

ДЕТЕКТИРУЮЩАЯ СИСТЕМА SFiNx

*A. B. Исаев^{a, 1}, A. B. Еремин^{a, b}, Н. И. Замятин^a, И. Н. Изосимов^a,
A. A. Кузнецова^a, О. Н. Малышев^{a, b}, Р. С. Мухин^a, А. Г. Попеко^{a, b},
Ю. А. Попов^{a, b}, Б. Сайлаубеков^{a, b}, А. И. Свирихин^{a, b}, Е. А. Сокол^a,
М. С. Тезекбаева^{a, b}, Д. А. Тестов^a, М. Л. Челноков^a, В. И. Чепигин^a,
С. Анталик^e, П. Мошат^e, П. Брионе^d, Б. Галл^d, О. Дорво^d,
К. Кессаси^d, А. Селлам^d, А. Лопез-Мартенс^e, К. Хошилд^e*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^b Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

^c Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

^d Университет им. Я. Коменского, Братислава

^e IPHC, IN2P3-CNRS, Страсбург, Франция

^e IJCLab, IN2P3-CNRS, Университет Париж-Сакле, Орсэ, Франция

Создана новая детектирующая система для изучения свойств спонтанного деления короткоживущих трансурановых ядер, которая состоит из сборки многостриповых двусторонних Si-детекторов, вокруг которой размещены 116 пропорциональных счетчиков нейтронов, наполненных ${}^3\text{He}$. Эффективность регистрации нейтронов составила $(54.7 \pm 0.1)\%$. Детектирующая система испытана в эксперименте по изучению характеристик спонтанного деления изотопа ${}^{252}\text{No}$, в котором данные о выходах нейтронов спонтанного деления сравнивались с опубликованными ранее результатами. Получены среднее число нейтронов на одно деление ($\bar{\nu} = 4.25 \pm 0.09$) и распределение нейтронов по множественностям, для последнего также произведено восстановление истинной формы методом статистической регуляризации.

A new detector system aimed at studying spontaneous fission properties of short-lived transuranium nuclei was created. This system consists of an assembly of DSSSD surrounded by 116 proportional counters of neutrons filled with ${}^3\text{He}$. Single neutron registration efficiency was measured as $(54.7 \pm 0.1)\%$. The detector system was tested in the experiment to study the characteristics of spontaneous fission of the ${}^{252}\text{No}$ isotope. The neutron yields data from current experiment were compared with the previously published results. The average number of neutrons per fission act ($\bar{\nu} = 4.25 \pm 0.09$) and prompt neutrons multiplicity distribution were obtained. The true form of neutrons distribution was also restored using statistical regularization method.

PACS: 25.85.Ca; 25.70.-z; 27.90.+b; 29.40.Cs; 29.40.Gx

¹E-mail: isaev@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова накоплен значительный опыт в области исследования свойств спонтанного деления тяжелых ядер с $Z \geq 100$ [1]. На электростатическом сепараторе ВАСИЛИСА [2], и в дальнейшем на фильтре скоростей SHELS [3], ранее были получены данные по важным характеристикам деления нейтронодефицитных изотопов Fm [4, 5], No [6, 7] и Rf [8, 9]. В предыдущих экспериментах для измерения характеристик спонтанного деления использовалась сборка из кремниевых полупроводниковых детекторов в форме колодца [10] с размером фокального детектора 60×60 мм, которую окружали 54 ^3He -счетчика нейтронов [11].

В последние годы в экспериментах по спектроскопии тяжелых ядер на сепараторе SHELS, в детектирующем модуле GABRIELA, была успешно опробована новая сборка из двусторонних стриповых Si-детекторов (DSSSD) [12, 13]. Фокальный детектор этой сборки имеет размер 100×100 мм и 128×128 стрипов. За счет увеличенной примерно в три раза площади детектор позволяет захватывать большее число ядер отдачи (ЯО). Применение такого детектора совместно с детектором нейтронов заметно расширяет чувствительность проводимых экспериментов. За счет возросшей эффективности регистрации ЯО такая детектирующая система позволяет регистрировать ядра, образующиеся в реакциях полного слияния с сечениями в несколько пикобарн. Однако увеличенный размер вакуумной камеры нового DSSSD потребовал существенной переработки конфигурации нейтронного детектора.

ГЕОМЕТРИЯ

Для автоматизации процесса подбора оптимальной геометрии расположения нейтронных счетчиков на языке Swift была написана программа NeutronGeometry [14]. В данной программе в явном виде можно сформировать требуемую геометрию и конвертировать ее в формат программы Monte Carlo N-Particle Transport Code eXtended (MCNPX) [15] для последующего моделирования прохождения потока нейтронов. Результат моделирования MCNPX обрабатывался в программе для получения данных об эффективности детектора и о среднем времени жизни нейтрона в сборке.

Среднее время жизни нейтрона складывается из времени его замедления до тепловых энергий и времени диффузии до момента захвата ядром ^3He . Данную величину важно знать, поскольку она определяет границу поиска нейтронных событий по времени, с ростом которой увеличивается вероятность случайных совпадений с нейтронным фоном.

Наиболее критичным для создания новой геометрии параметром было число счетчиков нейтронов, необходимых для того, чтобы получить высокую эффективность. Другими важными параметрами были размер и форма вакуумной камеры с полупроводниковыми детекторами, вокруг которой планировалось разместить счетчики нейтронов. Вакуумная камера проектировалась из нержавеющей стали практически в форме кубоида с внешним размером $155 \times 155 \times 893$ мм. Исходя из опыта проектирования и использования предыдущего детектора [11] было известно, что счетчики первого слоя дают максимальный вклад в эффективность регистрации при их расположении вблизи вакуумной камеры. Счетчики каждого последующего слоя

должны были максимально перекрывать промежутки, образующиеся между счетчиками предыдущего слоя. Расстояния между слоями выбирались так, чтобы нейтроны успевали замедлиться до тепловых энергий в полиэтилене, но при этом число используемых счетчиков было бы минимальным.

