизационной камеры (ДИК) с сетками Фриша, позволившая улучшить массовое разрешение ОД;

- разработан метод и алгоритмы восстановления энергетических спектров МНД методом регуляризации по времяпролетным спектрам;
- создана эффективная процедура вычитания фона нейтронов, испущенных сопряженным ОД из распределения среднего числа МНД исследуемого ОД;
- разработаны новые методы обработки, алгоритмы и ПО, которые были использованы для анализа экспериментальных данных с целью получения МЭР осколков деления ^{235}U , вызванного резонансными нейтронами на импульсном источнике ИБР-30+ЛУЭ-40. На лучшем статистическом уровне были подтверждены результаты более ранних исследований на спектрометре GELINA. Вместе с тем, полученные в Дубне результаты составили методическую базу для расширения исследований на установке GELINA, проведенных в 2005-2009 г с целью измерения МЭР осколков деления в корреляции с МНД.

Практическая ценность работы

Впервые получены данные о распределении среднего числа МНД в зависимости от массы и ПКЭ осколков деления, согласующиеся с теоретическими расчетами. В результате этого удалось преодолеть противоречие, связанное с дефицитом среднего числа МНД с уменьшением ПКЭ осколков деления, имевшим место в более ранних работах.

Впервые проведены исследования испускания МНД при делении ^{235}U резонансными нейтронами с разложением МЭР осколков деления по делительным модам У. Брозы.

Впервые были обнаружены эффекты, имитирующие анизотропию испускания МНД в системе отсчета движущегося ОД. Было показано, что эти эффекты связаны с поглощением части энергии осколков в мишени и фоном нейтронов от сопряженного ОД.

Установленный верхний предел доли предразрывных нейтронов в спонтанном делении $^{252}\text{Cf(sf)}$, является важным ограничением для выяснения природы угловых корреляций МНД и ОД, интенсивно изучаемых в последнее время в экспериментах с поляризованными нейтронами.

Созданы новые подходы к построению систем измерений, основанных на дискретизации детекторных импульсов и их последующей обработке с применением техники ЦОС.

Разработаны программные комплексы сбора и накопления данных с помощью аппаратуры дискретизации детекторных импульсов, ориентированные на ПК и операционную систему Windows.

Разработан программный комплекс, который позволял извлечение информации о МЭР осколков деления из экспериментальных данных, полученных с помощью двойной ионизационной камеры с сетками Фриша.

Апробация работы

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 статьях.

Результаты, представленные в работе, докладывались на семинарах в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова и в отделе нейтронной ядерной физики Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, а также на международных и российских конференциях и семинарах:

1. VI International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-VI), Dubna, 1998, Russia.
2. VII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-VII), Dubna, 1999, Russia.
3. XIII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-XIII), Dubna, 2005, Russia.
4. The 2nd International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications (CITSA), Florida, 2005, USA.
5. На 58 Международном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра 2008 (ЯДРО-2008), Москва, 2008, Россия.
6. На 59 Международном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (ЯДРО-2009), 2009, Чебоксары, Россия.
7. Scientific Workshop on Neutron Measurements, Theory & Applications (EFNUDAT), Geel, 2009, Belgium.
8. 4th International Workshop on Nuclear Fission and Fission Product Spectroscopy (Fission 2009), Cadarache, 2009, France.

9. 1st International Conference on Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS-09), Sozopol, 2009, Bulgaria.

Личный вклад автора

Автором были получены самостоятельно большинство основных результатов диссертации, проведена большая часть аналитической и экспериментальной работы, разработаны большие комплексы ПО: сбора и накопления данных, алгоритмов ЦОС, программный комплекс для анализа данных с мульти-детекторной системы измерений, включающей двойную ионизационную камеру с сетками Фриша и 8 нейтронных детекторов с жидким сцинтиллятором NE213. Автор лично представлял результаты работы на международных конференциях с устными и стендовыми докладами.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения с выводами и списка цитируемых работ из 82 наименований. Работа содержит 112 страниц, включая 60 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна и практическая ценность. Рассмотрены новые тенденции и перспективы экспериментальных исследований в связи с современными достижениями цифровой электроники и методов цифровой обработки сигналов.

