



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

15-2008-190

На правах рукописи

УДК 539.173.7

ДАНИЭЛЬ

Андрей Владимирович

МЕТОД МНОЖЕСТВЕННЫХ МГНОВЕННЫХ ГАММА КВАНТОВ
В ИССЛЕДОВАНИИ СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

14 МАЙ 2009

Дубна – 2008

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Гангрский Юрий Петрович

доктор физико-математических наук, профессор
Оглоблин Алексей Алексеевич

доктор физико-математических наук, профессор
Петров Геннадий Александрович

Ведущая организация: Московский инженерно-физический институт
(Государственный университет)

Защита состоится "19" июня, 15:00 2009 года
на заседании диссертационного совета Д 720.001.06 в Объединенном институ-
те ядерных исследований (г. Дубна Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "24" апреля 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Полеко А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель работы

Практическая реализация нового подхода к исследованию деления атомных ядер, основанного на измерении множественных мгновенных гамма квантов, испускаемых парными осколками деления.

Разработка алгоритмов и реализация их в виде комплекса программ, обеспечивающего все этапы обработки экспериментальных данных, от формирования двумерных и трехмерных массивов данных гамма совпадений, до оценки интенсивности двумерных гамма пиков.

Получение качественно новых характеристик спонтанного деления ^{252}Cf : независимых выходов пар осколков и распределения множественности нейтронов для различных зарядовых разделений.

Создание модели для определения характеристик первичных осколков деления на основе получаемых данных о выходах пар осколков.

Расширение возможностей рассматриваемого подхода с целью исследования тройного деления ^{252}Cf , путем дополнительного измерения кинематических характеристик легких заряженных частиц.

Научная новизна работы

Разработан новый подход к исследованию спонтанного и низкоэнергетического деления атомных ядер, основанный на измерении множественных мгновенных гамма квантов, испускаемых парными осколками деления.

Создана новая методика оценки интенсивности двумерных пиков в двумерном массиве гамма-гамма совпадений.

Впервые получены независимые выходы 135 пар осколков и распределения множественности нейтронов для пяти зарядовых разделений ^{252}Cf .

Создана модель, позволяющая оценивать характеристики первичных осколков деления: их массовое распределение для фиксированных зарядовых разделений делящегося ядра и распределение их энергии возбуждения. Для трех зарядовых разделений ^{252}Cf получены характеристики первичных осколков, позволяющие удовлетворительно описать наши экспериментальные данные. Высказана гипотеза о существовании второй «горячей» моды при *Ва-Мо* разделении ^{252}Cf .

Впервые измерено угловое распределение гамма квантов испускаемых ядром ^{10}Be , образующегося в тройном делении ^{252}Cf , относительно направления движения ядра ^{10}Be .

Впервые получена вероятность заселения первого возбужденного уровня ядра ^{10}Be для тройного деления ^{252}Cf .

Впервые получены независимые выходы 58 пар осколков для четырех зарядовых разделений ^{252}Cf в тройном делении, сопровождаемом вылетом ядер *He*.

Практическая ценность работы

Полученные новые данные о независимых выходах пар осколков, распределениях по множественности нейтронов, полученная оценка температуры системы в области шейки делящегося ^{252}Cf имеют значение для дальнейших работ по исследованию динамики спонтанного деления.

Разработанный подход к исследованию деления атомных ядер может быть успешно применен к получению новых данных о вынужденном делении тепловыми нейтронами ядер, входящих в ядерный топливный цикл. В частности, обнаружение парных осколков с определенными зарядами позволяет обнаружить наличие плутония в топливе. Наличие достаточной информации о выходах пар осколков для урана и плутония позволит делать оценку концентрации плутония в топливе, и позволяет обсуждать оценку его изотопного состава.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод измерения интенсивностей двумерных пиков в двумерном массиве данных гамма – гамма совпадений.
2. Данные о независимых выходах 135 пар осколков спонтанного деления ^{252}Cf .
3. Распределения множественности нейтронов для пяти зарядовых разделений ^{252}Cf .
4. Алгоритм оценки характеристик первичных осколков деления.
5. Параметры распределений энергий возбуждения первичных осколков.
6. Вероятность заселения первого возбужденного уровня ^{10}Be , образующегося при тройном делении ^{252}Cf .
7. Угловое распределение гамма квантов, испущенных ядрами ^{10}Be при тройном делении.
8. Данные о независимых выходах 58 пар осколков для тройного деления ^{252}Cf , сопровождаемого вылетом ядер He .
9. Доказательство отсутствия образования тройной ядерной системы из ядра ^{10}Be и двух осколков, при условии, что ускоренные ядра Be имеют кинетическую энергию выше 21 МэВ.

Апробация работы

Различные составные части работы докладывались на Meeting of the American Physical Society (1993, 1998); NATO Advanced Study Institute on Frontier Topics in Nuclear Physics, (New York, USA, 1994, Kemer, Turkey, 2004); Low Energy Nuclear Dynamics, EPS XV Nuclear Physics Divisional Conference, St. Petersburg, 1995; International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM 95), Arles, France, 1995; Workshop on Gammasphere Physics, Berkeley, USA, 1996; Third International Conference on Dynamical As-

pects of Nuclear Fission, Dubna, 1996; Tours symposium on nuclear physics III, Tours, France, 1997; International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, 1997; International School on Nuclear Physics, Erice, Italy, 1997; International Symposium on Large-Scale Collective Motion of Atomic Nuclei, Brolo, Italy, 1997; Fourteenth International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, Denton, USA, 1997; International conference on fission and properties of neutron-rich nuclei, Sanibel Island, USA, (1997, 2002); International Conference on Nuclear Physics at the Turn of the Millennium: Structure of Vacuum and Elementary Matter, Wilderness, South Africa, 1997; International Workshop on the New Applications of Nuclear Fission, Bucharest, Romania, 2003; International Conference "Nuclear Structure and Related Topics", Dubna, 2004; International Symposium On Exotic Nuclei, Peterhof, 2004; International Conference "Dynamical Aspects of Nuclear Fission", Smolenice Castle, Slovak Republic, 2006.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 147 страниц, в том числе, 40 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 174 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и научная новизна работы, приведен список положений, выносимых на защиту. Приведено краткое изложение основного содержания глав диссертации.

В первой главе рассмотрены особенности метода множественных гамма квантов и возможности извлечения новых типов данных в рамках развиваемого метода. Приведены характеристики установки GamaspHERE [1], на которой была получена значительная часть экспериментальных данных. Обсуждаются пересечения извлекаемых данных с литературными данными, полученными иными экспериментальными методами.

В результате спонтанного деления атомных ядер образуются осколки деления, нейтроны и гамма кванты. В редких случаях тройного деления, дополнительно образуются легкие ядра, исторически называемые легкими заряженными частицами ЛЗЧ. Известно, что доминирующая часть энергии, выделяющейся в делении, уносится осколками деления. В редких случаях вылета предразрывного нейтрона или тройного деления часть энергии уносится нейтроном или легкой заряженной частицей, соответственно. Энергия, уносимая осколками деления, реализуется в виде кинетической энергии осколков и энергии возбуждения осколков. Девозбуждение осколков деления происходит за счет испарения нейтронов и испускания гамма квантов.

В плане развиваемого в данной работе подхода к изучению деления ядер, актуально, что на последней стадии девозбуждения осколки испускают ряд характеристических гамма квантов. Эти гамма кванты обусловлены переходами между уровнями основной вращательной полосы и между уровнями боковых полос. Существенно, что энергии вращательных уровней были, частично, известны для многих осколков деления к началу данной работы [2-4]. Таким образом, регистрация множественных гамма квантов, испущенных парными осколками деления, позволяет идентифицировать конкретную пару осколков, образующуюся в одном акте деления после испарения нейтронов каждым из осколков.

Идентификации пар осколков деления делает возможным получать новый тип данных, недоступный ранее. Речь идет о независимых выходах пар осколков деления, распределениях множественности нейтронов для различных зарядовых разделений делящегося ядра и об угловых моментах осколков деления в зависимости от числа испущенных нейтронов, т.е. косвенно, в зависимости от энергии возбуждения осколков деления. Выходы пар осколков деления позволяют, как показано в данной работе, делать выводы о распределениях энергии возбуждения первичных осколков, т.е. осколков образующихся сразу после разрыва шейки, до испарения нейтронов.

Данный подход к исследованию деления атомных ядер выдвигает жесткие требования к детектирующей системе, поскольку здесь, в одном спектре, необходимо различать гамма кванты, испущенные многочисленными осколками деления. В результате от детектирующей системы требуется сочетание ряда условий:

- хорошее энергетическое разрешение в области энергий гамма квантов от ~ 100 кэВ до ~ 1.5 МэВ;

- высокая эффективность, позволяющая накапливать достаточную статистику о двойных и тройных гамма совпадениях, для осколков, имеющих относительно малый выход в делении;

- достаточная гранулярность, чтобы избежать наложения гамма квантов.

На момент выполнения данной работы, подобным требованиям удовлетворяли большие системы детекторов типа Gammasphere или EUROGAMM. Для регистрации гамма квантов, в них использовались детекторы, выполненные из больших кристаллов высокочистого германия, окруженные антикомптоновской защитой. Все наши эксперименты, за исключением одного, были выполнены на первой из этих установок. Только самый первый эксперимент был выполнен с использованием 20 гамма детекторов Окриджской национальной лаборатории.

Реализуя на практике новый подход к изучению деления ядер, естественно было применить его для исследования, сочетающего удобство в постановке эксперимента и получении достаточно большого объема экспериментальных данных, имеющих существенное значение для понимания процесса деления. Дополнительным условием, повлиявшим на выбор конкретного атомного ядра, послужила степень его изученности в настоящее время. По-

следнее условие необходимо для осуществления возможности сравнения, если не непосредственно наших данных, то некоторых сверток по нашим данным с имеющимися литературными данными [5-9]. Действительно, в нашей работе речь идет о получении новых типов экспериментальных данных, носящих, в определенной степени, более дифференциальный характер, чем существующие данные. Таким образом, отсутствует возможность прямого сопоставления полученных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными. Речь может идти только о вычислении некоторых интегральных характеристик из наших данных, которые независимо измерялись ранее.

Нами был использован изотоп ^{252}Cf , в котором удачно сочетаются время жизни $T_{1/2} = 2,6$ года и отношение вероятности спонтанного деления к распаду $1/60$, что позволяет использовать его для изготовления источников спонтанного деления. Широкое использование источников ^{252}Cf способствовало накоплению большого объема различных экспериментальных данных о спонтанном делении ^{252}Cf , получаемых разнообразными методами.

В работе кратко проанализированы наиболее распространенные методики измерения масс и полной кинетической энергии осколков, ядерного заряда осколков, распределения множественности нейтронов. Подводя некоторый итог можно сказать, что ранее не существовало методик, позволяющих точно идентифицировать пары осколков деления. Наш подход позволяет экспериментально получать распределения типа $Y(Z_L/Z_H, A'_L, A'_H)$, где A'_L и A'_H массовые числа легкого и тяжелого осколков после испарения нейтронов, а Z_L и Z_H их атомные номера. Выполняя свертку такого распределения по A'_L или по A'_H можно получить независимый выход тяжелых или легких осколков деления соответственно, которые могут сравниваться с существующими экспериментальными данными. Так же могут быть использованы оцененные независимые выходы, но следует учитывать, что данные, приведенные в литературе, это результат определенной параметризации разнообразных экспериментальных данных. Сверка распределения по A'_L и A'_H дает элементный выход осколков деления. Наконец выполняя свертки распределения с условиями $n = 252 - A'_L - A'_H$, где $n \geq 0$ мы получаем распределения множественности нейтронов для фиксированного разделения делящегося ядра. Из полного распределения мы можем использовать только среднее значение и дисперсию для сопоставления с существующими данными.

Во **второй главе** рассмотрены вопросы обработки экспериментальных данных в методе множественных гамма квантов.