Моделирование множества различных конфигураций привело к оптимальному варианту, давшему максимальную эффективность при использовании 116 счетчиков (рис. 1). Характеристики счетчиков и их количество (для финальной конфигурации нейтронного детектора) приводятся в табл. 1.

Давление ${}^3\text{He}$ для всех типов счетчиков составляло 7 атм. Для компенсации «пространственного» эффекта газовая смесь в счетчиках содержит CO_2 или Ar .

Для расчетов использовалась программа MCNPX версии 2.7.0. Для вычисления эффективности по слоям детектора применялись счета (tallies) типа F4:N (усредненный поток нейронов по ячейке) с соответствующими множителями FM4 для n, p -реакции. Точечный источник, симулирующий спонтанное деление ${}^{248}\text{Cm}$, размещался в центре геометрии. Форма спектра мгновенных нейронов спонтанного деления описывалась формулой Уатта:

$$f(E) = C e^{-E/a} \sinh(\sqrt{bE}),$$

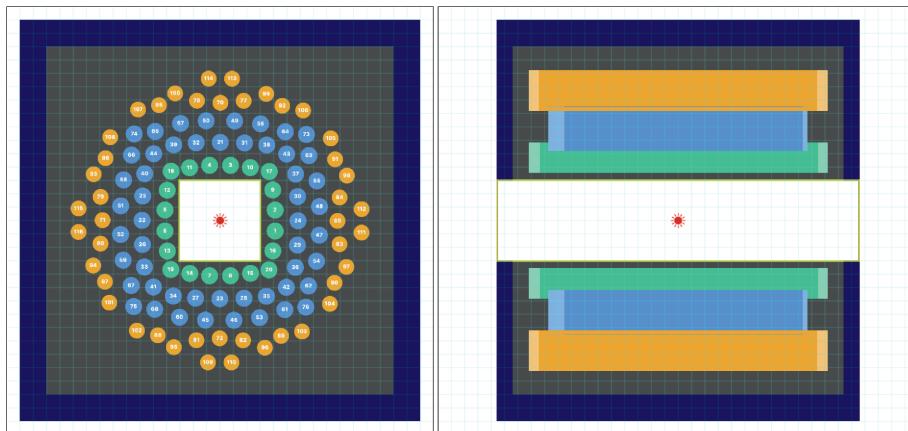


Рис. 1. Окно программы формирования геометрии: вид спереди — слева, вид сбоку — справа. Шаг сетки составляет 25 мм

Таблица 1. Основные характеристики и число счетчиков нейтронов, используемых в сборке

Производитель	Диаметр, мм	Активная длина, мм	Рабочее напряжение, В	Слой	Количество
НПФ «Консенсус»	32	530	1400	1	20
ЛЯР ОИЯИ	32	460	1775	2	24
				3	28
ФГУП «ПО «Маяк»	30	585	1500	4	44

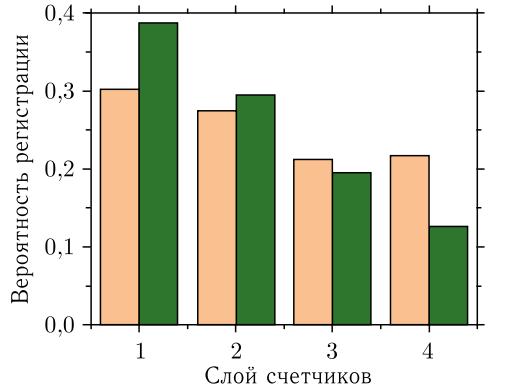


Рис. 2. Рассчитанные вероятности регистрации нейтрона по слоям детектора (левые столбцы) и по счетчику слоя (правые столбцы). Правые столбцы получены путем деления левых на число счетчиков в слое с последующей нормировкой по сумме. Нумерация слоев счетчиков приводится от оси детектора

где C — постоянная нормировки, определяемая MCNPX, и параметры $a = 0,8084 \text{ МэВ}$ и $b = 4,536 \text{ МэВ}^{-1}$, взятые из работы [16]. Оценка эффективности регистрации рассчитывалась для четырех слоев детектора (табл. 1). Суммарная оценка эффективности по всем слоям составила $(60,55 \pm 0,02)\%$ (ошибка метода Монте-Карло). Расчетная зависимость вероятности регистрации единичного нейтрона от слоя детектора приводится на рис. 2. Видно, что с удалением слоя от оси детектора требуется все больше и больше счетчиков, а вклад каждого из счетчиков в суммарную эффективность резко падает.

Для оценки среднего времени жизни нейтрона в сборке использовалась карта времен для счетов (T card). Зависимость суммарного потока нейтронов от времени показана на рис. 3. Значение среднего времени жизни составило $(19,0 \pm 0,1)$ мкс (приводится ошибка фитирования экспонентой).