В первой главе приведен обзор современного состояния ядерной физики по теме диссертации, посвященный обзору развития представлений о ядре в рамках жидко-капельной модели. Рассмотрена картина деления ядер в рамках модели мульти-модального деления ядер со случайным разрывом шейки (MM-RNR). Деление ядер в этой модели является следствием коллективного движения нуклонов, которое может рассматриваться как деформация поверхности ядерной жидкости, состоящей из нуклонов, между которыми действуют кулоновские и ядерные силы. Оболочечные эффекты создают

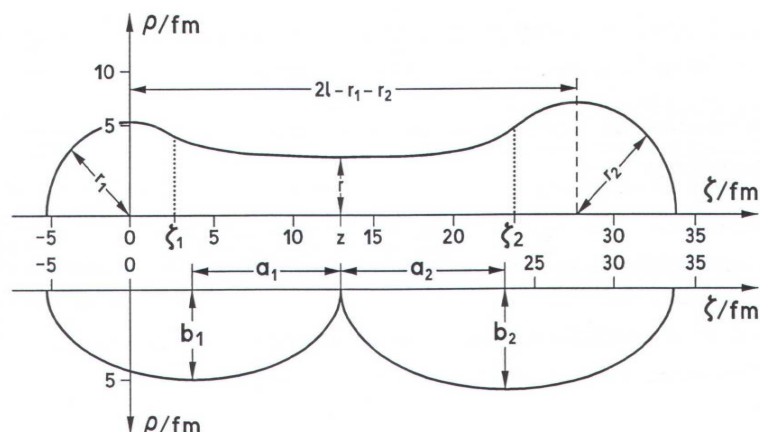


Рисунок 1. Параметризация конфигурации ядра непосредственно перед разрывом (верхняя часть рисунка) и сразу после разрыва шейки (нижняя часть рисунка) в модели MM-RNR.

условия более предпочтительные для ассиметричных конфигураций, которые представляются заряженными сфероидом (Рис. 1), связанными между собой шейкой. Разрыв шейки приводит к преобразованию кулоновской энергии в кинетическую энергию ОД, величина которой зависит от расстояния между сфероидом. Мгновенные нейтроны деления испускаются ОД с энергией возбуждения, большей энергии связи нейтрона. Большинство нейтронов испускается после полного ускорения ОД, поэтому их угловое распределение имеет ярко выраженную ассиметрию в лабораторной системе отсчета. Однако, теория допускает испускание небольшой части МНД непосредственно перед разрывом компаунд системы или в процессе ускорения ОД.

Современные экспериментальные данные о предразрывных (**scission**) нейтронах до сих пор противоречивы, а так как распределения МНД (по энергии и множественности) имеют большое значение как для понимания фундаментальных закономерностей процесса деления, так и для ядерной энергетики, то их исследования весьма актуальны до сих пор. Наиболее исчерпывающую информацию об испускании и свойствах МНД можно получить в экспериментах, где кинетическая энергия и угол испускания нейтронов по отношению к оси деления (линия разлета ОД) измеряется вместе с массово-энергетическими распределениями ОД.

Экспериментальные данные могут интерпретироваться в терминах N мод деления, полученных из расчетов. Для этого необходимо измеренные двухмерные массово-энергетические распределения (МЭР) $Y(A, TKE)$ разложить по модам деления:

$$Y(A, TKE) = \sum_{i=1}^N Y_i(A) Y_i(TKE | A) \quad (1),$$

в разложении (1) функция массового распределения $Y_i(A)$ для каждой моды i предполагается гауссианом:

$$Y_i(A) = \frac{w_i}{\sqrt{2\pi\sigma_{A,i}^2}} \exp\left(-\frac{(A - \bar{A})^2}{2\sigma_{A,i}^2}\right) \quad (2),$$