Все эксперименты, за исключением первого, были выполнены на установке Gammasphere с различным числом введенных в эксплуатацию детектирующих модулей - от 32 до 110. Первый эксперимент был выполнен на установке из 20 детекторов из высокочистого германия с антикомптоновской защитой Окриджской национальной лаборатории. Во всех экспериментах, ис-

ключая последний, описанный в пятой главе, использовался закрытый источник ^{252}Cf . По нашим оценкам время торможения осколков деления менее $\sim 10^{-12}$ секунды. В подавляющем большинстве случаев времена жизни рассматриваемых уровней осколков деления значительно больше времени торможения. Таким образом, гамма кванты испускались из остановившихся осколков.

Источник ^{252}Cf помещался в геометрический центр установки, и в заданном временном окне, равном 200 нс, регистрировались все события с множественностью гамма квантов больше 1 в первых двух и в последнем эксперименте, и больше 2 в остальных экспериментах. Зарегистрированные события записывались на магнитный носитель типа Exabyte. Характерный объем экспериментальных данных составлял 30-50 Гбайт в первых экспериментах, и доходил до 800 Гбайт в одном из последних опытов. Из полученных данных строились двух- и трехмерные спектры гамма совпадений и оценивались их интенсивности.

Используя калибровочные измерения с гамма источниками, была определена форма одиночного гамма пика в зависимости от энергии гамма квантов. Было показано, что в случае использования детекторов из высокочистого германия, окруженных антикомптоновской защитой, для аппроксимации гамма пиков достаточно использовать простой гауссиан. Таким образом, мы имеем только один параметр формы пика – ширина гауссиана, зависимость которой от энергии гамма квантов определялась из калибровочных спектров. Конкретные эксперименты проводились с различными наборами калибровочных источников. В целом были использованы гамма источники: $^{56,60}\text{Co}$, ^{125}Sb , ^{133}Ba , $^{152,154}\text{Eu}$, ^{182}Tl и ^{207}Bi .

Принимался также во внимание тот факт, что сочетание большой статистики полученных данных с высоким энергетическим разрешением, используемых детекторов, приводит к необходимости учета ширины канала при проведении аппроксимации данных. Без этого, аппроксимация гамма пика простым гауссианом, т.е. использование только значений функции Гаусса, вычисленных при энергиях соответствующих серединам каналов, приводит к завышенному значению χ^2 . С целью избежать данной проблемы аппроксимация гамма пиков непосредственно функцией Гаусса заменялась на их аппроксимацию интегралом от данной функции, который вычислялся по ширине канала

$$F_{GM}(x) = \int_x^{x+1} F_{G1}(\xi) d\xi \approx \frac{A_1}{2} \times \left(\text{erf} \left(\frac{x-x_0+1}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \text{erf} \left(\frac{x-x_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right). \quad (1)$$

Зависимость эффективности детекторов ε от энергии гамма квантов описывалась функцией

$$\varepsilon = \exp \left\{ \left[\left(a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \right)^{-G} + \left(b_0 + b_1 y + b_2 y^2 \right)^{-G} \right]^{-1/G} \right\}, \quad (2)$$

где $x = \ln(E_\gamma/100)$ и $y = \ln(E_\gamma/1000)$. Здесь энергия гамма квантов выражена в кэВ. Левая и правая части суммы (2) описывают области малых и больших значений энергии гамма квантов, соответственно. Параметр G служит для сшивания двух областей определения эффективности и задает степень остроты кривой эффективности в области сшивки. Пример аппроксимации калибровочных данных функцией (2) продемонстрированы на рис. 1

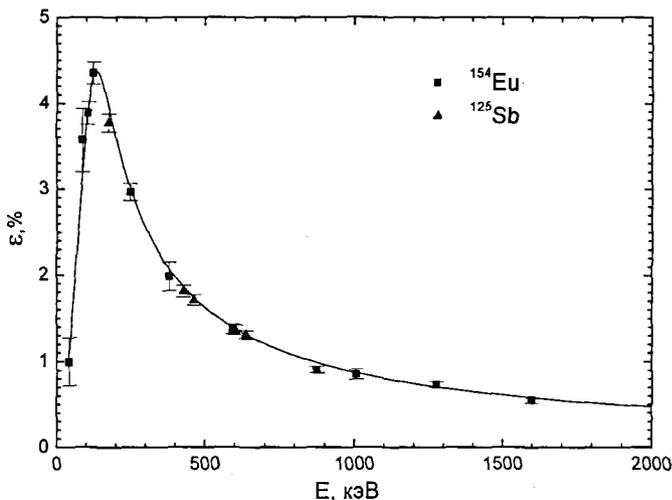


Рисунок 1. Результат аппроксимации калибровочных данных, полученных в первом эксперименте с 20 гамма детекторами.

Для измерения интенсивностей гамма – гамма совпадений, из отсортированных данных строились двухмерные спектры гамма совпадений $N(E_{\gamma_1}, E_{\gamma_2})$, традиционно называемые в литературе матрицами гамма совпадений. Размер матриц 4096×4096 каналов, в сочетании с ценой канала, которая в разных экспериментах составляла от 0.55 до 0.8 кэВ/канал, позволял анализировать совпадения гамма квантов всех энергий, представляющих интерес.

Принципиальная трудность, возникающая при оценке интенсивности многократных гамма совпадений, обусловлена сложной формой фона, сопутствующего подобным совпадениям. Действительно рассмотрим совпадение N гамма квантов дискретного спектра. Среди них могут оказаться один или несколько «фоновых» гамма квантов, т.е. имеющих энергию, совпадающую с энергией одного из рассматриваемых гамма квантов дискретного спектра, но образовавшихся в результате комптоновского рассеяния гамма квантов с более высокой энергией. Такие события являются фоновыми, и их полное чис-

ло может быть записано как сумма по числу «фоновых» гамма квантов n регистрируемых в событии:

$$\sum_{n=1}^{n=N} \frac{N!}{(N-n)!n!}. \quad (3)$$

Применительно к двойным гамма совпадениям это дает три компонента фона. Одна гладкая компонента, обусловлена совпадением регистрации двух «фоновых» гамма квантов. Две другие, наблюдаемые в виде серий гребней, параллельных осям координат, обусловлены совпадением регистрации «фоновых» гамма квантов и гамма квантов дискретного спектра. В случае тройных гамма совпадений формула (3) дает 7 фоновых составляющих. Без корректного учета всех фоновых компонент интенсивность слабых гамма пиков может быть искажена, а также могут наблюдаться ложные гамма пики.

В работе рассмотрены различные подходы к учету сложного фона [10, 11]. В случае анализа двойных гамма совпадений, для учета фона нами был развит метод, описанный в литературе еще в 80-х годах XX века [12]. Метод основан на описании различных локальных областей матрицы гамма – гамма совпадений некоторой аналитической функцией:

$$F(x, y) = F_{\gamma\gamma}(x, y) + F_{B_0}(x, y) + F_{B_X}(x, y) + F_{B_Y}(x, y), \quad (4)$$

где

$$F_{\gamma\gamma}(x, y) = \sum_{\alpha=1}^{N_\alpha} \sum_{\beta=1}^{N_\beta} A_{\alpha\beta} \times G(x, x_\alpha, \{p\}_\alpha) \times G(y, y_\beta, \{p\}_\beta), \quad (5)$$

$$F_{B_0}(x, y) = B_0 + B_1(x - \bar{x}) + B_2(y - \bar{y}) + B_3(x - \bar{x})(y - \bar{y}), \quad (6)$$

$$F_{B_X}(x, y) = \sum_{\alpha=1}^{N_\alpha} A_\alpha \times G(x, x_\alpha, \{p\}_\alpha), \quad (7)$$

$$F_{B_Y}(x, y) = \sum_{\beta=1}^{N_\beta} A_\beta \times G(y, y_\beta, \{p\}_\beta). \quad (8)$$

Здесь функции (6-8) описывают фоновые компоненты, а функция (5) вклад от искомого гамма – гамма совпадений; N_α , x_α , N_β , y_β - числа и центры всех гамма пиков, расположенных вдоль двух осей координат x и y , и которые могут давать вклад в рассматриваемую область. Множества параметров $\{p\}_\alpha$ и $\{p\}_\beta$ определяют форму гамма пика в зависимости от энергии, а их число зависит от явного вида функции G ; коэффициенты $B_0 - B_3$ определяют уровень гладкого фона, а \bar{x} и \bar{y} - положение центра рассматриваемой области по осям X и Y ; коэффициенты A_α и A_β определяют величины фоновых

гребней; коэффициенты $A_{\alpha\beta}$ - интенсивности рассматриваемых гамма совпадений.

Явный вид функции G , применительно к нашим экспериментам, обсуждался выше. Таким образом, множества параметров $\{p\}_\alpha$ и $\{p\}_\beta$ сводятся к соответствующим дисперсиям гауссовых распределений. В результате свободными параметрами модели остаются $N_\alpha, x_\alpha, N_\beta, y_\beta, B_0 - B_3, A_\alpha, A_\beta$ и $A_{\alpha\beta}$. В таком приближении полное число свободных параметров необходимых для описания локальной области двухмерной матрицы гамма – гамма совпадений, например размером 30×30 каналов, при характерной для данных экспериментов энергетической цене канала и плотности гамма квантов по энергии, дает величину порядка 200. Подобная оценка практически исключает возможность оценить параметры модели методом прямой аппроксимации. Задача оказывается нелинейной с большим переменным числом варьируемых параметров. Однако она может быть решена последовательно в два этапа. Из уравнений (4 - 8) видно, что модель линейна по параметрам $B_0 - B_3, A_\alpha, A_\beta, A_{\alpha\beta}$. Следовательно, если возможна независимая оценка параметров $N_\alpha, x_\alpha, N_\beta, y_\beta$, то оценка остальных параметров сводится к решению линейной задачи. Без ограничений на величины искомым параметров переопределенная система линейных уравнений может решаться многими методами, которые, в нашем случае, приводят обычно к неустойчивому решению. Наложение естественных ограничений на величины параметров $A_\alpha \geq 0, A_\beta \geq 0, A_{\alpha\beta} \geq 0$ делает задачу нелинейной, но методы решения последней хорошо изучены.

В настоящей работе оценка параметров $N_\alpha, x_\alpha, N_\beta, y_\beta$ выполнялась с помощью построения двух ортогональных проекций локальной области и к независимой последующей оценки параметров N_α, x_α и N_β, y_β по полученным проекциям. Другими словами задача сводилась к отысканию положения всех гамма пиков в двух линейных спектрах. Поиск гамма пиков в линейном спектре осуществлялся с помощью специально созданной итерационной процедуры. Процедура позволяет аппроксимировать линейный спектр суммой функций (1), с переменным числом членов суммы, и дополнительной линейной функцией, достаточной для описания фона на узком участке спектра. Подобная идея не является принципиально новой, однако ее реализация стала возможной только с появлением быстродействующих рабочих станций.

Каждый шаг итерации включает:

- выбор начального положения и интенсивности нового пика, если условие завершения итерации не выполнено;
- аппроксимацию спектра методом наименьших квадратов, при этом варьируются положения и интенсивности всех пиков, и параметры, используемые для описания фона;

- анализ результатов аппроксимации с целью исключения из дальнейшего рассмотрения плохо обусловленных пиков.

Последнее подразумевает анализ взаимного положения всех пиков, который позволяет избежать возможных ложных расщеплений пиков, а также анализ полученных в результате аппроксимации оценок ошибок положения и интенсивности каждого пика. На практике пик, интенсивность которого не превышает оценки ее ошибки, либо оценка ошибки его положения превышает ширину канала, исключается из дальнейшего рассмотрения. Также каждые два пика, расстояние между центрами которых оказывается меньше половины величины дисперсии, объединяются в один.

На основе выше изложенного подхода к анализу двухмерных матриц гамма – гамма совпадений была создана программа, реализующая все стадии анализа от выбора локальной области, до получения конечного результата – списка всех совпадений в пределах локальной области и их интенсивностей. Фактически, за время выполнения работы, было написано несколько версий программы, работающих на разных типах вычислительных машин, под управлением различных операционных систем, использующих различные графические библиотеки, но реализующие одну методику.