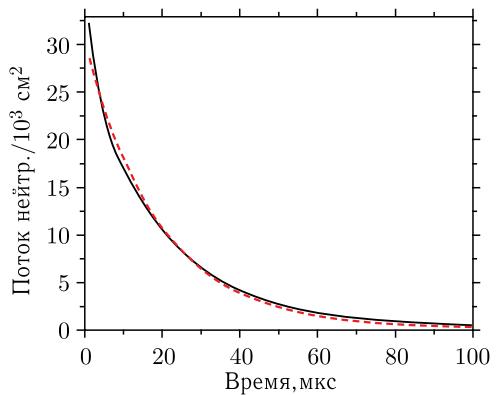
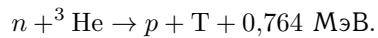


Рис. 3. Поток нейтронов по всем слоям счетчиков в зависимости от времени (сплошная линия). Пунктиром показано фитирование экспонентой

ДЕТЕКТОР

Новая детектирующая система была названа SFiNx (**S**pontaneous **F**ission, **N**eutrons and **X**-rays). Система состоит из 116 ${}^3\text{He}$ -счетчиков нейтронов, расположенных вокруг вакуумной камеры с DSSSD (рис. 4).

Образующиеся в процессе спонтанного деления мгновенные нейтроны замедляются в полиэтилене до тепловой энергии и, попадая в счетчики нейтронов, захватываются ядрами ${}^3\text{He}$. Реакция, сечение которой 5530 б, имеет вид



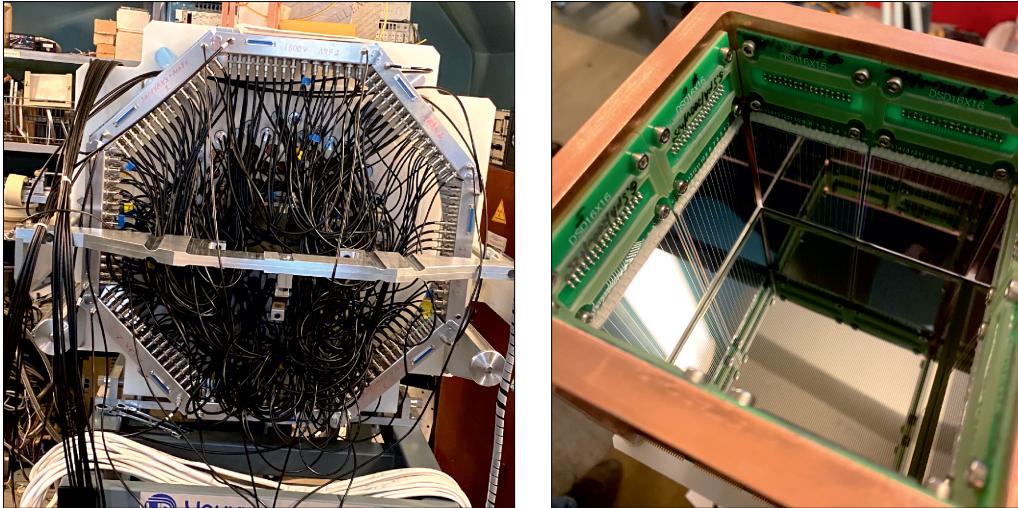


Рис. 4. Сборка из счетчиков нейтронов (слева) и «колодец» из DSSSD (справа)

Замедлитель из полиэтилена изготовлен в виде правильной восьмиугольной призмы высотой 630 мм с диаметром описанной окружности 762 мм. Для защиты от фоновых нейтронов внешняя часть детектора покрыта плитами из борированного (5%) полиэтилена толщиной 50 мм вдоль высоты призмы замедлителя и по 30 мм на ее основаниях.

Счетчики нейтронов окружают вакуумную камеру, внутрь которой была помещена новая сборка из DSSSD. Фокальный кремниевый детектор с конфигурацией 128×128 стрипов имеет размер активной области 100×100 мм и толщину 500 мкм. Перпендикулярно фокальному детектору располагаются 8 кремниевых полупроводниковых детекторов, образующих сборку в виде колодца (рис. 4). Боковые 16×16 -стриповые детекторы имеют размер 50×60 мм, толщину 700 мкм и размещаются попарно вдоль каждой из сторон фокального детектора (в сумме 16 стрипов параллельно и 32 перпендикулярно фокальному детектору).

Исследуемые ЯО, проходя на своем пути через времяпролетные детекторы, имплантируются внутрь фокального DSSSD, где и происходит их последующий распад. С использованием сборки из полупроводниковых детекторов можно производить регистрацию осколков деления и α -частиц. Разрешение детекторов для α -частиц с энергией 8 МэВ составляет 20 и 30 кэВ для фокального и боковых детекторов соответственно. Для уменьшения шумов и улучшения энергетического разрешения сборка из DSSSD смонтирована на охлаждаемом держателе.

С использованием дополнительных линейных усилителей система может быть переведена в режим регистрации электронов, что позволяет использовать фокальный детектор для изучения β -распада и связанных с ним процессов, например, запаздывающего деления [17, 18].

Поскольку процесс спонтанного деления сопровождается испусканием большого количества γ -квантов, совпадения с ними могут являться дополнительным фактором очистки от фоновых импульсов в DSSSD с большой амплитудой. Для регистрации

γ -квантов непосредственно за фокальным DSSSD был установлен сцинтилляционный детектор на основе BGO-кристалла. Эффективность идентификации событий спонтанного деления по совпадению с γ -квантами составляет $\sim 67\%$.

Использование в нейтронном детекторе большого числа счетчиков с различными характеристиками потребовало создания соответствующей многоканальной электронной системы регистрации.

Сигнал от зарядочувствительного предусилителя ${}^3\text{He}$ -счетчика поступает в один из четырех 32-канальных блоков нейтронных событий NeutronTimers32 (NT32). Каждый блок NT32 состоит из двух подблоков (16 дискриминаторов с общим порогом), объединенных одной логической схемой управления.

Время сбора заряда с ${}^3\text{He}$ -счетчика составляет ~ 20 мкс, и если второй нейтрон попадает в момент формирования сигнала, то сигналы не будут разделены. Однако с учетом высокой гранулярности детектора нейтронов вероятность случайных наложений двух сигналов в отдельном счетчике будет исчезающе малой ($< 10^{-7}$).