где w_i - измеренная вероятность реализации делительной моды i . Условное распределение полной кинетической энергии (ПКЭ) ОД в зависимости от массы A определяется с помощью следующего соотношения:

$$Y_i(TKE | A) = \left(\frac{200}{TKE}\right)^2 h_i \exp\left(\frac{2(d_{\max,i} - d_{\min,i})}{d_{dec,i}} - \frac{L}{d_{dec,i}} - \frac{(d_{\max,i} - d_{\min,i})^2}{Ld_{dec,i}}\right) \quad (3),$$

где $L = d - d_{\min}$. Среднее расстояние d между центрами зарядового распределения ОД может быть вычислено как кулоновское отталкивание этих ОД:

$$d = \frac{z_l z_h e^2}{TKE} \quad (4),$$

где z_l, z_h - заряды легкого и тяжелого осколков соответственно, e - элементарный заряд, d_{\max} - расстояние между центрами заряда ОД при максимуме МР; d_{\min} - минимальное расстояние между центрами заряда, соответствующее максимальному значению TKE ; d_{dec} - параметр, определяющий экспоненциальное уменьшение выхода ОД с одновременным увеличением расстояния d и h_n - аппроксимирует высоту гауссиана, так как $TKE \sim 200$ МэВ - это энергия равная разности масс делящегося ядра и суммы масс ОД, которая примерно одинакова для всех актинидов.

Наиболее детальную информацию о числе МНД дает измерение числа нейтронов, испущенных ОД с массовым числом равным A и с ПКЭ равной TKE - $\bar{V}(A, TKE)$. Последняя функция позволяет получить усредненные характеристики по A или TKE путем ее интегрирования по соответствующей переменной, если известна функция МЭР ОД - $Y(A, TKE)$, например:

$$\bar{\nu}(A) = \frac{\int_0^{\infty} \nu(A, TKE) Y(A, TKE) dTKE}{\int_0^{\infty} Y(A, TKE) dTKE}, \quad (5).$$

$$\bar{\nu} = \int_0^{\infty} \bar{\nu}(A, TKE) Y(A, TKE) dTKE dA, \quad 200 = \int_0^{\infty} Y(A, TKE) dTKE dA$$

Функция $Y(A, TKE)$ является производящей для функции среднего числа МНД - $\bar{\nu}(A, TKE)$. Это следствие того, что функция $Y(A, TKE)$ есть «фотоснимок» предразрывных конфигураций, развитием которых сопровождается испускание нейтронов индивидуальными ОД. Поэтому определенные детали предразрывных конфигураций могут быть исследованы с помощью зависимости среднего числа МНД от массы и ПКЭ. Наиболее важным свойством функции $\bar{\nu}(A)$ является ее пилообразная форма, которая есть прямое следствие случайности разрыва шейки делящейся системы. Исследование свойств функции $\bar{\nu}(TKE)$ позволяет интерпретировать конфигурацию делящегося ядра (в момент, непосредственно предшествующий делению), как состоящую из двух «твердых» остовов будущих ОД и относительно «мягкой» шейки, эластичность которой определяется производной $\frac{d\bar{\nu}(TKE)}{dTKE}$. Экспериментальные исследования $\bar{\nu}(A, TKE)$, таким образом, предоставляют ценную информацию о детальной картине формирования ОД. Помимо этого, уточнение данных о среднем числе МНД для важнейших в ядерной энергетике ядер ^{235}U и ^{239}Pu представляет особый интерес. Исследование энергетических распределений МНД позволяет получать информацию об энергии возбуждения ОД и через нее данные о распределении плотности уровней возбужденных осколков для сравнения с предсказаниями теории.

Рассмотрена модель испускания МНД в рамках ММ-RNR и методы экспериментального исследования распределений числа МНД в зависимости от массы и ПКЭ осколков деления. Кратко рассмотрены вопросы, посвященные квантовым аспектам деления ядер, наиболее ярко проявляемым в делении резонансными нейтронами.