В первых версиях программы непосредственно использовалась графическая библиотека X11. Она была реализована на рабочих станциях Sun (операционная система SunOS) и Alpha (операционная система Digital Unix). Последняя версия программы использует возможности системы ROOT, разработанной в CERN. Это позволило создать единый код, с развитым графическим интерфейсом, работающий на компьютерах под управлением Windows и Linux.

Пример работы программы с модельным спектром продемонстрирован на рис. 2. Был смоделирован двухмерный спектр гамма – гамма совпадений размером 31×31 канал. Предполагалось наличие трех гамма пиков, расположенных на оси x , и двух гамма пиков – на оси y . Расстояние между центрами (x_2, x_3) двух из трех пиков на оси x было выбрано относительно малым – $1.4 \times \sigma$. В расчет двухмерного спектра было заложено существование только двух реальных совпадений, а именно $(x_1 - y_1)$ и $(x_2 - y_2)$. Для наглядности гладкий фон был задан постоянным. На рис.2а представлен общий вид модельного спектра. Наглядно видны ложные пики, возникающие на пересечении фоновых гребней $(x_2, x_3 - y_1)$ и $(x_1 - y_2)$. Результат разложения спектра на реальные двухмерные пики и фоновые составляющие представлены на рис. 2b, c, d соответственно.

Тестирование развиваемого нами метода оценки интенсивности гамма совпадений выполнялось как на специально смоделированных спектрах, так и с использованием реальных данных, полученных в экспериментах. В последнем случае использовались известные свойства каскада гамма квантов основной полосы четно-четных осколков. Основное состояние таких осколков имеет нулевой спин, а уровни основной полосы – четный спин. Каскад гамма квантов идет последовательно и соответствует E2 переходам. Тогда

для отношения интенсивностей совпадений между подобными гамма квантами выполняется следующее соотношение:

$$R = \frac{I\left(\left(2n\right)^+ \rightarrow \left(2n-2\right)^+, 2^+ \rightarrow 0^+\right)}{I\left(\left(2n\right)^+ \rightarrow \left(2n-2\right)^+, 4^+ \rightarrow 2^+\right)} = 1, \quad (9)$$

где $n = 3, 4, \dots, N$, а $2N$ - максимальный наблюдаемый угловой момент рассматриваемого ядра. Развитый метод оценки интенсивностей гамма-гамма совпадений был тестирован на предмет выполнения условия (9) для большого числа четно-четных ядер. Было установлено, что оно выполняется всегда в пределах точности измерения интенсивностей гамма совпадений.

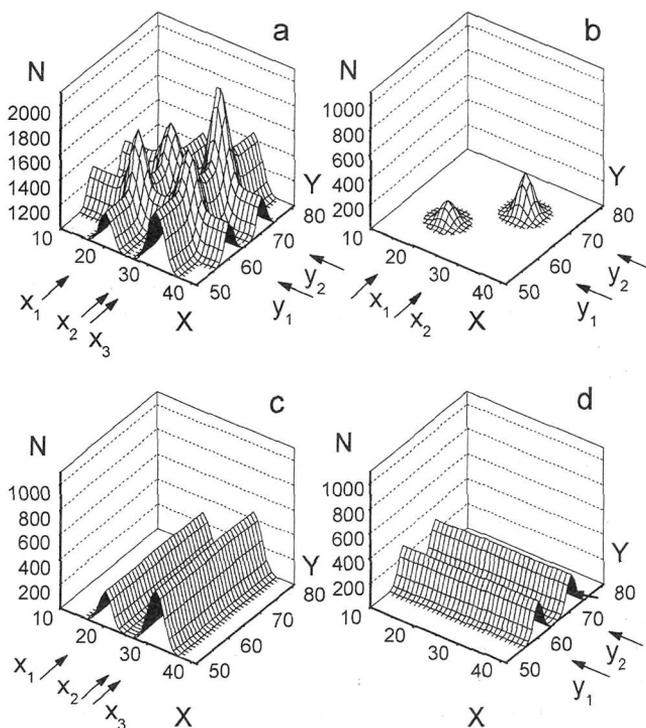


Рисунок 2. Пример выделения фона в двухмерном спектре: а – общий вид двухмерного спектра; б – выделенные программой двухмерные пики гамма совпадений; с, d - компоненты фона в виде гребней параллельных осям координат. Стрелками показаны положения центров гамма пиков.

Еще один способ тестирования нашего метода использовал тот факт, что не должно наблюдаться совпадений гамма квантов, испущенных двумя легкими или двумя тяжелыми осколками, а также легким и тяжелым осколком, когда их суммарное массовое число больше 252. Другими словами проверялось, что интенсивность двухмерного пика, образованного пересечением фоновых гребней, должна быть равна нулю при корректном вычитании фона. Это было подтверждено в наших тестах.

Таким образом, многочисленные и разнообразные тесты продемонстрировали, что разработанный нами метод оценки интенсивности гамма совпадений корректно работает.

В третьей главе рассмотрены основные экспериментальные результаты, полученные для двойного деления ²⁵²Cf.

Известно, что в процессе девозбуждения осколок деления проходит через область дискретных уровней энергии, лежащую вблизи или на ираст полосе. Этот последний этап девозбуждения является принципиальным для реализованного в данной работе метода измерения выхода пар осколков. Спектр гамма квантов, испускаемых осколком на данной стадии девозбуждения, является дискретным и характерным для каждого осколка деления. Это позволяет, в принципе, идентифицировать отдельные осколки в делении. Задолго до начала данной работы, было показано [5], что интенсивность перехода в основное состояние $2^+ \rightarrow 0^+$ при девозбуждении четно-четного осколка соответствует его независимому выходу в делении. Основная сложность практического использования этого факта была сопряжена с большим числом различных осколков, образующихся в делении одного ядра и дающих вклад в общий спектр гамма квантов.

Использование в настоящей работе регистрации гамма – гамма совпадений позволило существенно снизить значение проблемы высокой плотности гамма пиков, наблюдаемых в простом линейном спектре и, в конечном счете, идентифицировать целый набор специфических пар осколков, образующихся в одном акте деления. Интенсивность двухмерного гамма пика, образующегося в случае регистрации совпадения двух гамма квантов, отвечающих за переходы $2^+ \rightarrow 0^+$ в парных, четно-четных осколках, должна отражать вероятность образования данной пары осколков в делении.

В случае четно-нечетных осколков (n-нечетное) задача усложняется по следующим обстоятельствам. Во-первых, существует чисто техническая проблема, связанная с тем, что у n-нечетных осколков может существовать несколько прямых гамма переходов на основное состояние. Как следствие, вместо оценки интенсивности одного двумерного гамма пика необходимо оценить интенсивность нескольких гамма пиков, обусловленных регистрацией совпадений между различными гамма квантами, отвечающими за переход в основное состояние в парных осколках и просуммировать их значения. Схематично это представлено в таблице 1.

Вторая проблема носит более принципиальный характер и связана с тем фактом, что у представляющих интерес N -нечетных осколков основное состояние имеет не нулевой спин, и часто он имеет относительно большое значение. Таким образом, возникает вопрос о вероятности прямого заселения основного состояния в делении. Наш подход был основан на оценке этой вероятности по заселенности близких по величине углового момента уровней в соседних N -четных осколках, определяемой в данной работе.

Таблица 1.

Комбинации переходов в парных осколках, учитываемые в оценке выхода их пары в делении.

Z-четные осколки		Учитываемые переходы
N1	N2	
Четный	Четный	$I(2^+ \rightarrow 0^+, 2^+ \rightarrow 0^+)$
Четный	Нечетный	$\sum_{J_2} I(2^+ \rightarrow 0^+, J_2 \rightarrow gs_2)$
Нечетный	Нечетный	$\sum_{J_1, J_2} I(J_1 \rightarrow gs_1, J_2 \rightarrow gs_2)$

В работе было рассмотрено пять разделений ядра ^{252}Cf на Z-четные осколки $Z_{\text{H}}/Z_{\text{L}} = 52/46 (\text{Te} - \text{Pd}), 54/44 (\text{Xe} - \text{Ru}), 56/42 (\text{Ba} - \text{Mo}), 58/40 (\text{Ce} - \text{Zr})$ и $60/38 (\text{Nd} - \text{Sr})$. Выбранные пары осколков лежат в области максимума распределения осколков по атомному номеру, и их суммарный выход составляет ~50% от всех осколков. Два типа поправок вносились в полученные значения интенсивностей гамма пиков. Во-первых, учитывалась вероятность внутренней конверсии. Во-вторых, принималось во внимание время жизни осколка на отдельных энергетических уровнях. При наличии долгоживущих состояний вводилась поправка на ширину временного окна, использованного в отборе событий гамма-гамма совпадений. Случаи очень коротко живущих состояний, когда время жизни сопоставимо со временем торможения осколка, рассматривались отдельно.

В результате проведенной обработки экспериментальных данных были получены относительные выходы 135 пар осколков деления $Y_R(A'_L, A'_H | Z_L, Z_H)$ для пяти зарядовых разделений ^{252}Cf . Суммируя полученные выходы пар осколков, относящиеся к одному легкому или тяжелому осколку, можно получить относительные выходы отдельных изотопов:

$$Y_R(A'_H | Z_H) = \sum_{(A'_L | Z_L)} Y_R(A'_L, A'_H | Z_L, Z_H). \quad (10)$$

Это позволяет, используя известные независимые выходы изотопов, образующихся при спонтанном делении ^{252}Cf , нормировать наши данные и получить независимые выходы пар осколков. Данная процедура возможна, если

известны выходы всех пар осколков, дающих основной вклад в выход конкретного изотопа. В нашем случае таковыми изотопами являлись $^{138,140}\text{Xe}$, $^{142,144,146}\text{Ba}$ и $^{146,148}\text{Ce}$. Значение среднего нормировочного коэффициента составило $(7,6 \pm 1,1) \times 10^9$. Используя данное значение, с указанной оценкой ошибки, относительные выходы пар осколков были переведены в независимые выходы пар. Пример таких данных представлен в таблице 2.

Таблица 2.

Независимые выходы пар осколков Xe-Ru . Выходы приведены в процентах, т.е. число образующихся пар осколков на 100 делений ^{252}Cf .

$\begin{matrix} Ru \\ \text{Xe} \end{matrix}$	106	107	108	109	110	111	112
134	---	---	---	---	---	---	0,07(3)
136	---	---	---	0,03(3)	0,15(4)	0,18(5)	0,20(5)
137	---	---	0,02(1)	0,08(4)	0,30(4)	0,22(4)	0,17(5)
138	---	0,05(5)	0,19(3)	0,58(11)	1,03(6)	0,48(8)	0,24(3)
139	0,02(2)	0,07(5)	0,23(2)	0,30(7)	0,58(4)	0,26(6)	0,02(2)
140	0,08(2)	0,19(5)	0,67(4)	0,45(9)	0,39(4)	0,08(4)	---
142	0,13(2)	0,06(4)	0,12(3)	0,05(5)	0,02(2)	---	---

Выходы пар осколков деления были получены впервые. В литературе отсутствует столь детальная информация, а имеющиеся данные о массовых и зарядовых распределениях осколков деления носят более интегральный характер. Поэтому для сравнения полученных результатов с опубликованными данными были выполнены различные суммирования полученных выходов пар осколков. На момент выполнения данной работы, схемы уровней ряда четно-нечетных осколков были неизвестны. Следствием этого явилось отсутствие в наших данных выходов ряда пар осколков, когда один или оба осколка являются N-нечетными. Чтобы просуммировать полученные выходы пар осколков, пропущенные данные были восполнены результатами интерполяции данных с помощью двумерных B-сплайнов, построенных для каждого Z разделения. Пример изотопного распределения показан на рис.3, где квадратиками показаны наши данные, кружками – данные известные из литературы, и пунктиром показаны границы ошибок для полуэмпирической оценки выходов изотопов.