ТЕСТЫ С ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ

Для проверки работоспособности детектора и уточнения его характеристик были проведены измерения мгновенных нейтронов спонтанного деления ${}^{248}\text{Cm}$. Источник был нанесен на одну из сторон тонкой фольги, которая затем устанавливалась внутри сборки из DSSSD по центру и в 5 мм от фокального детектора.

Оценка содержания ${}^{252}\text{Cf}$ в источнике осуществлялась по спектру α -частиц, а также из паспортных данных источника. Проведенный анализ позволяет не учитывать примесь ${}^{252}\text{Cf}$ при обработке калибровочных данных. Из спектра α -частиц (рис. 5) были извлечены данные о наличии в источнике изотопов ${}^{244}, {}^{246}\text{Cm}$. Принимая во внимание коэффициенты ветвления по пути спонтанного деления для этих ядер, влиянием событий деления этих изотопов можно пренебречь ($7 \cdot 10^{-6}$ и $6 \cdot 10^{-2}$ событий в расчете на одно спонтанное деление ${}^{248}\text{Cm}$ соответственно).

В off-line анализе, при обнаружении осколка деления в данных, производился поиск нейтронных событий в интервале 128 мкс. Окно поиска осколков по энергии подбиралось таким образом, чтобы полностью исключить ложные корреляции с α -частицами из источника. Измеренные вероятности регистрации нейтронов показаны на рис. 6. Можно увидеть довольно хорошее соответствие с расчетными значениями.

Эффективность регистрации одиночных нейтронов была измерена с помощью ${}^{248}\text{Cm}$ -источника. Для определения точного значения эффективности регистрации и ее погрешности применялась реализация нелинейного метода наименьших квадратов (МНК) из библиотеки SciPy [19]. Известные значения распределения нейтронов

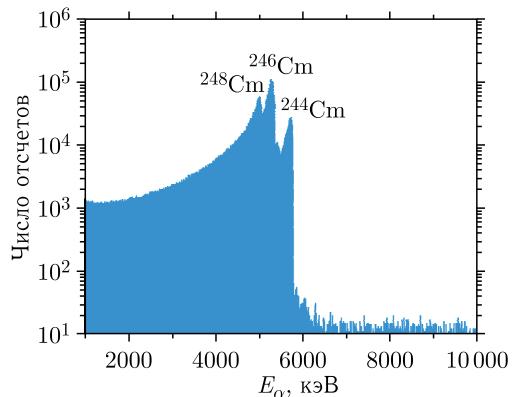


Рис. 5. Спектр α -частиц от источника

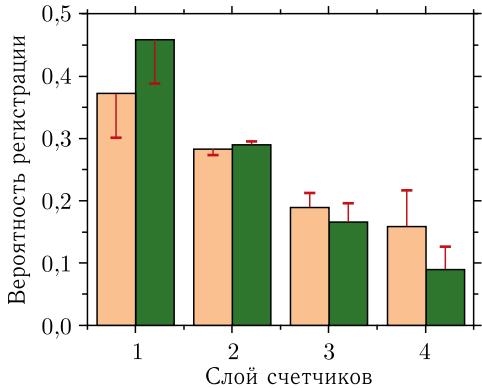


Рис. 6. Измеренные вероятности регистрации нейтрона по слоям детектора (левые столбцы) и по счетчику слоя (правые столбцы). Значения распределений нормированы по их суммам. На графике приводятся отклонения от рассчитанных в MCNPX значений

по множественностям ^{248}Cm [20,21] пропускались через построенную матрицу отклика детектора [22], чтобы получить ожидаемую форму распределения множественностей нейтронов для заданной эффективности детектора. МНК позволял найти такое значение параметра эффективности, при котором минимизировалась сумма квадратов разниц между ожидаемыми и измеренными значениями числа событий для каждой нейтронной кратности. При этом учитывалось, что статистические ошибки измерения числа событий могут отличаться для каждой отдельной кратности (разные веса у событий).

Поскольку для нелинейного МНК большую роль играет выбор стартового значения, было построено распределение χ^2 в зависимости от параметра эффективности (рис. 7). Полученное значение минимума величины χ^2 свидетельствует о допустимости использования процедуры вычисления ожидаемых значений измеренных множественностей нейтронов исходя из известных истинных значений множественностей для ^{248}Cm -источника и эффективности регистрации одиночного нейтрона детектором. Стартовые значения величины эффективности с использованием нелинейного МНК выбирались либо из грубой оценки эффективности (54,6 %), либо из минимума χ^2 .