Вторая глава посвящена экспериментальным средствам и методам, использованным в диссертации. Рассмотрены основные детали конструкции и способы

применения в экспериментах двойной ионизационной камеры с сетками Фриша в комбинации с детекторами быстрых нейтронов на базе жидкого сцинтиллятора NE213. Подробно описана работа электронной аппаратуры, предназначенной для дискретизации импульсных сигналов. Описана структура разработанного автором программного обеспечения (ПО) сбора, накопления, цифровой обработки сигналов и анализа экспериментальных данных. ПО представляло собой многоступенчатую процедуру калибровки и анализа многомерных массивов экспериментальных данных. Результаты работы ПО выводились в виде одно- и много-мерных гистограмм, представлявших МЭР осколков деления и распределения МНД деления. В процессе обработки данных широко применялась программа ORIGIN, ориентированная на обработку многомерных данных с графической визуализацией и подгонку калибровочных параметров с помощью МНК.

В диссертации подробно рассмотрена новая методика определения углов вылета ОД из мишени и коррекция кинетической энергии ОД из-за потерь в мишени, основанная на использовании методов ЦОС. В работе также приведен анализ свойств аппаратуры дискретизации импульсов, необходимый для корректной организации спектрометрических измерений. На примере исследования МЭР в реакции $^{252}\text{Cf(sf)}$ (рис. 2) было продемонстрировано более высокое качество полученных результатов по сравнению с литературными данными. Разработан новый подход к определению энергии МНД по времяпролетным распределениям, основанный на восстановлении времяпролетных распределений с учетом зависимости функции отклика от амплитуды сигнала детектора нейтронов с одновременным преобразованием результатов в энергию МНД.

В третьей главе представлены результаты анализа экспериментальных данных о флуктуациях кинетической энергии ОД и о вариациях делительных мод в реакции $^{235}\text{U}(n,f)$ в резонансной области. Произведено сравнение результатов с пионерской работой Ф.-Й. Хамбша и др., показавшее очень хорошее согласие (рис. 3).

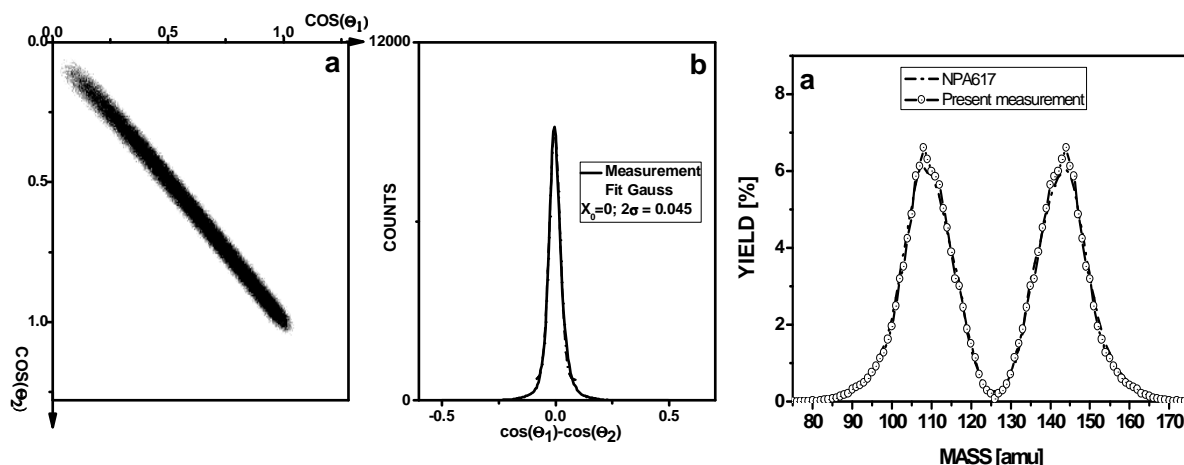


Рисунок 2. Распределение ОД $N_{FF}(\cos(\Theta_1), \cos(\Theta_2))$, иллюстрирующее качество определения угла Θ (слева). На среднем графике показано распределение разностей косинусов углов, определенных для коррелированных ОД в разных половинах ДИК. На правом графике показано массовое распределение ОД в сравнении с литературными данными