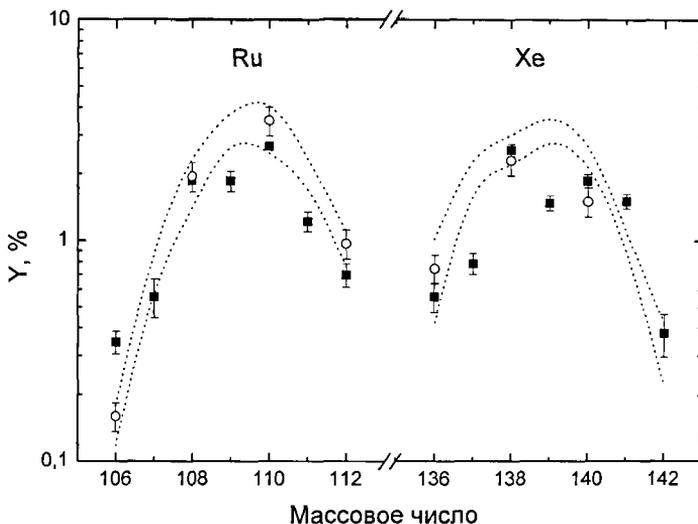


Рисунок 3. Выходы изотопов *Xe* и *Ru* при спонтанном делении ^{252}Cf .

Как показало сравнение, наши данные хорошо согласуются с экспериментальными данными, известными ранее, и имеют определенное отличие от полуэмпирической оценки.

Суммирование выходов пар осколков, соответствующих эмиссии 0, 1, 2 и т.д. нейтронов, позволили получить распределения множественности нейтронов для пяти разделений ^{252}Cf по зарядам, представленные на рис.4. Сплошными линиями на рисунке показаны результаты аппроксимации экспериментальных точек распределением Гаусса. Видно, что распределения множественности нейтронов хорошо описываются распределением Гаусса для четырех зарядовых разделений ^{252}Cf . В случае *Ba-Mo* зарядового разделения, распределение Гаусса успешно описывает только точки соответствующие эмиссии 1-7 нейтронов. Повышенный выход 8-10 нейтронов в данном случае в значительной степени определяется оценкой выхода пары осколков $^{138}\text{Ba}-^{104}\text{Mo}$. В работе детально проанализированы имеющиеся оценки выхода данной пары и сделаны выводы, что имеющиеся оценки не позволяют исключить повышенный выход нейтронов с большой множественностью, но корректная оценка будет возможна только в будущих экспериментах, включающих совместную регистрацию осколков деления и испускаемых ими гамма квантов.

Полученные распределения множественности нейтронов представляют собой новый тип данных, которые можно извлечь при изучении множествен-

ных гамма квантов при делении ядер и которые не могли быть получены другими известными методами.

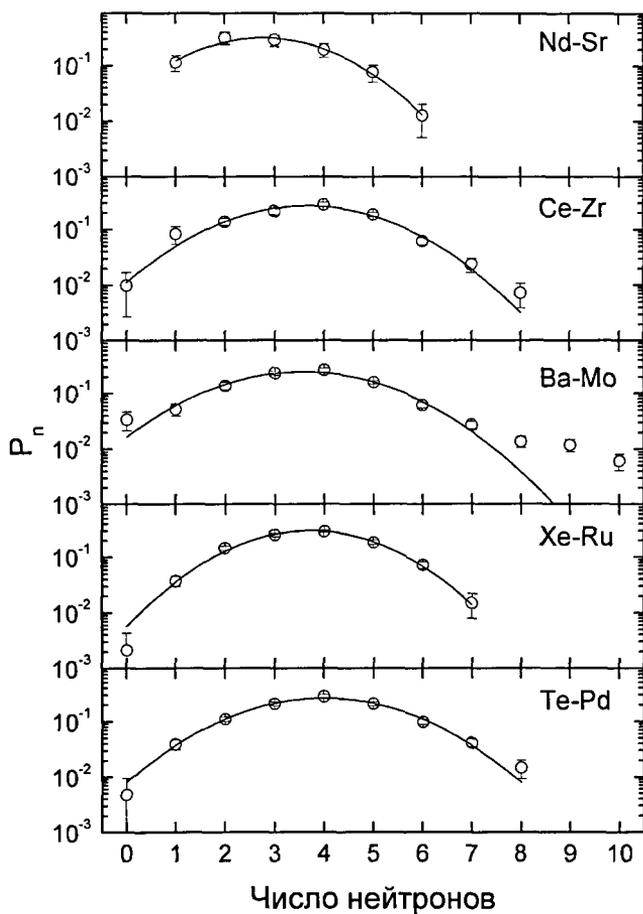


Рисунок 4. Распределения множественности нейтронов для пяти разделений ^{252}Cf на заряды. Вероятности эмиссии n нейтронов P_n нормированы на единицу. Сплошные линии - результаты аппроксимации экспериментальных точек распределением Гаусса.

В четвертой главе рассмотрен подход к определению характеристик первичных осколков деления на основе полученных выходов пар.

Все пары вторичных осколков (A'_L, A'_H) , относящиеся к одному зарядовому разделению (Z_L, Z_H) делящегося ядра (Z_F, A_F) , формируются в результате испарения различного числа нейтронов из ограниченного числа пар первичных осколков (A_L, A_H) , относящихся к тому же зарядовому разделению. Подобная связь между вторичными и первичными осколками деления и полученные выходы пар осколков предоставляют возможность исследовать характеристики первичных осколков. В частности, речь может идти о выходах первичных осколков и распределении их энергии возбуждения.

Распределение пар вторичных осколков $Y(A'_L, A'_H | Z_L, Z_H)$, для фиксированного зарядового деления делящегося ядра (Z_L, Z_H) может быть связано с распределением масс первичных осколков $Y(A_L, A_H | Z_L, Z_H)$, для того же зарядового деления, следующим соотношением:

$$Y(A'_L, A'_H | Z_L, Z_H) = \sum_m \sum_{(A_L, A_H)} Y(A_L, A_H | Z_L, Z_H) \times I_L \times I_H, \quad (11)$$

$$I_L = \int F(E_L^*, A_L) \times P(E_L^*, A_L, n_L) \times \delta(A_L - A'_L - n_L) \times dE_L^*, \quad (12)$$

$$I_H = \int F(E_H^*, A_H) \times P(E_H^*, A_H, n_H) \times \delta(A_H - A'_H - n_H) \times dE_H^*. \quad (13)$$

Здесь $F(E^*, A)$ - распределения энергии возбуждения в первичных осколках, $P(E^*, A, n)$ - вероятность испарения n нейтронов из первичного осколка, имеющего энергию возбуждения E^* . Уравнение (11) включает два суммирования, первое выполняется по всем парам первичных осколков, относящихся к данному разделению по Z , а второе суммирование используется в случае учета возможного вклада более одной делительной моды. Используя обычную процедуру минимизации χ^2 , для отдельного деления по Z делящегося ядра, можно делать выводы о распределениях первичных осколков по массам - $Y(A_L, A_H)$ и по энергии возбуждения - $F(E^*, A)$.

Расчеты вероятностей испарения нейтронов из осколков деления были выполнены с помощью программы GNASH [13]. В программе реализованы вычисления по статистической модели в формализме Хаузера – Фешбаха, с учетом сохранения углового момента и четности. Проницаемости частиц не рассчитываются в программе GNASH непосредственно, а используются данные, подготовленные по оптической модели или по модели связанных каналов. Первые расчеты проницаемостей были выполнены по программе SCAT2 [14], реализующей оптическую модель. В дальнейшем, в связи с переходом на новую систематику оптических потенциалов [15, 16], был сделан переход

к использованию программы ECIS [17], реализующей оптическую модель связанных каналов.

Следует отметить, что для осколков деления, представляющих интерес в данной работе, нет специально подобранных оптических потенциалов. Таким образом, приходится распространять систематику, подобранную для стабильных ядер, на область короткоживущих нейтронно-избыточных ядер. Сопоставление расчетных данных по вероятности испарения нейтронов, полученных с помощью программ GNASH+SCAT2 и GNASH+ECIS, показало, что в области максимумов вероятности испарения слабо зависят от используемого оптического потенциала. При удалении от области максимума в сторону меньших и больших энергий возбуждения, различия достигают величины 20-30%. Однако, эти различия носят систематический характер и могут быть устранены сдвигом распределений по энергии возбуждения на величину порядка 0.2-0.4 МэВ. Отсюда следует, что выбор оптического потенциала должен приводить к неопределенности того же порядка в оценке значений средних энергий возбуждения осколков.

Учитывая ограниченное число экспериментальных данных, практическая реализация данного подхода требует определенных гипотез о форме искомым распределений. Для искомым распределений предполагалась гауссова форма, что означает два свободных параметра для каждого распределения – среднее значение и дисперсия. Чтобы сделать задачу решаемой, в такой постановке, были введены гипотезы относительно связей между параметрами модели, что позволило сократить их общее число до приемлемого уровня. Некоторые из вводимых связей непосредственно следуют из закона сохранения энергии, другие носят не столь очевидный характер. Существенно то, что далеко не все рассмотренные в процессе работы гипотезы относительно связи параметров модели позволяют описать имеющуюся совокупность экспериментальных данных. В конечном итоге были оставлены следующие.

Во-первых, предполагалось, что для одного Z разделения ядра ^{252}Cf среднее значение полной кинетической энергии - $\langle TKE \rangle$ и ее дисперсия - σ_{TKE} имеют одно значение для всех пар осколков. Такая гипотеза позволяет написать следующие уравнения, непосредственно следующие из закона сохранения энергии в точке разрыва

$$Q_{\text{деления}} = \langle TKE \rangle + \langle E_L^* \rangle + \langle E_H^* \rangle, \quad (14)$$

$$\sigma_{TKE}^2 = \sigma_{E_L^*}^2 + \sigma_{E_H^*}^2. \quad (15)$$

Здесь $\langle E_{L(H)}^* \rangle$ средняя энергия возбуждения первичного осколка, а $\sigma_{E_{L(H)}^*}$ ее дисперсия.

Во-вторых, была введена следующая связь между дисперсией энергии возбуждения и ее средним значением

$$\frac{\sigma_{E_L}^2}{\langle E_L^* \rangle} = \frac{\sigma_{E_H}^2}{\langle E_H^* \rangle}. \quad (16)$$

В конечном итоге, для одного зарядового разделения, свободно варьируемыми параметрами остались: параметры распределения тяжелых или легких первичных осколков по массе $\langle A \rangle$, σ_A , параметры распределения полной кинетической энергии $\langle TKE \rangle$, σ_{TKE} и средние энергии возбуждения легких $\langle E_L^* \rangle$ или тяжелых $\langle E_H^* \rangle$ первичных осколков. Для одного зарядового разделения рассматривалось до девяти пар первичных осколков. Это приводит к 14 варьируемым параметрам модели

$$\left\{ K, \langle A_H \rangle, \sigma_A, \langle TKE \rangle, \sigma_{TKE}, \langle E_H^* \rangle_{i=1..9} \right\}, \quad (17)$$

где K – нормировочный множитель. В работе подробно рассмотрена стратегия поиска минимума χ^2 , поскольку без этого задача минимизации скатывалась к одному из многочисленных локальных минимумов с большим значением χ^2 .

Наиболее полные данные по выходам пар осколков были получены для трех зарядовых разделений ^{252}Cf : *Xe-Ru*, *Ba-Mo* и *Ce-Zr*. Эти данные были использованы в процедуре минимизации. Относительно *Ba-Mo* разделения следует оговорить, что были использованы данные, полученные к моменту выполнения данной работы. Дальнейшее уточнение выходов пар осколков, для данного зарядового разделения, привело к выводу, что первоначальная оценка выходов пар с числом испаренных нейтронов больше семи была завышена. Это привело, в дальнейшем, к переоценке вклада второй моды, рассматриваемой в работе, в сторону ее уменьшения. В то же время результаты, полученные для основной моды, не изменились.