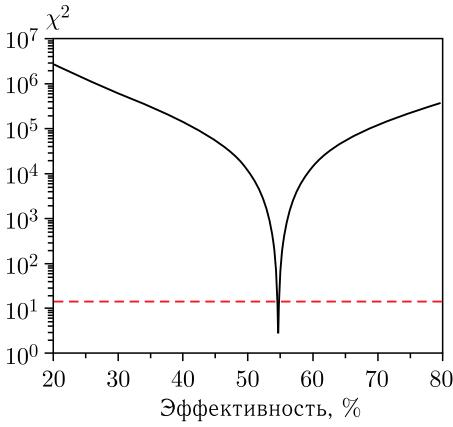


Рис. 7. Распределение χ^2 . Пунктиром указан 5%-й предел

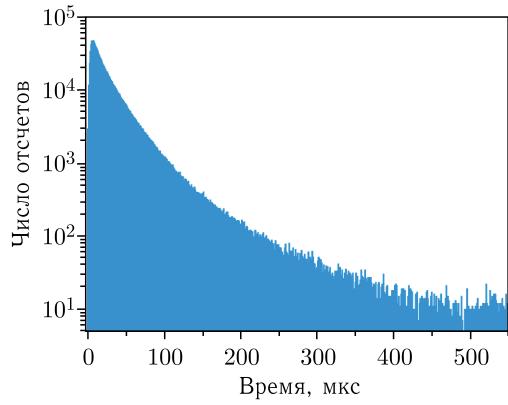


Рис. 8. Распределение нейтронов по времени относительно акта спонтанного деления

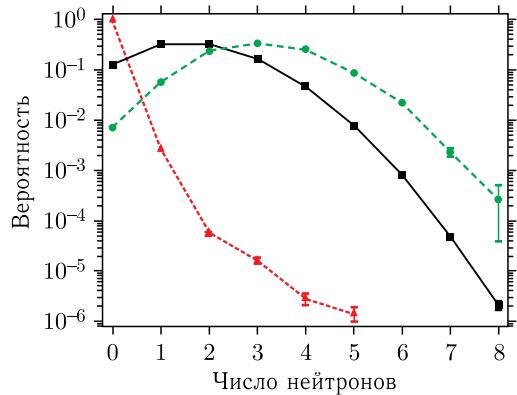


Рис. 9. Сравнение измеренных множественностей фоновых нейтронов (треугольники) и мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{248}Cm (квадраты), а также результат восстановления истинного распределения (круги). Значения распределений нормированы по их суммам. Линии, соединяющие точки, добавлены для наглядности

Грубая оценка эффективности определялась из соотношения между измеренным средним числом нейтронов 1,71 и известным значением среднего числа нейтронов 3,13 для ^{248}Cm [20, 21]. Оба выбора привели к одному значению эффективности регистрации нейтрона детектором ($54,7 \pm 0,1$) % (приводится ошибка МНК).

Полученное значение эффективности регистрации одиночного нейтрона ($54,7 \pm 0,1$) % хорошо согласуется со значением, рассчитанным в MCNPX, ($60,55 \pm 0,02$) %, с учетом того, что источник нейтронов в измерениях не был точечным, а его геометрическое расположение было не идеальным.

Для определения среднего времени жизни нейтрона в сборке было построено распределение значений времени между осколками деления и нейтронами (рис. 8). Среднее время жизни нейтрона в сборке составило ($18,4 \pm 0,2$) мкс (приводится ошибка фитирования экспонентой), что довольно близко к расчетному значению ($19,0 \pm 0,1$) мкс.

Для оценки влияния фона осуществлялся поиск в данных случайных совпадений между осколками деления и нейтронными событиями в «окне» — 128 мкс от осколка (рис. 9). Влияние фона при off-line измерениях эффективности и среднего времени жизни нейтрона в сборке было незначительно.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Детектирующая система SFiNx была впервые применена в ходе тестового эксперимента с получением изотопа ^{252}No на сепараторе SHELS [3] ЛЯР ОИЯИ.

Для синтеза изотопа использовалась реакция полного слияния пучка ионов $^{48}\text{Ca}^{18+}$ из ускорителя У-400 с ядрами ^{206}Pb -мишени. Обогащение мишени ^{206}PbS было 97 % при толщине 350 мкг/см². Материал мишени наносился на подложку из 1,5 мкм титана. Энергия пучка ионов кальция на половине толщины мишени составляла (215 ± 2) МэВ, что соответствовало максимуму функции возбуждения для $2n$ -канала реакции (сечение ~ 800 нб).

ЯО проходили через фильтр скоростей SHELS и имплантировались в фокальный DSSSD, где происходил их последующий распад. Преобладающим для ^{252}No является α -распад ($b_\alpha \approx 0,667$, рис. 10), а коэффициент ветвления по пути спонтанного деления составляет $b_{sf} \approx 0,322$. Детектирующая система сепаратора находится за толстой

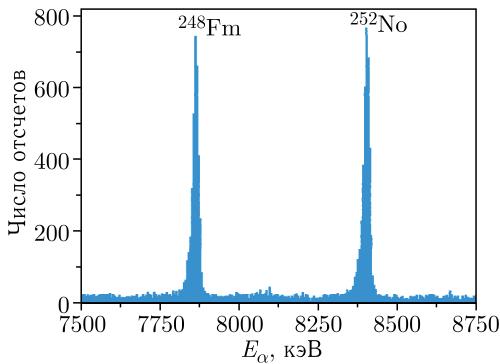


Рис. 10. Спектр α -частиц в области ^{252}No и его дочернего продукта распада ^{248}Fm , полученный за время эксперимента

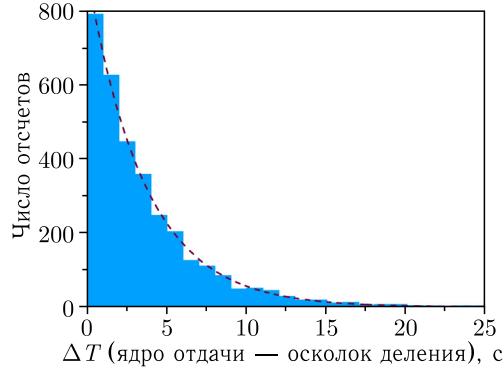


Рис. 11. Распределение разницы во времени между ЯО и осколком деления для ^{252}No

стеной (2 м) из тяжелого железобетона, что значительно снижало фон от нейтронов и γ -квантов, образующихся на цилиндре Фарадея и мишени.

При обнаружении осколка деления в фокальном DSSSD сначала проверялось, есть ли для него совпадение с ЯО, попавшим в ту же область детектора во временном «окне» 1 мс – 25 с ($\sim 10 T_{1/2}$). Для ЯО и осколков деления при этом устанавливались строгие критерии отбора по энергии. Далее искались нейтроны, относящиеся к актам распада во временном «окне» 128 мкс.