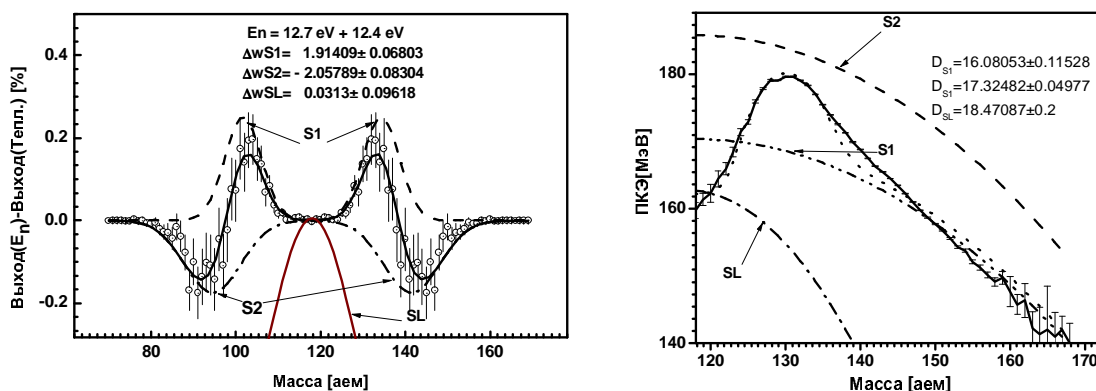


Рисунок 3. Разность между выходами массовых распределений при резонансной и тепловой энергии нейтронов вместе с разложением по делительным модам (левый график). На правом графике представлено разложение зависимости полной кинетической энергии ОД при тепловой энергии нейтронов по делительным модам.

В четвертой главе представлено обсуждение результатов исследований МЭР осколков деления вместе с измерением выхода МНД в зависимости от энергий резонансных нейтронов, полученные в экспериментах, проведенных в группе доктора Ф.-Й. Хамбша

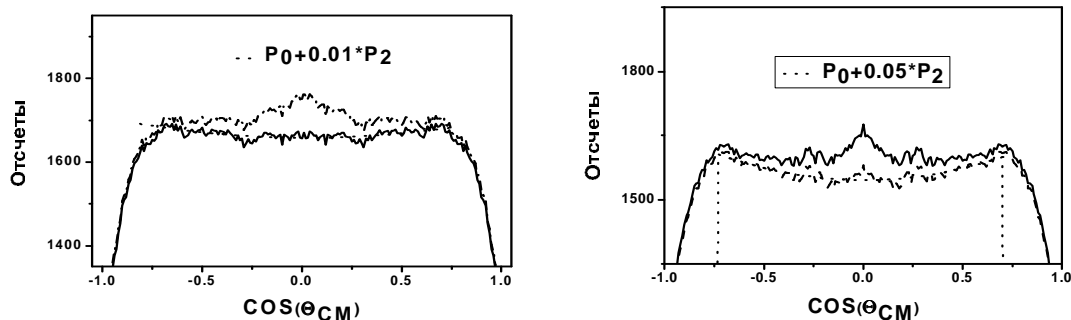


Рисунок 4 Результаты измерения угловых распределений МНД в СЦМ для иллюстрации эффекта имитации анизотропии. На левом графике представлено угловое распределение МНД, где для вычисления косинуса угла в СЦМ использовалось значение косинуса в Л-системе, измеренное в половине камеры, расположенной со стороны мишенного слоя. На правом графике представлено аналогичное распределение, когда значения косинуса в Л-системе были определены в камере, расположенной со стороны подложки. Сплошными линиями на обоих графиках изображены угловые распределения с вкладом нейтронов, испущенных сопряженным ОД.