Выходы пар осколков *Xe-Ru* и *Ce-Zr*, и большая часть выходов пар осколков *Ba-Mo* были успешно, в смысле $\chi^2 \approx 1$, описаны одной модой деления, в дальнейшем обозначаемой как мода 1. В то же время, часть данных, соответствующих вылету более 7 нейтронов в *Ba-Mo* зарядовом распределении, не удалось описать в рамках одной моды деления. Различные гипотезы, обсуждаемые в работе, в частности относительно формы распределения *TKE*, не привели к описанию этой группы данных. В конечном итоге была высказана гипотеза, что в случае *Ba-Mo* зарядового разделения наблюдается две моды деления. Каждая мода характеризуется своим массовым распределением первичных осколков и своим распределением *TKE*. Такая гипотеза позволила успешно описать всю совокупность данных, относящихся к *Ba-Mo* зарядовому разделению.

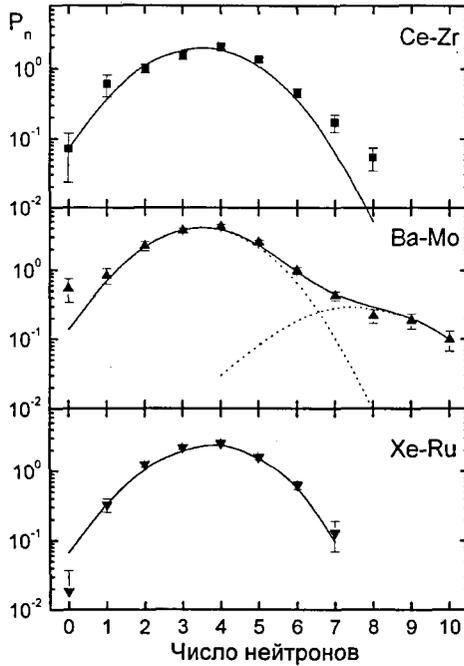


Рисунок 5. Распределение множественности нейтронов для трех зарядовых разделений ^{252}Cf . Точки – данные полученные сверткой экспериментальных данных по выходам пар осколков. Сплошные кривые результат свертки расчетных данных, получаемых в результате минимизации χ^2 . Точечные кривые демонстрируют вклад моды 1 и моды 2 в случае $\text{Ba} - \text{Mo}$ зарядового деления.

В пятой главе рассмотрены результаты эксперимента по изучению тройного деления ^{252}Cf , сочетающего развиваемый в работе метод коррелированных гамма квантов с регистрацией легких заряженных частиц (ЛЗЧ). Обсуждаются экспериментальные данные, послужившие основой для гипотезы, что в точке разрыва делящегося ядра возможно образование тройной ядерной молекулы (^{10}Be и два осколка деления), имеющей большое время жизни, достаточное для испускания гамма квантов из неускоренных ядер ^{10}Be . [18]. Проверка данной гипотезы и послужила побудительным мотивом постановки данного эксперимента, в первую очередь.

Эксперимент был выполнен в Берклиевской национальной лаборатории на установке Gammasphere, с использованием восьми $\Delta E \times E$ телескопов для регистрации ЛЗЧ, испускаемых в тройном делении ^{252}Cf . Схема эксперимента

подробно рассмотрена в работе. В ходе эксперимента было набрано $\sim 1,6 \times 10^7$ событий.

Разрешение $\Delta E \times E$ телескопов позволило идентифицировать ядра гелия, бериллия, бора и углерода. Пороги регистрации по их первичной кинетической энергии составили 9, 21, 27 и 33 МэВ соответственно. Второй эксперимент, поставленный с открытым источником ^{252}Cf и теми же $\Delta E \times E$ телескопами, позволил определить параметры энергетических спектров ЛЗЧ без привлечения дополнительных гипотез о поведении спектра в области малых кинетических энергий ЛЗЧ. Полученные параметры энергетических распределений ЛЗЧ и пороги их регистрации позволяют оценить доли зарегистрированных ядер гелия, бериллия, бора и углерода от их полного выхода, которые составили 94%, 34%, 22% и 11%, соответственно.

Одним из центральных вопросов проведенного эксперимента было обнаружение гамма квантов, испускаемых ядром ^{10}Be , как движущимся, так и неподвижным. В первую очередь, речь идет о переходе с первого возбужденного уровня 2^+ в основное состояние, сопровождаемое испусканием гамма кванта с энергией 3368 кэВ. Столь высокая энергия гамма кванта облегчает его обнаружение, поскольку в этой области энергий практически не наблюдаются мгновенные гамма кванты, испускаемые осколками деления. Как следствие, должен наблюдаться только гладкий фон.

В работе показано, что в спектре гамма квантов, зарегистрированных в совпадении с Be , наблюдается заметное превышение фона, в виде плато, в области энергий от ~ 3000 кэВ до ~ 3600 кэВ. Такое плато может быть обусловлено девозбуждением ^{10}Be налету, с размытием энергии гамма кванта, обусловленным доплеровским сдвигом. Такой вариант был детально промоделирован, и результат совпал с наблюдаемыми экспериментальными данными. Таким образом, к измеренным энергиям гамма квантов, попадающих в данный участок спектра, могла быть применена коррекция на доплеровский сдвиг энергии. Результат восстановления первичного спектра гамма квантов показан на рис. 6. Как видно, в результате введения коррекции энергии на доплеровский сдвиг, был получен гамма пик, положение которого соответствует энергии перехода $2^+ \rightarrow 0^+$ в ^{10}Be . Ширина гамма пика на полувысоте, равная $65,7 \pm 4,5$ кэВ, хорошо совпала с ожидаемой, в результате моделирования, шириной 62,1 кэВ. Моделирование было выполнено с учетом экспериментального энергетического спектра ядер ^{10}Be , энергетического разрешения Gammasphere, положения и размеров всех детекторов, частиц и гамма квантов.

В свете гипотезы о возможности образования тройной ядерной молекулы, представляла интерес попытка обнаружить гамма кванты, испускаемые покоящимся ядром ^{10}Be . Такой процесс должен порождать пик в спектре гамма квантов, рис. 6, с максимумом 3368 кэВ. Если такой процесс реализуется с малой вероятностью, то его вклад в исходный спектр гамма квантов на рис. 6, обозначенный пунктирной линией, маскируется гамма квантами, обусловленными девозбуждением ядер ^{10}Be налету.

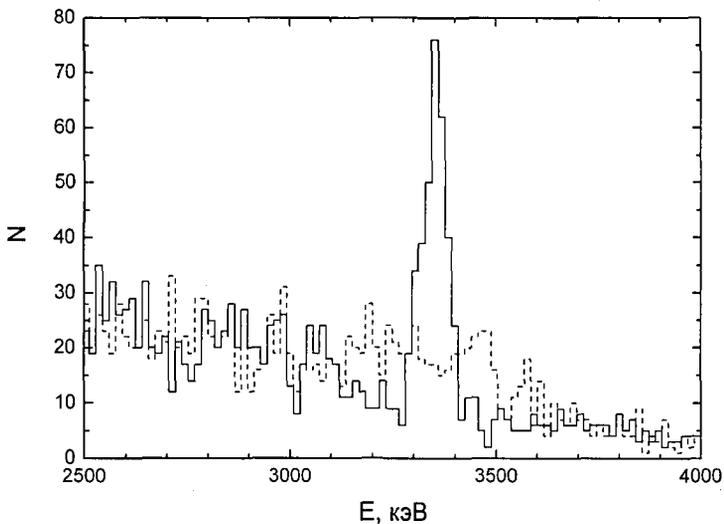


Рисунок 6. Спектр гамма квантов после введения коррекции на доплеровский сдвиг энергии показан сплошной гистограммой. Исходный экспериментальный спектр показан пунктирной гистограммой.

В работе показано, что доплеровский сдвиг энергии гамма квантов, испущенных движущимся ядром, позволяет «очистить» область спектра вблизи энергии 3368 кэВ от вклада подобных гамма квантов. События, в которых направление движения испущенного гамма кванта имеет относительно малый или большой угол по отношению к направлению движения ядра Be , соответствует максимальному сдвигу энергии гамма кванта, т.е. отсутствию вклада таких гамма квантов в спектр в районе 3368 кэВ. Спектр отобранных подобным образом гамма квантов представлен на рис. 7. Хорошо видно, что в спектре практически отсутствуют гамма кванты с энергией близкой к энергии 3368 кэВ. Таким образом, можно утверждать, что данный эксперимент не подтверждает существование гипотетической тройной ядерной молекулы. Данное утверждение не закрывает полностью проблему существования тройной ядерной системы, поскольку в эксперименте наблюдался не весь спектр ядер Be , а регистрировались только ядра с кинетической энергией выше 21 МэВ. Верхняя оценка вероятности образования ядра ^{10}Be в состоянии покоя составила не более 3% от их полного выхода с кинетической энергией выше 21 МэВ.

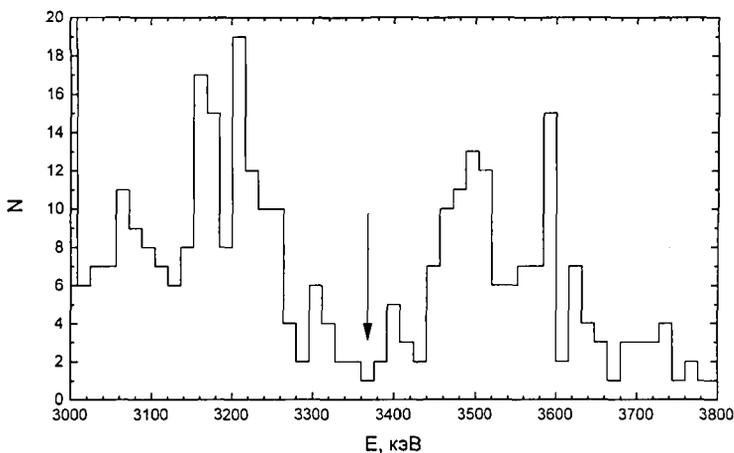


Рисунок 7. Спектр гамма квантов двигающихся под углом меньше 45° или больше 135° по отношению к направлению движения ядра Be . Стрелкой отмечена энергия 3368 кэВ, где ожидалось обнаружить пик гамма квантов испущенных покоящимся ядром ^{10}Be .

В работе отмечено, что полученное угловое распределение гамма квантов, испущенных ^{10}Be , демонстрирует преимущественный вылет гамма квантов в направлении ортогональном направлению движения ядра ^{10}Be . Такой результат диаметрально отличается от углового распределения гамма квантов, испускаемых осколками в двойном делении, когда наблюдается преимущественный вылет гамма квантов в направлении движения осколков. Он также означает, что вектор спина ^{10}Be преимущественно ориентирован в направлении движения ядра.

Регистрация гамма квантов, испускаемых ЛЗЧ, позволяет получить заселенность возбужденных уровней и, как следствие, позволяет оценить температуру в шейке делящегося ядра в момент ее разрыва. Действительно, если допустить, что статистическое равновесие имеет место в ядре в момент разрыва, то вероятность заселения уровней в ЛЗЧ может быть описана, в первом приближении, распределением Больцмана. Подробный анализ, выполненный в работе, позволил оценить отношение заселенности уровня 2^+ к 0^+ в ^{10}Be , как $0,160 \pm 0,025$. Полученная заселенность позволяет оценить температуру как $1,0 \pm 0,1$ МэВ.

Поставленный эксперимент позволил также изучить выходы коррелированных пар и отдельных осколков деления в совпадении с вылетом ЛЗЧ

различного типа. Действительно, регистрация множественных гамма квантов в совпадении с ЛЗЧ позволила использовать методику гамма - гамма совпадений для идентификации пар осколков деления. Ограниченная статистика позволила использовать данный подход только для случая регистрации ядер *He*. В построенной матрице гамма – гамма совпадений было идентифицировано 150 двумерных гамма пиков, для четырех зарядовых групп осколков *Ce-Sr*, *Ba-Zr*, *Xe-Mo* и *Te-Ru*.

В случае более тяжелых ЛЗЧ, полученная статистика не позволила использовать метод гамма – гамма совпадений. Для случаев вылета ядер *Be* и *C* были построены линейные спектры гамма квантов, в которых были идентифицированы пики от отдельных осколков деления. В результате были получены независимые выходы 38 осколков, для тройного деления с вылетом *Be*, и 35 осколков, для тройного деления с вылетом *C*.