Всего было найдено 3260 достоверных событий спонтанного деления ^{252}No . Период полураспада для ^{252}No рассчитывался на основе корреляций «ядро отдача – осколок деления» (рис. 11) и составил $(2,44 \pm 0,05)$ с (приводится ошибка фитирования распределения времен жизни экспонентой), что согласуется с известными значениями $(2,44 \pm 0,04)$ с [23] и $(2,30 \pm 0,22)$ с [24].

Таблица 2. Множественности нейтронов ^{252}No и фона (значения нормированы)

Число нейтронов	Измеренное значение	Ошибка измеренного	Восстановленное значение	Ошибка восстановленного	Фон	Ошибка фона
0	0,069	0,005	0,010	0,008	0,994	0,016
1	0,206	0,008	0,012	0,018	0,006	0,001
2	0,303	0,007	0,081	0,023	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
3	0,245	0,005	0,201	0,024	0	< 0,001
4	0,125	0,003	0,276	0,025	—	—
5	0,041	0,002	0,225	0,024	—	—
6	0,010	0,001	0,122	0,026	—	—
7	0,001	0,001	0,055	0,020	—	—
8	0	< 0,001	0,018	0,021	—	—
9	—	—	0	0,010	—	—
$\bar{\nu}$	4,25	0,09	4,27	0,15	—	—
σ_ν^2	2,1	—	2,2	—	—	—

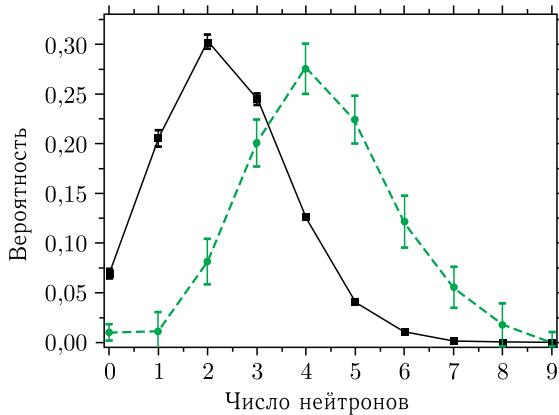


Рис. 12. Измеренный (квадраты) и восстановленный (круги) спектры множественности нейтронов ^{252}No

Измеренное среднее число нейтронов в акте деления ^{252}No составило $(2,32 \pm 0,05)$, что с учетом эффективности нейtronного детектора дает значение среднего числа нейтронов $\bar{\nu} = (4,25 \pm 0,09)$ (содержит статистическую ошибку и погрешность эффективности нейtronного детектора). Полученное значение хорошо согласуется с уже известными $(4,15 \pm 0,30)$ [25], $(4,43 \pm 0,45)$ [26] и $(4,51 \pm 0,25)$ [7].

Методом статистической регуляризации А. Н. Тихонова [27, 28] было произведено восстановление истинного распределения мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{252}No по множественностям. Измеренные и восстановленные множественности нейтронов и их ошибки приводятся в табл. 2 и на рис. 12. Дисперсия измеренного распределения нейтронов с учетом эффективности детектора $\sigma_{\nu}^2 = 2,1$, а для распределения, восстановленного методом статистической регуляризации [22], дисперсия $\sigma_{\nu_r}^2 = 2,2$.

Оценка фоновой множественности производилась в ходе поиска случайных совпадений нейтронов с α -частицами от распада ^{252}No во временном окне 128 мкс (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана новая детектирующая система SFiNx из 116 ^3He -счетчиков нейтронов и сборки из многострочных Si-детекторов. Данная система не имеет аналогов в области исследования свойств спонтанного деления короткоживущих тяжелых ядер. При этом похожие сборки из ^3He -счетчиков используются сейчас в экспериментах по изучению запаздывающего деления [29, 30] и в поиске сверхтяжелых элементов в природе [31].

С использованием ^{248}Cm -источника измерена эффективность регистрации одиночного нейтрона $(54,7 \pm 0,1)\%$ и среднее время жизни нейтрона в сборке $(18,4 \pm 0,2)$ мкс. Более высокая эффективность SFiNx, в сравнении со старым детектором ($\sim 43\%$) [11] позволяет как быстрее набирать статистику, так и лучше восстановить истинное распределение мгновенных нейтронов по множественностям методом статистической регуляризации Тихонова.

В ходе первого эксперимента на установке для нейтронодефицитного изотопа ^{252}No получено среднее число нейтронов $4,25 \pm 0,09$ и вероятности эмиссии нейтронов различной кратности в акте деления.