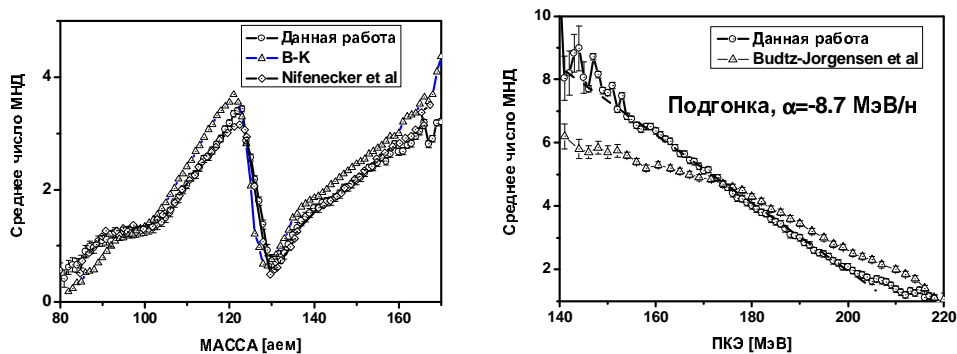


Рисунок 5. Результаты измерения зависимости средней множественности МНД от массы (левый график) и от ПКЭ (правый график) в сравнении с литературными данными. Правый график демонстрирует значительное отличие от работы К. Будц-Йоргенсена и Г.-Г. Книттера, но имеет очень хорошее согласие с современными теоретическими расчетами. Последний факт разрешает противоречие между экспериментом и теорией.

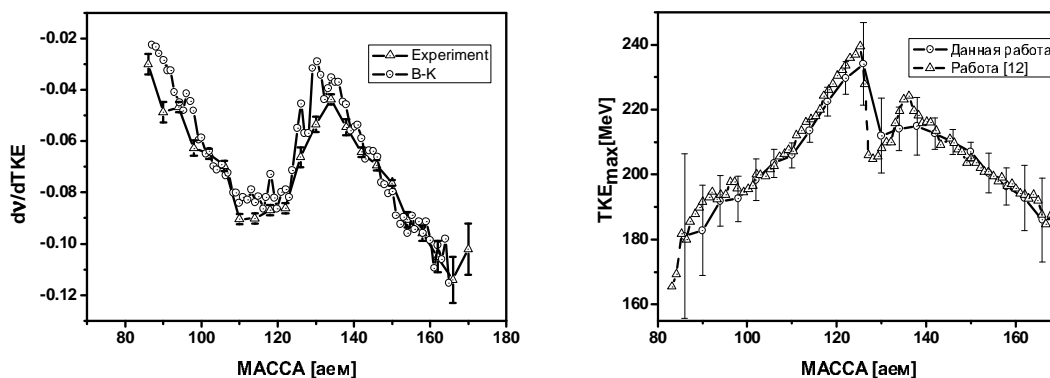


Рисунок 6. Зависимость эластичности предразрывной конфигурации ядра $\frac{dv}{dTKE}$ (производная среднего числа МНД по ПКЭ) от массы ОД (левый график). Зависимость ПКЭ, при которой прекращается эмиссия нейтронов, от массы ОД в сравнении с литературными данными (правый график).