Суммируя выходы отдельных изотопов, были получены распределения по *Z* осколков для тройного деления ^{252}Cf , сопровождаемого вылетом ядер *He*, *Be* и *C*. Эти распределения приведены на рис. 8.

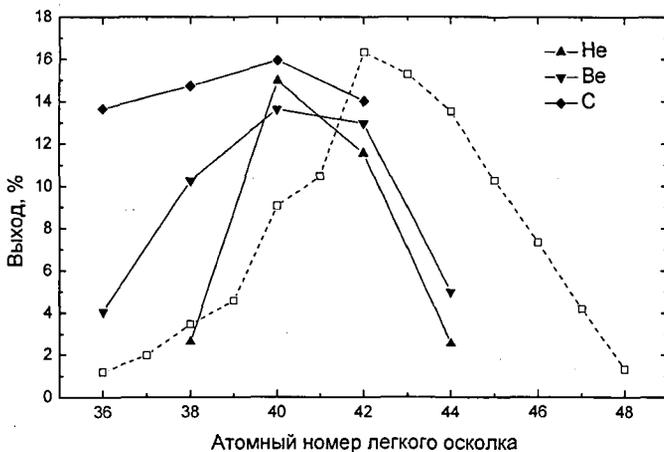


Рисунок 8. Выход осколков деления с различным атомным номером в тройном делении. Пунктирная линия показывает данные для бинарного деления, взятые из литературы.

Основные результаты работы

1. Развита новая методика исследования деления ядер, основанная на регистрации множественных мгновенных гамма-квантов, испускаемых парными осколками.
2. Разработана методика и написана программа обработки сложных двухмерных спектров гамма-гамма совпадений. Корректные оценки интенсивностей гамма-совпадений были обеспечены тщательным учетом всех фоновых составляющих двухмерного спектра.
3. Впервые определены независимые выходы для 135 пар нуклидов, образующихся при спонтанном делении ^{252}Cf : $Z_L/Z_H = 46/52(\text{Pd}-\text{Te})$, $44/54(\text{Ru}-\text{Xe})$, $42/56(\text{Mo}-\text{Ba})$, $40/58(\text{Zr}-\text{Ce})$, $38/60(\text{Sr}-\text{Nd})$. Надежность наших данных подтверждается сравнением (полученных из наших данных) изотопных распределений и элементных выходов осколков с литературными данными.
4. Впервые получены распределения множественности нейтронов для пяти зарядовых разделений ^{252}Cf . Распределения множественности нейтронов непосредственно извлекаются из данных о выходах пар осколков. Данный подход к измерению является прямым в отличие от традиционных способов получения распределения множественности нейтронов. Средние множественности нейтронов для $\text{Pd}-\text{Te}$, $\text{Ru}-\text{Xe}$, $\text{Mo}-\text{Ba}$ и $\text{Zr}-\text{Ce}$ разделений по зарядам хорошо согласуются с результатами других работ.
5. Предложена модель и разработана программа определения характеристик первичных осколков деления из данных по выходам пар осколков. Показано, что наши данные по выходам пар осколков для $\text{Xe}-\text{Ru}$ и $\text{Ce}-\text{Zr}$ зарядовых разделений хорошо описываются одной модой деления. В то же время описание данных полученных для $\text{Ba}-\text{Mo}$ зарядового деления приводит к выводу о существовании двух мод деления.
6. Измерены энергетические спектры легких заряженных частиц, образующихся в тройном делении ^{252}Cf , и оценены параметры этих распределений без привлечения дополнительных гипотез о поведении распределений при значениях энергий близких к нулю.
7. В тройном делении с вылетом ^{10}Be впервые измерена величина, $N(2^+)/N(0^+) = 0.160 \pm 0.025$, представляющая собой отношение вероятности заселения первого возбужденного уровня 2^+ ядра ^{10}Be с энергией 3368 кэВ к вероятности образования ^{10}Be при тройном делении ^{252}Cf . Измеренное отношение $N(2^+)/N(0^+)$ дало возможность оценки (в предположении применимости распределения Больцмана) температуры в шейке делящегося ядра ^{252}Cf , установившейся к моменту разрыва. Полученная оценка температуры составляет 1.0 ± 0.1 МэВ.

8. Результаты, полученные в исследовании тройного деления ^{252}Cf , показали отсутствие реализации тройной ядерной системы, состоящей из двух осколков деления и ядра ^{10}Be , при условии, что ускоренные ядра Be имеют кинетическую энергию выше 21 МэВ.
9. Впервые измерено угловое распределение гамма квантов, испущенных ядрами ^{10}Be при тройном делении. Продемонстрирована анизотропия угла вылета гамма квантов из ядра ^{10}Be по отношению к направлению движения ядра. Преимущественный вылет гамма квантов в направлении ортогональном движению ядра ^{10}Be может означать, что спин ядра ^{10}Be ориентирован в направлении его движения.
10. Впервые получены независимые выходы пар осколков для тройного деления ^{252}Cf , сопровождаемого вылетом ядер He . Также, впервые, получены независимые выходы осколков деления для случая вылета ядер He , Be и C .

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. Ter-Akopian, G. M., Oganessian, Yu. Ts., Popeko, G. S., Daniel, A. V., Hamilton, J. H., Butler-Moore, K., Ramayya, A. V., Ma, W. C., Kormicki, J., Lu, Q., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Kliman, J., Polhorsky, V., Morhac, M., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K. Yields of correlated fragments pairs in spontaneous fission of ^{252}Cf // Bulletin of the American Physical Society - 1993. - Vol. 38, No. 9. - P. 1806.
2. Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Kormicki, J., Popeko, G. S., Daniel, A. V., Ramayya, A. V., Lu, Q., Butler-Moore, K., Ma, W. C., Deng, J. K., Shi, D., Kliman, J., Polhorsky, V., Morhac, M., Greiner, W., Sandulesku, A., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K. Neutron multiplicities and yields of correlated Zr-Ce and Mo-Ba fragment pairs in spontaneous fission of ^{252}Cf // Physical Review Letters - 1994. - Vol. 73, No. 11. - P. 1477-1480.
3. Hamilton, J. H., Kormicki, J., Lu, Q., Shi, D., Butler-Moore, K., Ramayya, A. V., Ter-Akopian, G. M., Oganessian, Yu. Ts., Popeko, G. S., Daniel, A. V., Zhu, S. J., Wang, M. G., Kliman, J., Polhorsky, V., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Greenwood, R. C., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K. Neutron multiplicities in spontaneous fission and nuclear structure studies // NATO Advanced Study Inst. on Frontier Topics in Nucl. Physics - ed. W. Scheid, A. Sandulesku - New York: Plenum Press, 1994. - P. 101-112.
4. Ter-Akopian, G. M., Oganessian, Yu. Ts., Popeko, G. S., Daniel, A. V., Hamilton, J. H., Kormicki, J., Ramayya, A. V., Lu, Q., Butler-Moore, K., Ma, W. C., Deng, J. K., Shi, D., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Kliman, J.,

- Polhorsky, V., Morhac, M., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K. Neutron multiplicities and yields of correlated fragment pairs in spontaneous fission of ^{252}Cf // Heavy Ion Physics, Scientific Report 1993-1994 - ed. B. I. Pustylnik - Dubna: JINR, 1995. - P. 47-48.
5. Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Kormicki, J., Popeko, G. S., Ramayya, A. V., Lu, Q., Butler-Moore, K., Ma, W. C., Deng, J. K., Shi, D., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Babu, B. R. S., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K. Yields of correlated fragment pairs obtained for the spontaneous fission of ^{252}Cf nuclei // Известия РАН, сер. физическая - 1996. - Т. 60, № 1. - С. 162-166.
 6. Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Kormicki, J., Ramayya, A. V., Popeko, G. S., Babu, B. R. S., Lu, Q., Butler-Moore, K., Ma, W. C., Cwiok, S., Nazarevich, W., Deng, J. K., Shi, D., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K., Saladin, J. X. New spontaneous fission mode for ^{252}Cf : indication of hyperdeformed $^{144,145,146}\text{Ba}$ at scission // Physical Review Letters - 1996. - Vol. 77, No. 1. - P. 32-35.
 7. Тер-Акопян, Г. М., Гамильтон, Дж., Оганесян, Ю. Ц., Даниэль, А. В., Кормицки, Я., Попеко, Г. С., Рамайя, А. В., Лу, Ч., Батлер-Мур, К., Ма, В. Ч., Денг, Дж. К., Ши, Д., Климан, Я., Морхач, М., Коул, Дж. Д., Арьяйнейад, Р., Жу, С. Дж., Бабу, Б. Р. С., Джонсон, Н. П., Ли, Л. Я., Макгоуэн, Ф. К. Выходы коррелированных пар осколков спонтанного деления ядер ^{252}Cf // Известия РАН, сер. физическая - 1996. - Т. 60, № 1. - С. 162-168.
 8. Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Popeko, G. S., Kormicki, J., Ramayya, A. V., Butler-Moore, K., Ma, W. C., Lu, Q., Deng, J. K., Kliman, J., Polhorsky, V., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K. Yields of correlated fission fragment pairs // International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM 95), Arles, France - ed. M. de Saint Simon, O. Sorlin - Frontiers, 1996. - P. 383-388.
 9. Hamilton, J. H., Ter-Akopian, G. M., Oganessian, Yu. Ts., Kormicki, J., Zhu, S. J., Wang, M. G., Lu, Q., Butler-Moore, K., Ramayya, A. V., Ma, W. C., Babu, B. R. S., Shi, D., Deng, J. K., Popeko, G. S., Daniel, A. V., Greiner, W., Sandulescu, A., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Kliman, J., Polhorsky, V., Morhac, M., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K., Peker, L. K. Structure of neutron rich nuclei and neutron multiplicities in spontaneous fission // Physics Report - 1996. - Vol. 264. - P. 215-231.
 10. Hamilton, J. H., Ter-Akopian, G. M., Ramayya, A. V., Kormicki, J., Babu, B. R. S., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Zhu, S. J., Wang, M. G., Deng, J. K., Ma, W. C., Ginter, T. N., Popeko, G. S., Lu, Q., Rasmussen, J. O., Asztalos, S., Lee, I. Y., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Stoyer, M. A., Loughheed, R. W., Moody, K. J.,

- Wild, J. F., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M. Evidence for hyperdeformation and new band structures in neutron-rich nuclei // Workshop on Gammasphere Physics, Berkeley, USA - ed. M. Delaplanque, I. Y. Lee, A. O. Macchiavelli - Singapore: World Scientific, 1996. - P. 200-211.
11. Daniel, A. V., Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Kormicki, J., Popeko, G. S., Ramayya, A. V., Ma, W. C., Babu, B. R. S., Ginter, T. N., Zhu, S. J., Rasmussen, J. O., Stoyer, M. A., Lee, I. Y., Asztalos, S., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M. New characteristics of the ^{252}Cf spontaneous fission // International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy - ed. G. Reffo, A. Ventura, C. Grandi - Bologna, Italy: Italian Physical Society, 1997. - Vol. 59. - P. 468-472.
 12. Daniel, A. V., Ter-Akopian, G. M., Popeko, G. S., Oganessian, Yu. Ts., Hamilton, J. H., Kormicki, J., Ramayya, A. V., Lu, Q., Butler-Moore, K., Babu, B. R. S., Deng, J. K., Shi, D., Ma, W. C., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K. A new method to obtain the characteristics of primary fission fragments // Heavy Ion Physics. Scientific Report 1995-1996 - ed. B. I. Pustylnik - Dubna: JINR, 1997. - P. 83-84.
 13. Даниэль, А. В., Попеко, Г. С., Тер-Акопьян, Г. М. Возможности анализа двойных $\gamma\gamma$ -совпадений // Сообщение ОИЯИ: P10-97-109 - Дубна: ОИЯИ, 1997.
 14. Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Hwang, J. K., Kormicki, J., Babu, B. R. S., Sandulesku, A., Florescu, A., Greiner, W., Ter-Akopian, G. M., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Zhu, S. J., Wang, M. G., Ginter, T. N., Deng, J. K., Ma, W. C., Popeko, G. S., Lu, Q., Jones, E. F., Dodder, R., Gore, P., Nazarevich, W., Rasmussen, J. O., Asztalos, S., Lee, I. Y., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Stoyer, M. A., Loughheed, R. W., Moody, K. J., Wild, J. F., Bernstein, L. A., Backer, J.A., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M., Butler-Moore, K., Donangelo, R., Griffin, H. C. New cold and ultra hot binary and cold ternary spontaneous fission modes for ^{252}Cf and new band structures with Gammasphere // Int. School on Nuclear Physics, Erice, Italy- Progress in Particle and Nuclear Physics, 1997. - Vol. 38. - P. 273-287.
 15. Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Ter-Akopian, G. M., Hwang, J. K., Kormicki, J., Babu, B. R. S., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Zhu, S. J., Wang, M. G., Ginter, T. N., Deng, J. K., Ma, W. C., Popeko, G. S., Lu, Q., Jones, E. F., Dodder, R., Gore, P., Rasmussen, J. O., Asztalos, S., Lee, I. Y., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Stoyer, M. A., Loughheed, R. W., Moody, K. J., Wild, J. F., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M., Butler-Moore, K. New binary and ternary spontaneous modes for ^{252}Cf and new band structures with