Применение SFiNx позволит продвинуть исследования в область больших Z , вплоть до сверхтяжелых элементов, где фактически отсутствуют данные о выходах мгновенных нейтронов и о кинетических энергиях осколков деления. Система может быть использована на газонаполненном сепараторе ГНС-3 недавно запущенной фабрики сверхтяжелых элементов ЛЯР ОИЯИ [32–34].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-52-15004) и ОИЯИ (грант 21-502-09 для молодых научных сотрудников: М. С. Тезекбаева).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Itkis M. G., Vardaci E., Itkis I. M., Knyazheva G. N., Kozulin E. M.* Fusion and Fission of Heavy and Superheavy Nuclei (Experiment) // Nucl. Phys. A. 2015. 944. P. 204–237.
2. *Yeremin A. V., Bogdanov D. D., Chepigin V. I., Gorshkov V. A., Kabachenko A. P., Malyshev O. N., Popeko A. G., Sagaidak R. N., Ter-Akopian G. M., Lavrentjev A. Yu.* The Electrostatic Separator VASSILISSA. Performance and Experimental Results // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 126. P. 329–333.
3. *Popeko A. G., Yeremin A. V., Malyshev O. N., Chepigin V. I., Isaev A. V., Popov Yu. A., Svirikhin A. I., Haushild K., Lopez-Martens A., Rezynkina K., Dorvaux O.* Separator for Heavy Element Spectroscopy — Velocity Filter SHELS // Nucl. Instr. Meth. B. 2016. V. 376. P. 140–143.
4. *Svirikhin A. I., Andreev A. V., Dushin V. N., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Gupta M., Isaev A. V., Izosimov I. N., Katrasev D. E., Kuznetsov A. N., Malyshev O. N., Mullins S., Popeko A. G., Sokol E. A., Yeremin A. V.* The Emission of Prompt Neutrons from the Spontaneous Fission of ^{252}No and ^{244}Fm // Eur. Phys. J. A. 2012. V. 48. P. 121–127.
5. *Svirikhin A. I., Dushin V. N., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Izosimov I. N., Katrasev D. E., Malyshev O. N., Minkova A., Popeko A. G., Sokol E. A., Yeremin A. V.* Neutron Multiplicity at Spontaneous Fission of ^{246}Fm // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 44. P. 393–396.
6. *Svirikhin A. I., Andreev A. V., Yeremin A. V., Izosimov I. N., Isaev A. V., Kuznetsov A. N., Kuznetsova A. A., Malyshev O. N., Popeko A. G., Popov Yu. A., Sokol E. A., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Schneidman T. M., Gall B., Dorvaux O., Brione P., Hauschild K., Lopez-Martenz A., Rezynkina K., Mullins S., Jones P., Mosat P.* Characteristics of Spontaneous Fission of ^{250}No // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 4. P. 571–575.
7. *Isaev A. V., Andreev A. V., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Izosimov I. N., Kuznetsova A. A., Malyshev O. N., Mukhin R. S., Popeko A. G., Popov Yu. A., Shneidman T. M., Sokol E. A., Svirikhin A. I., Tezekbayeva M. S., Yeremin A. V., Zamyatin N. I., Brionnet P., Dorvaux O., Gall B., Kessaci K., Sellam A., Hauschild K., Lopez-Martenz A., Antalic S., Mosat P.* Comparative Study of Spontaneous-Fission Characteristics of ^{252}No and ^{254}No Nobelium Isotopes // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18, No. 4. P. 449–456.
8. *Svirikhin A. I., Andreev A. V., Yeremin A. V., Zamyatin N. I., Izosimov I. N., Isaev A. V., Kuznetsov A. N., Kuznetsova A. A., Malyshev O. N., Popeko A. G., Popov Yu. A., Sokol E. A., Tezekbayeva M. S., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Schneidman T. M., Andel B., Antalic S., Bronis A., Mosat P., Gall B., Dorvaux O., Retailleau B. M., Hauschild K., Lopez-Martenz A., Chauveau P., Stefanova E., Tonev D.* Prompt Neutrons from Spontaneous ^{254}Rf Fission // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16, No. 6. P. 768–771.

9. *Svirikhin A.I., Yeremin A.V., Izosimov I.N., Isaev A.V., Kuznetsov A.N., Malyshev O.N., Popeko A.G., Popov Yu.A., Sokol E.A., Chelnokov M.L., Chepigin V.I., Adel B., Asfari M.Z., Gall B., Yoshihiro N., Kalaninova Z., Mullins S., Piot J., Stefanova E., Tonev D.* Spontaneous Fission of ^{256}Rf , New Data // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 4. P. 480–482.
10. *Isaev A.V., Yeremin A.V., Zamyatin N.I., Kuznetsov A.N., Malyshev O.N., Svirikhin A.I., Chelnokov M.L., Chepigin V.I., Hauschild K., Lopez-Martens A., Dorvaux O.* Application of a Double-Sided Stripped Si Detector in the Focal Plane of the VASSILISSA Separator // Instrum. Exp. Tech. 2011. V. 54. P. 37–42.
11. *Svirikhin A.I., Isaev A.V., Yeremin A.V., Kuznetsov A.N., Malyshev O.N., Popeko A.G., Sokol E.A., Chelnokov M.L., Chepigin V.I.* A Detector for Studying the Characteristics of Spontaneous Fission of Short-Lived Heavy Nuclei // Instrum. Exp. Tech. 2011. V. 54. P. 644–648.
12. *Yeremin A.V., Lopes-Martens A., Hauschild K., Popeko A.G., Malyshev O.N., Chepigin V.I., Svirikhin A.I., Isaev A.V., Popov Yu.A., Chelnokov M.L., Kuznetsov A.A., Dorvaux O., Gall B., Asfari Z., Tezekbaeva M., Piot J., Antalic S.* Velocity Filter SHELS: Performance and Experimental Results // Nucl. Instr. Meth. B. 2020. V. 463. P. 219–220.
13. *Chakma R., Hauschild K., Lopez-Martens A., Yeremin A.V., Malyshev O.N., Popeko A.G., Popov Yu.A., Svirikhin A.I., Chepigin V.I., Dorvaux O., Gall B., Kessaci K.* Gamma and Conversion Electron Spectroscopy Using GABRIELA // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 56. P. 245.
14. NeutronGeometry <https://github.com/siberianisaev/NeutronGeometry>
15. *Pelowitz D.B., Durkee J.W., Elson J.S., Fensin M.L., Hendricks J.S., James M.R., Johns R.C., Mc Kinney G.W., Mashnik S.G., Waters L.S., Wilcox T.A., Verbeke J.M.* MCNPX 2.7.0 Extensions // United States: N. p. 2011. Web. doi:10.2172/1058045.
16. *Shores E.F.* Data Updates for the SOURCES-4A Computer Code // Nucl. Instr. Meth. B. 2001. V. 179. P. 78–82.
17. *Skobelev N.K.* Delayed Fission of Atomic Nuclei (To the 50th Anniversary of the Discovery) // Phys. At. Nucl. 2017. V. 80, No. 5. P. 858–866.
18. *Andreyev A.N., Huyse M., Van Duppen P.* Colloquium: Beta-Delayed Fission of Atomic Nuclei // Rev. Mod. Phys. 2013. V. 85, No. 4. P. 1541–1559.
19. SciPy <https://github.com/scipy/scipy/>
20. *Holden N.E., Zucker M.S.* Prompt Neutron Multiplicities for the Transplutonium Nuclides // Radiat. Eff. 1986. V. 96, No. 1–4. P. 289–292.
21. *Vorobyev A.S., Dushin V.N., Hambach F.-J., Jakovlev V.A., Kalinin V.A., Laptev A.B., Petrov B.F., Shcherbakov O.A.* Distribution of Prompt Neutron Emission Probability for Fission Fragments in Spontaneous Fission of ^{252}Cf and $^{244,248}\text{Cm}$ // AIP Conf. Proc. 2005. V. 769. P. 613–616.
22. *Mukhin R.S., Dushin V.N., Eremin A.V., Izosimov I.N., Isaev A.V., Svirikhin A.I.* Reconstruction of Spontaneous Fission Neutron Multiplicity Distribution Spectra by the Statistical Regularization Method // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18, No. 4. P. 439–444.
23. *Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V., Abdullin F.Sh., Polyakov A.N., Shirokovsky I.V., Tsyganov Yu.S., Mezentsev A.N., Iliev S., Subbotin V.G., Sukhov A.M., Subotic K., Ivanov O.V., Voinov A.N., Zagrebaev V.I., Moody K.J., Wild J.F., Stoyer N.J., Stoyer M.A., Lougheed R.W.* Measurements of Cross Sections for the Fusion-Evaporation Reactions $^{204,206,207,208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ and $^{207}\text{Pb} + ^{34}\text{S}$: Decay Properties of the Even–Even Nuclides ^{238}Cf and ^{250}No // Phys. Rev. C. 2001. V. 64. P. 054606.
24. *Bemis C.E., Ferguson R.L., Plasil F., Silva R.J., Pleasonton F., Hahn R.L.* Fragment-Mass and Kinetic-Energy Distributions from the Spontaneous Fission of ^{252}No // Phys. Rev. C. 1977. V. 15. P. 705–712.