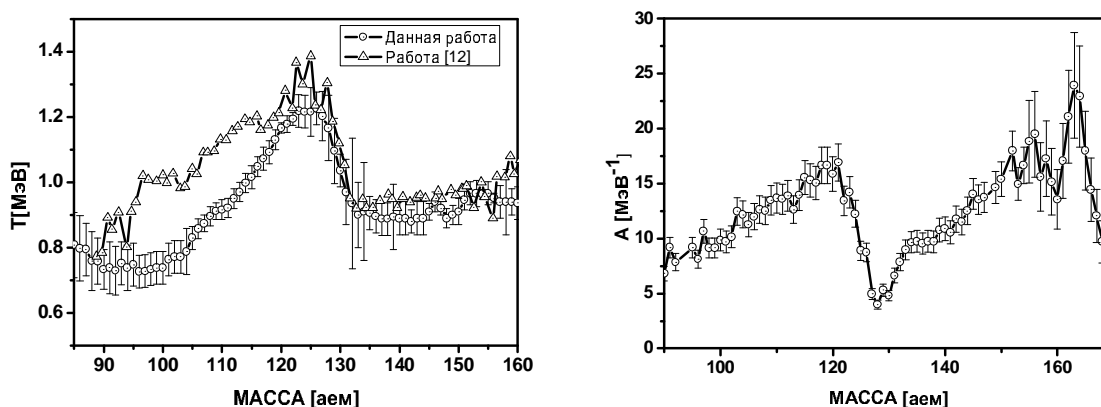


Рисунок 7. Зависимость средней ядерной температуры (левый график) и параметра плотности уровней по модели Ферми-газа (правый график) от массового числа ОД на источнике GELINA в Бельгии. Вариации множественности МНД между резонансами находились в пределах статистической точности измерений. Однако, попытка анализа угловых распределений МНД (независимо от энергии налетающих нейтронов) в СЦМ ОД привела к неожиданно высокой анизотропии испускания нейтронов. В этой связи были проведены более детальные исследования угловых распределений МНД в реакции $^{252}\text{Cf}(sf)$. В результате, были получены экспериментальные данные, свидетельствующие в том, что возникновение указанной анизотропии происходило за счет потерь энергии ОД в подложке мишени и фона нейтронов от сопряженного ОД. Таким образом, было продемонстрировано, что 99% МНД испускается из полностью ускоренных ОД

В **Приложении А.1** представлено минимальное введение в теорию дискретизации сигналов Шеннона, которое необходимо для понимания цифровой реализации модулей ядерной электроники с использованием ЦОС. Выведены основные формулы преобразования сигналов из непрерывной формы в дискретную, которые были использованы в данной работе

В **Приложении А.2** Представлен пример применения теории Шеннона к синтезу квази-гауссовского фильтра, использованного в спектроскопических измерениях МЭР ОД. На этом примере также в обобщенном виде было показано, как можно синтезировать произвольный фильтр с использованием его аналитического представления в частотной или временной области. На примере исследования выхода запаздывающих нейтронов при делении, вызванным тепловыми нейтронами, показана реализация корреляционного фильтра.

В **Приложении А.3** Рассмотрен алгоритм выработки временной метки, положение которой не зависит от амплитуды импульса (дискриминатор со следящим порогом). Такой алгоритм использовался при измерениях скорости МНД по времени пролета. Рассмотрены вычислительные аспекты определения времени пролета и различные интерполяционные формулы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. В настоящей работе реализованы измерения массово-энергетических распределений (МЭР) ОД, в которых были исправлены методические погрешности, обнаруженные в известной работе К. Будц-Йоргенсена и Г.-Г. Книттера. В результате удалось получить зависимость среднего числа МНД от массы, хорошо согласующуюся с современными теоретическими расчетами.
2. Впервые был обнаружен и всесторонне исследован эффект имитации анизотропии испускания ОД в лабораторной системе отсчета, связанный с поглощением энергии ОД в мишени. Обнаруженный эффект позволил объяснить наблюдение анизотропии испускания МНД в системе отсчета ОД в экспериментах по исследованию угловых распределений МНД в реакции $^{235}\text{U}(n,f)$.
3. Впервые применен новый метод учета нейтронов, испущенных одним ОД, в измеряемую множественность мгновенных нейтронов другого ОД. В результате было показано, что избыток МНД при углах между осью деления и нейтронами близких к

90° в системе отсчета исследуемого ОД, исчезает при вычитании вклада МНД, испущенных сопряженным ОД.

4. Измерено угловое распределение МНД реакции $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ в системе отсчета, связанной с движущимся ОД с учетом указанных выше эффектов и было показано, что не менее 99% нейтронов испускается изотропно в указанной системе отсчета. Это снизило предел существования предразрывных нейтронов до уровня не более 1%.

5. Измерена зависимость среднего числа МНД реакции $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ от полной кинетической энергии ОД. Впервые получено хорошее согласие экспериментальных данных с современными теоретическими расчетами. Тем самым была решена проблема дефицита МНД при снижении полной кинетической энергии ОД.

6. Эксперименты были проведены с помощью разработанной в диссертации аппаратуры и программного обеспечения (ПО) сбора и накопления данных для реализации измерений МЭР ОД в корреляции с МНД и с применением ЦОС. Кроме этого, были разработаны и реализованы алгоритмы ЦОС, осуществляющие обработку импульсов по стандартным правилам ядерной электроники. Разработан и реализован цифровой метод исключения наложений импульсов ОД с импульсами альфа-частиц при спектроскопии ОД с помощью двойной ионизационной камеры с сетками Фриша.