- Gammasphere // Fourteenth International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, Denton, TX, USA - ed. J. L. Duggen, I. L. Morgan - AIP Conference Proceedings, 1997. - Vol. 392. - P. 309-312.
16. Hamilton, J. H., Ter-Akopian, G. M., Ramayya, A. V., Daniel, A. V., Kormicki, J., Babu, B. R. S., Zhu, S. J., Wang, M. G., Ginter, T. N., Deng, J. K., Ma, W. C., Popeko, G. S., Lu, Q., Rasmussen, J. O., Asztalos, S., Lee, I. Y., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Stoyer, M. A., Loughheed, R. W., Moody, K. J., Wild, J. F., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M., Donangelo, R., Greiner, W., Sandulesku, A. New insights into the fission process: neutron multiplicities, hyperdeformation, clustering and nuclear structure // Int. Conf. on Nuclear Physics at the Turn of the Millennium: Structure of Vacuum and Elementary Matter, Wilderness, South Africa - ed. H. Stocker, A. Gallmann, J. H. Hamilton - Singapore: World Scientific, 1997. - P. 33-44.
 17. Тер-Акопьян, Г. М., Оганесян, Ю. Ц., Попеко, Г. С., Даниэль, А. В., Гамильтон, Дж., Кормицки, Я., Рамайя, А. В., Ма, В. Ч., Бабу, Б. Р. С., Гинтер, Т., Жу, С. Дж., Расмуссен, Дж., Стойер, М., Ли, Л. Я., Ашталос, С., Чу, С. Я., Грегорич, К. Е., Макиавели, А. О., Мохар, М. Ф., Пруссин, С., Климан, Я., Морхач, М., Коул, Дж. Д., Арьяйнейад, Р., Дардене, Я. К., Дригер, М. Выходы пар осколков и характеристики спонтанного деления ^{252}Cf // XLVI Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре ядра, Москва, Россия - Известия РАН, сер. физическая, 1997. - Т. 61, № 4. - С. 746-751.
 18. Тер-Акопьян, Г. М., Оганесян, Ю. Ц., Даниэль, А. В., Попеко, Г. С., Гамильтон, Дж., Кормицки, Я., Рамайя, А. В., Климан, Я., Расмуссен, Дж. Экспериментальные методы исследования спонтанного и низкоэнергетического деления ядер // Физика элементарных частиц и атомного ядра - 1997. - Т. 28, № 6. - С. 1357-1388.
 19. Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Kormicki, J., Ramayya, A. V., Popeko, G. S., Babu, B. R. S., Lu, Q., Butler-Moore, K., Ma, W. C., Jones, E. F., Deng, J. K., Shi, D., Kliman, J., Polhorsky, V., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K. Yields of correlated fragment pairs in spontaneous fission of ^{252}Cf // Physical Review C - 1997. - Vol. 55, No. 3. - P. 1146-1161.
 20. Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Popeko, G. S., Oganessian, Yu. Ts., Hamilton, J. H., Kormicki, J., Ramayya, A. V., Ma, W. C., Babu, B. R. S., Ginter, T. N., Zhu, S. J., Rasmussen, J. O., Stoyer, M. A., Lee, I. Y., Asztalos, S., Chu, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M. New experimental data for $^{252}\text{Cf}(s.f.)$ // Heavy Ion Physics. Scientific Report 1995-1996 - ed. B. I. Pustylnik - Dubna: JINR, 1997. - P. 77-78.
 21. Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Kormicki, J., Popeko, G. S., Ramayya, A. V., Lu, Q., Butler-Moore, K., Ma,

- W. C., Deng, J. K., Shi, D., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Babu, B. R. S., Johnson, N. R., Lee, I. Y., MacGowan, F. K. New spontaneous fission mode for ^{252}Cf // Heavy Ion Physics. Scientific Report 1995-1996 - ed. B. I. Pustyl'nik - Dubna: JINR, 1997. - P. 79-80.
22. Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Kormicki, J., Ramayya, A. V., Popeko, G. S., Ma, W. C., Babu, B. R. S., Ginter, T. N., Zhu, S. J., Rasmussen, J. O., Stoyer, M. A., Lee, I. Y., Asztalos, S., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M. New characteristics of the ^{252}Cf spontaneous fission obtained with large gamma ray detector arrays // International Symposium on Large-Scale Collective Motion of Atomic Nuclei, Brolo, Messina, Italy - ed. G. Giardina, G. Fazio, M. Latuada - Singapore: World Scientific, 1997. - P. 623-632.
 23. Daniel, A. V., Hamilton, J. H., Kormicki, J., Ramayya, A. V., Beyer, C. J., Hwang, J. K., Ginter, T. N., Zhu, S. J., Ter-Akopian, G. M., Oganessian, Yu. Ts., Popeko, G. S., Ma, W. C., Rasmussen, J. O., Stoyer, M. A., Lee, I. Y., Asztalos, S., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M., Macleod, R. W. Primary fission fragment distribution obtained with modern HPGe detectors // Bulletin of the American Physical Society - 1998. - Vol. 43. - P. 1176-1.
 24. Daniel, A. V., Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Kormicki, J., Popeko, G. S., Ramayya, A. V., Ma, W. C., Babu, B. R. S., Ginter, T. N., Zhu, S. J., Rasmussen, J. O., Stoyer, M. A., Lee, I. Y., Asztalos, S., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M. Characteristics of the primary fission fragments obtained with HPGe detectors // International conference on fission and properties of neutron-rich nuclei, Sanibel Island, FL, USA - ed. J. H. Hamilton, A. V. Ramayya - Singapore: World Scientific, 1998. - P. 624-626.
 25. Daniel, A. V., Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Kormicki, J., Popeko, G. S., Ramayya, A. V., Ma, W. C., Babu, B. R. S., Ginter, T. N., Zhu, S. J., Rasmussen, J. O., Stoyer, M. A., Lee, I. Y., Asztalos, S., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M. New fission mode of the ^{252}Cf obtained with modern HPGe detectors // Tours symposium on nuclear physics III, Tours, France - ed. M. Arnould, M. Lewitowicz, Yu. Ts. Oganessian, M. Ohta, H. Utsunomiya, T. Wada - Woodbury, New York: AIP Conference Proceedings, 1998. - Vol. 425. - P. 202-211.
 26. Ramayya, A. V., Hamilton, J. H., Hwang, J. K., Peker, L. K., Kormicki, J., Babu, B. R. S., Ginter, T. N., Sandulescu, A., Florescu, A., Carstoiu, F., Greiner, W., Ter-Akopian, G. M., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Ma,

- W. C., Varnette, P. G., Rasmussen, J. O., Asztalos, S., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Macleod, R. W., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Butler-Moore, K., Drigert, M., Stoyer, M. A., Bernstein, L. A., Loughheed, R. W., Moody, K. J., Prussin, S. G., Zhu, S. J., Griffin, H. C., Donangelo, R. Cold (neutronless) alpha ternary fission of ^{252}Cf // *Physical Review C* - 1998. - Vol. 57, No. 5. - P. 2370-2374.
27. Ramayya, A. V., Hwang, J. K., Hamilton, J. H., Sandulescu, A., Florescu, A., Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Oganessian, Yu. Ts., Popeko, G. S., Greiner, W., Cole, J. D. Observation of ^{10}Be Emission in the cold ternary spontaneous fission of ^{252}Cf // *Physical Review Letters* - 1998. - Vol. 81, No. 5. - P. 947-950.
 28. Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Oganessian, Yu. Ts., Daniel, A. V., Kormicki, J., Ramayya, A. V., Popeko, G. S., Ma, W. C., Babu, B. R. S., Ginter, T. N., Zhu, S. J., Rasmussen, J. O., Stoyer, M. A., Lee, I. Y., Asztalos, S., Chy, S. Y., Gregorich, K. E., Macchiavelli, A. O., Mohar, M. F., Prussin, S. G., Kliman, J., Morhac, M., Cole, J. D., Aryaeinejad, R., Dardenne, Y. X., Drigert, M. New characteristics of the spontaneous fission of ^{252}Cf with large gamma-ray arrays // International conference on fission and properties of neutron-rich nuclei, Sanibel Island, FL, USA - ed. J. H. Hamilton, A. V. Ramayya - World Scientific, Singapore, 1998. - P. 165-174.
 29. Wu, S. C., Donangelo, R., Rasmussen, J. O., Daniel, A. V., Hwang, J. K., Ramayya, A. V., Hamilton, J. H. New determination of the Ba-Mo yield matrix for ^{252}Cf // *Physical Review C* - 2000. - Vol. 62, No. 8. - P. 041601-4.
 30. Ramayya, A. V., Hamilton, J. H., Hwang, J. K., Beyer, C. J., Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Rasmussen, J. O., Wu, S. C., Donangelo, R., Kormicki, J., Zhang, X. Q., Rodin, A. M., Fomichev, A. S., Kliman, J., Krupa, L., Oganessian, Yu. Ts., Chubarian, G., Seweryniak, D., Janssens, R. V. F., Ma, W. C., Piercey, R. B., Cole, J. D. Binary and ternary fission studies with ^{252}Cf // *Progress in Particle and Nuclear Physics* - 2001. - Vol. 46, No. 1. - P. 221-229.
 31. Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Hwang, J. K., Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Ginter, T. N., Beyer, C. J., Kormicki, J., Zhang, X. Q., Rodin, A. M., Fomichev, A. S., Kliman, J., Krupa, L., Jandel, M., Oganessian, Yu. Ts., Greiner, W., Poenaru, D. N., Chubarian, G., Seweryniak, D., Janssens, R. V. F., Rasmussen, J. O., Wu, S. C., Donangelo, R., Ma, W. C., Piercey, R. B., Cole, J. D. Behavior of nuclear matter under extreme conditions in fission // *Acta Physica Hungarica A* - 2001. - Vol. 14, No. 1-4. - P. 161-170.
 32. Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Hwang, J. K., Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Rasmussen, J. O., Wu, S. C., Donangelo, R., Beyer, C. J., Kormicki, J., Zhang, X. Q., Rodin, A. M., Fomichev, A. S., Popeko, G. S., Kliman, J., Krupa, L., Jandel, M., Oganessian, Yu. Ts., Chubarian, G., Seweryniak, D., Janssens, P., Ma, W. C., Piercey, R. B., Greiner, W., Cole, J. D. Cold and hot binary and ternary fission yields in the spontaneous fission of ^{252}Cf // *Ядерная физика* - 2002. - Т. 65, № 4. - С. 677-684.