25. Lazarev Yu. A., Nefediev O. K., Oganessian Yu. Ts., Dakowski M. Multiplicity of Prompt Neutrons from Spontaneous Fission of the Isotope $^{252}\text{No. 102}$ // Phys. Lett. B. 1974. V. 52, No. 3. P. 321–324.
26. Yeremin A. V., Belozerov A. V., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Gorshkov V. A., Kabanchenko A. P., Malyshev O. N., Popeko A. G., Sagaidak R. N., Shutov A. V., Sokol E. A., Svirikhin A. I. Neutron Detector at the Focal Plane of the Set Up VASSILISSA // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 539. P. 441–444.
27. Turchin V. F. Solution of the Fredholm Equation of the First Kind in a Statistical Ensemble of Smooth Functions // Zh. Vychisl. Mat. Mat. Fiz. 1967. V. 7, No. 6. P. 1270–1284.
28. Turchin V. F., Kozlov V. P., Malkevich M. S. The Use of Mathematical-Statistics Methods in the Solution of Incorrectly Posed Problems // Sov. Phys. Usp. 1971. V. 13, No. 6. P. 681–703.
29. BRIKEN Collab. Commissioning of the BRIKEN Detector for the Measurement of Very Exotic β -Delayed Neutron Emitters // Nucl. Instr. Meth. A. 2019. V. 925. P. 133–147.
30. Testov D. T., Verney D., Roussi  re B., Bettane J., Didierjean F., Flanagan K., Frachoo S., Ibrahim F., Kuznetsova E., Li R., Marsh B., Matea I., Penionzhkevich Yu., Pai H., Smirnov V., Sokol E., Stefan I., Suzuki D., Wilson J. N. The ^3He Long-Counter TETRA at the ALTO ISOL Facility // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 815. P. 96–103.
31. Svirikhin A., Brian  on Ch., Dmitriev S., Oganessian Yu., Sokol E., Testov D., Yeremin A. Neutrons from Spontaneous Fission of Long-Lived Superheavy Nuclei // AIP Conf. Proc. 2009. V. 1175. P. 297–300.
32. Dmitriev S. N., Itkis I. M., Oganessian Yu. Ts. Status and Perspectives of the Dubna Superheavy Element Factory // Eur. Phys. J. Web Conf. 2016. V. 131. P. 08001.
33. Popeko A. G. On-Line Separators for the Dubna Superheavy Element Factory // Nucl. Instr. Meth. B. 2016. V. 376. P. 144–149.
34. Gulbekian G. G., Dmitriev S. N., Itkis M. G., Oganessian Yu. Ts., Gikal B. N., Kalagin I. V., Semin V. A., Bogomolov S. L., Buzmakov V. A., Ivanenko I. A., Kazarinov N. Yu., Osipov N. F., Pashenko S. V., Sokolov V. A., Pchelkin N. N., Prokhorov S. V., Khabarov M. V., Gikal K. B. Start-Up of the DC-280 Cyclotron, the Basic Facility of the Factory of Superheavy Elements of the Laboratory of Nuclear Reactions at the Joint Institute for Nuclear Research // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16, No. 6. P. 866–875.

Получено 9 сентября 2021 г.