7. Разработана методика определения угла между осью деления и нормалью к плоскости катода в ДИК с сетками Фриша с помощью измерения времени дрейфа «центра тяжести» ионизационного заряда, образованного в процессе торможения ОД в рабочем газе камеры, позволившая получить высокое разрешение по энергии и массе ОД с помощью ионизационных камер.

8. Разработаны методы и алгоритмы для разделения МНД и гамма-лучей по форме импульса, которые позволяли автоматическое вычитание фона при регистрации нейтронов с помощью сцинтилляционного детектора на базе жидкости NE213. Разработаны метод и алгоритмы восстановления энергетических спектров МНД методом регуляризации по времяпролетным спектрам, пригодные для приложения к единичным событиям деления.

Список публикаций по теме диссертации

1. Sokol E.A., Ter-Akopian G.M, Šaro S., Zeinalov Sh.S., Ivanov M.P., Flerov G.N., On the experimental possibilities of detecting multiple neutrons in massive samples // Nucl. Instrum. Methods B: Beam Interactions with Materials and Atoms – 1986. –Vol. 17, No 5-6. -P. 460-461.
2. E.A.Sokol, Sh.S.Zeinalov, S. Šaro, M.Hussonnais, H.Brucherseifer, G.V.Boukhanov, M.P.Ivanov, Yu.S.Korotkin, V.I.Smirnov, L.P.Chelnokov, G.M.Ter-Akopian, G.N.Flerov, Preliminary Results on the Study of ^{259}Md Spontaneous Fission Parameters // JINR Rapid Communications -1986. -Vol. 19-86. -P. 45-49.
3. E.A.Sokol, Sh.S.Zeinalov, G.M.Ter-Akopian, Multiplicity of fast neutrons in the spontaneous fission of ^{256}Fm // Atomnaya Energiya – 1989. -Vol. 67, No 5. -P. 357-358.
4. A. Andreev, D. Bogdanov, V. Chepigin, V. Gorshkov, K. Michailov, A. Kabachenko, G. Popeko, S. Saro, G. Ter-Akopian, A. Yeremin, Sh. Zeinalov, 4- π ionization chamber-a detector for a kinematic separator of heavy ion reaction products // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment - 1993. - Vol. 330. -P. 209-220.
5. Sh. Zeinalov, W. Furman and F.-J. Hamsch, Investigation of mass-TKE distributions of fission fragments from $^{235}\text{U}(n,f)$ reaction in resonances Hamsch // XIII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei – Dubna: JINR, -2006. - E3-2006-7. P. 351–359.
6. O.V. Zeynalova, Sh.S. Zeynalov, F.-J. Hamsch, S. Oberstedt, Application of Digital Signal Processing in Nuclear Spectroscopy // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics – 2009. –Vol. 73, No. 4. -P. 506–511.
7. Зейналова О., Зейналов Ш., Хамбш Ф.-Й., Оберстедт, Приложение методов цифровой обработки сигналов к ядерной спектроскопии // Известия РАН: Серия физическая -2009. -Т. 73, № 4. С. 533-539
8. Sh. Zeynalov, F.-J. Hamsch, S. Oberstedt, and I. Fabry, Neutron emission in fission of $^{252}\text{Cf}(sf)$ // 4th International Workshop on Nuclear Fission and Fission Product Spectroscopy, CEA Cadarache, France - AIP Conference Proceedings, 2009. –Vol. 1175. -P. 359-362.
9. O. Zeynalova, Sh. Zeynalov, F.-J. Hamsch, S. Oberstedt, and I. Fabry, DSP Algorithms

for Fission Fragment and Prompt Fission Neutron Spectroscopy // 1st International Conference on Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Sozopol, Bulgaria - AIP Conference Proceedings, 2009. -Vol. 1186. -P. 430-439.

10. Sh. S. Zeynalov, O.V. Zeynalova, V.I. Smirnov, Delayed Neutron Yield Measurement on Thermal Neutron Induced Fission of ^{237}Np using Cross-correlation Technique // Nuclear Physics and Atomic Energy, Institute for Nuclear Research of NAS Ukraine, 2006-2009. - Vol. 10, No 1. -P. 100-104.