33. Wu, S. C., Donangelo, R., Rasmussen, J. O., Daniel, A. V., Hwang, J. K., Ramayya, A. V., Hamilton, J. H. Resolution of complex g spectra from triple coincidence data Ba-Mo split in ^{252}Cf // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A - 2002. - Vol. 480, No. 2-3. - P. 776-781.
34. Daniel, A. V., Ter-Akopian, G. M., Popeko, G. S., Fomichev, A. S., Rodin, A. M., Oganessian, Yu. Ts., Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Kormicki, J., Hwang, J. K., Fong, D., Gore, P., Cole, J. D., Jandel, M., Krupa, L., Kliman, J., Rasmussen, J. O., Macchiavelli, A. O., Lee, I. Y., Wu, S. C., Stoyer, M. A., Donangelo, R. Identification of Excited ^{10}Be Clusters Born in Ternary Fission of ^{252}Cf // International Workshop on the New Applications of Nuclear Fission, Bucharest, Romania - ed. A. C. Mueller, M. Mirea, L. Tassan-Got - Singapore: World Scientific, 2004. - P. 41-47.
35. Hamilton, J. H., Zhu, S. J., Ramayya, A. V., Gore, P., Rasmussen, J. O., Jones, E. F., Hwang, J. K., Xu, R. Q., Yang, L. Y., Li, K., Jiang, Z., Zhang, Z., Ziao, S. D., Zhang, X. Q., Kormicki, J., Luo, Y. X., Chaturvedi, L., Ma, W. C., Cole, J. D., Drigert, M., Lee, I. Y., Fallon, P., Stoyer, M. A., Ginter, T. N., Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Oganessian, Yu. Ts., Donangelo, R., Dimitrov, V., Frauendorf, S. New insights into neutron rich nuclei from fission // 8th International Conference on Nucleus-Nucleus Colisions, Moscow, Russia - ed. Yu. Ts. Oganessian, R. Kalpakchieva - Nuclear Physics A, 2003. - Vol. 734. - P. 257-260.
36. Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Daniel, A. V., Popeko, G. S., Fomichev, A. S., Rodin, A. M., Oganessian, Yu. Ts., Cole, J. D., Kormicki, J., Hwang, J. K., Fong, D., Gore, P., Rasmussen, J. O., Macchiavelli, A. O., Lee, I. Y., Stoyer, M. A., Greiner, W., Donangelo, R., Jandel, M., Krupa, L., Kliman, J. Spontaneous fission of ^{252}Cf in the light of prompt gamma rays // 3 International Conference: Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei, Sanibel Island, FL, USA - ed. J. H. Hamilton, A. V. Ramayya, H. K. Carter - River Edge New Jersey: World Scientific, 2003. - P. 535-542.
37. Daniel, A. V., Ter-Akopian, G. M., Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Kormicki, J., Popeko, G. S., Fomichev, A. S., Rodin, A. M., Oganessian, Yu. Ts., Cole, J. D., Hwang, J. K., Luo, Y. X., Fong, D., Gore, P., Jandel, M., Kliman, J., Krupa, L., Rasmussen, J. O., Wu, S. C., Lee, I. Y., Stoyer, M. A., Donangelo, R., Greiner, W. Ternary fission of ^{252}Cf : 3368 keV γ radiation from ^{10}Be // Physical Review C - 2004. - Vol. 69, No. 4. - P. 041305(R)-4.
38. Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Fomichev, A. S., Popeko, G. S., Rodin, A. M., Oganessian, Yu. Ts., Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Kormicki, J., Hwang, J. K., Fong, D., Gore, P., Cole, J. D., Jandel, M., Kliman, J., Krupa, L., Rasmussen, J. O., Lee, I. Y., Macchiavelli, A. O., Fallon, P., Stoyer, M. A., Donangelo, R., Wu, S. C., Greiner, W. New data on the ternary fission of ^{252}Cf from the Gammasphere facility // International Conference "Nuclear Structure and Related Topics", Dubna, Russia - Ядерная физика, 2004. - T. 67. - C. 1860-1865.

39. Ramayya, A. V., Hamilton, J. H., Hwang, J. K., Gore, P., Jones, E. F., Fong, D., Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Rasmussen, J. O., Donangelo, R., Kormicki, J., Zhang, X. Q., Rodin, A. M., Fomichev, A. S., Kliman, J., Krupa, L., Cubarian, G., Cole, J. D. Nuclear fission and structure studies with Gammasphere // NATO Advanced Study Institute Conference, Structure and Dynamics of Elementary Matter, Kemer, Turkey - ed. W. Greiner, M. Itkis, M. C. Guclu - Kluwer Academic Publishers, 2004. - Vol. 166. - P. 551-560.
40. Ramayya, A. V., Hwang, J. K., Hamilton, J. H., Zhu, S. H., Fong, D., Gore, P., Jones, E. F., Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Rasmussen, J. O., Luo, Y. X., Cole, J. D. Study of neutron-rich nuclei with ^{252}Cf // DAE-BRNS Symposium on Nuclear Physics- Mumbai, India, 2004. - P. 35-46.
41. Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Fomichev, A. S., Popeko, G. S., Rodin, A. M., Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Kormicki, J., Hwang, J. K., Fong, D., Gore, P., Rasmussen, J. O., Lee, I. Y., Macchiavelli, A. O., Fallon, P., Cole, J. D., Greiner, W. New experimental approach to ternary fission relying on the γ -ray spectroscopy // NATO Advanced Study Institute Conference, Structure and Dynamics of Elementary Matter, Kemer, Turkey - ed. W. Greiner, M. Itkis, J. Reinhardt, M. C. Guclu - Kluwer Academic Publishers, 2004. - Vol. 166. - P. 523-534.
42. Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Hwang, J. K., Zhu, S. J., Luo, Y. X., Rasmussen, J. O., Gore, P., Jones, E. F., Fong, D., Li, K., Beyer, C. J., Chaturvedi, L., Xu, R. Q., Yang, L. M., Jiang, Z., Zhang, Z., Xiao, S. D., Zhang, X. Q., Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Oganessian, Yu. Ts., Dimitrov, V., Frauendorf, S., Gelberg, A., Kormicki, J., Gilat, J., Lee, I. Y., Fallon, P., Ma, W. C., Cole, J. D., Drigert, M., Stoyer, M. A., Ginter, T. N., Wu, S. C., Donangelo, R. Shape coexistence, triaxiality, chiral bands in neutron-rich nuclei and hot fission mode // International Symposium On Exotic Nuclei Peterhof, Russia - ed. Yu. E. Penionzhkevich, E. A. Cherepanov - Singapore: World Scientific, 2005. - P. 357-364.
43. Ter-Akopian, G. M., Daniel, A. V., Popeko, G. S., Fomichev, A. S., Rodin, A. M., Oganessian, Yu. Ts., Jandel, M., Krupa, L., Kliman, J., Hamilton, J. H., Ramayya, A. V., Kormicki, J., Hwang, J. K., Fong, D., Gore, P., Cole, J. D., Rasmussen, J. O., Wu, S. C., Lee, I. Y., Stoyer, M. A., Greiner, W., Donangelo, R. New data on the ternary fission of ^{252}Cf from the gamma-ray spectroscopy // International Symposium on Exotic Nuclei (EXON-2004) - ed. Yu. E. Penionzhkevich, E. A. Cherepanov - Singapore: World Scientific, 2005. - P. 365-368.

Список литературы

1. Nolan, P. J., Beck, F. A., Fossan, D. B. Large arrays of escape-suppressed gamma-ray detectors // Annual Review of Nuclear and Particle Science - 1994. - Vol. 45. - P. 561-607.

2. Cheifetz, E., Jared, R. C., Thompson, S. G., Wilhelmy, J. B. Experimental Information Concerning Deformation of Neutron Rich Nuclei in the A~100 Region // *Physical Review Letters* - 1970. - Vol. 25, No. 1. - P. 38-43.
3. Wilhelmy, J. B., Thompson, S. G., Jared, R. C., Cheifetz, E. Ground-state bands in neutron-rich even Te, Xe, Ba, Ce, Nd and Sm isotopes produced in the fission of ^{252}Cf // *Physical Review Letters* - 1970. - Vol. 25, No. 16. - P. 1122-1125.
4. Cizewski, J. A., Hotchkis, M. A. C., Durell, J. L., Copnell, J., Mowbray, A. S., Fitzgerald, J. B., Phillips, W. R., Ahmad, I., Carpenter, M. P., Janssens, R. V. F., Khoo, T. L., Moore, E. F., Morss, L. R., Benet, P., Ye, D. New N = 84 isotone ^{136}Te // *Physical Review C* - 1993. - Vol. 47, No. 3. - P. 1294-1297.
5. Cheifetz, E., Wilhelmy, J. B., Jared, R. C., Thompson, S. G. Determination of the charge and mass distribution in the fission of ^{252}Cf // *Physical Review C* - 1971. - Vol. 4, No. 5. - P. 1913-1926.
6. Wahl, A. C. Nuclear-charge distribution and delayed-neutron yields for thermal neutron induced fission of ^{235}U , ^{233}U , and ^{239}Pu and for spontaneous fission of ^{252}Cf // *Atomic Data and Nuclear Data Tables* - 1988. - Vol. 39, No. 1. - P. 1-156.
7. England, T. R., Rider, B. F. Evaluation and compilation of fission product yields // LA-UR-3106 - Los Alamos: LANL, 1993.
8. Reisdorf, W., Unik, J. P., Griffin, H. C., Glendenin, L. E. Fission fragment K x-ray emission and nuclear charge distribution for thermal neutron fission of ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu and spontaneous fission of ^{252}Cf // *Nuclear Physics A* - 1971. - Vol. 177, No. 2. - P. 337-378.
9. Nifenecker, H., Signarbieux, C., Babinet, R., Poitou, J. Prompt neutrons from fission // *Symposium on Physics and Chemistry of Fission*, 13-17 August, 1973, Rochester, N.Y., USA - Vienna: IAEA, 1974. - Vol. 2. - P. 117-178.
10. Palameta, G., Waddington, J. C. Background subtraction of (HI, xn[gamma]) coincidence spectra // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* - 1985. - Vol. 234, No. 3. - P. 476-478.
11. Radford, D. C. Background subtraction from in-beam HPGe coincidence data sets // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* - 1995. - Vol. 361, No. 1-2. - P. 306-316.
12. Emelianov, B. A., Kabina, L. P., Kondurov, I. A., Loginov, Y. E., Sushkov, P. A. Direct decomposition of the experimental γ - γ coincidence matrix // *Nuclear Instruments and Methods* - 1980. - Vol. 178, No. 2-3. - P. 555-560.
13. Young, P. G., Arthur, E. D. GNASH: a preequilibrium statistical nuclear model code for calculation of cross sections and emission spectra // LANL report LA-6947 - Los Alamos: LANL, 1977.
14. Bersillon, O. SCAT2: Un programme de modele spherique // Report CEA-N-227 -: Centre d'Etudes de Bruyeres le Chatel, 1981.

15. Walter, R. L., Guss, P. P. . A global optical model for neutron scattering for $A > 53$ and $10 \text{ MeV} < E < 80 \text{ MeV}$. // International Conference Nuclear Data for Basic and Applied Science, Santa Fe, N.M. - Gordon and Breach Science Pub. Inc., 1986. - P. 1079-1090.
16. Yamamuro, N. Nuclear cross section calculations with a simplified-input version of ELIESE-GNASH joint program // International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Mito, Japan - ed. S. Igarasi - Saikon Publ. Co.,Ltd., 1988. - P. 489-492.
17. Raynal, J. Optical model and coupled-channel calculations in nuclear physics // International Atomic Energy Agency report SMR-9/8 - Vienna: IAEA, 1970.
18. Singer, P., Kopach, Yu, Mutterer, M., Klemens, M., Hotzel, A., Schwalm, D., Thirof, P., Hesse, M. New results on γ emission in binary and ternary fission of ^{252}Cf // Dynamical aspects of nuclear fission - ed. J. Kliman, B. I. Pustylnik - Dubna: JINR, 1996. - P. 262-269.

Получено 22 декабря 2008 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 23.12.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 2,37. Уч.-изд. л. 2,99. Тираж 100 экз. Заказ № 56450.

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

E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/