

## «Детектирующая система SFiNx»

**Коллектив соавторов (ЛЯР ОИЯИ):**

А.В. Исаев, Р.С. Мухин, А.В. Ерёмин, А.А. Кузнецова, О.Н. Малышев, А.Г. Попеко,  
Ю.А. Попов, Б. Сайлаубеков, А.И. Свирихин, Е.А. Сокол

[Результаты работы](#) представлены в восьми публикациях.

Явление спонтанного деления атомных ядер, открытое Г.Н. Флёрвым и К.А. Петржаком в 1940 г., оказалось одним из основных процессов распада для многих тяжёлых ядер. Как показали дальнейшие исследования, этот процесс весьма характерен для сверхтяжёлых элементов и определяет в данной области границу существования атомных ядер. Значительная часть энергии реакции деления идёт на возбуждение образующихся осколков и на последующее испарение из них нейтронов. Поэтому множественность мгновенных нейтронов несёт ценную информацию о динамике процесса, однако является одной из наименее изученных характеристик для спонтанно-делящихся тяжёлых ядер. Исследования процесса спонтанного деления имеют важнейшее значение для развития теоретических подходов в физике деления. Однако при продвижении в область наиболее тяжёлых ядер возникают значительные экспериментальные трудности, связанные с малыми сечениями образования и с короткими временами жизни синтезируемых изотопов, что требует от исследователей развития самых передовых экспериментальных методов.

В Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва ОИЯИ создана новая детектирующая система SFiNx (Spontaneous Fission, Neutrons and X-rays) [1] для online-исследований свойств спонтанного деления короткоживущих тяжёлых ядер, синтезируемых в реакциях полного слияния (Рис. 1).

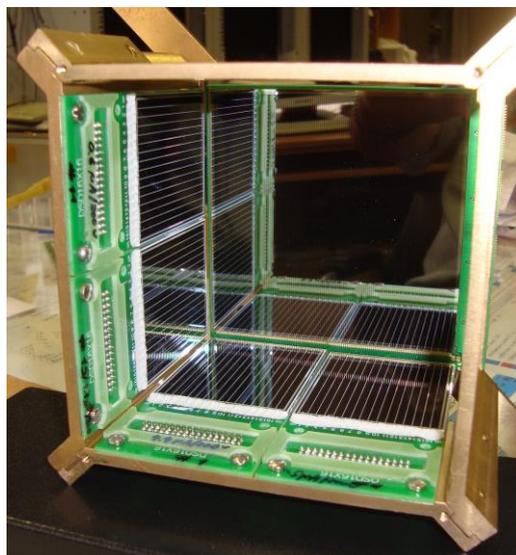


Рис. 1. Система SFiNx (слева) и «колодец» из Si-детекторов (справа)

В основе создания SFiNx лежит опыт использования нейтронного детектора [Д1] и системы для  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -спектроскопии GABRIELA [Д2], которые активно применялись в экспериментах на сепараторе SHELS [Д3]. Детектор [Д1] включал в себя 54  $^3\text{He}$ -счётчика нейтронов, расположенных вокруг сборки из полупроводниковых Si-детекторов, в которой фокальный двусторонний стриповый детектор (DSSD) имел площадь  $60\times 60$  мм. В детектирующем модуле GABRIELA использовалась сборка из DSSD с большим фокальным детектором размером  $100\times 100$  мм. За счёт увеличенной примерно в три раза площади фокальный детектор системы GABRIELA позволял захватывать значительно большее число ядер отдачи (ЯО). Использование сборки из Si-детекторов системы GABRIELA внутри детектора нейтронов позволило бы резко улучшить чувствительность проводимых экспериментов по изучению спонтанного деления. Однако увеличенный размер вакуумной камеры новой сборки из DSSD потребовал существенной переработки конфигурации нейтронного детектора.

Подбор оптимальной геометрии расположения нейтронных счётчиков производился при помощи моделирования прохождения потока нейтронов методами Монте-Карло в программе MCNPX 2.7.0. Расстояния между слоями счётчиков выбирались таким образом, чтобы нейтроны успевали замедлиться до тепловых энергий в полиэтилене, но при этом число используемых счётчиков (Табл. 1) было бы минимальным. Моделирование множества различных конфигураций привело к оптимальному решению, давшему максимальную эффективность при использовании 116 счётчиков (Рис. 2).

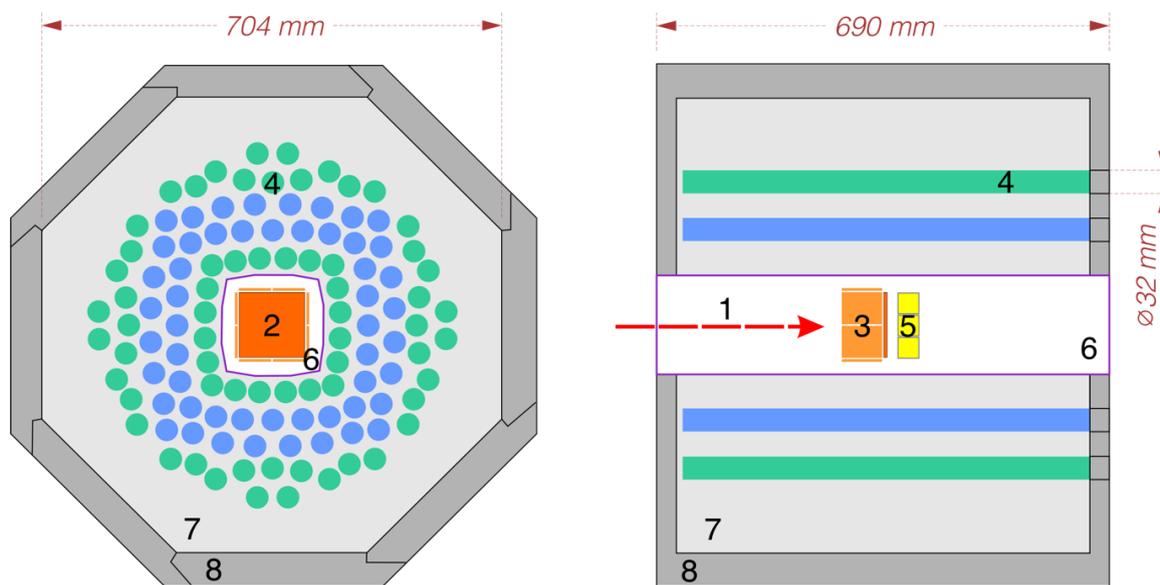


Рис. 2. Схема SFiNx (вид спереди – слева; вид сбоку – справа). Условные обозначения: 1 – ЯО; 2 – фокальный Si-детектор; 3 – боковые Si-детекторы; 4 –  $^3\text{He}$ -счётчики; 5 – сцинтиллятор; 6 – вакуумная камера; 7 – замедлитель; 8 – защита от внешнего фона

Счётчики нейтронов окружают вакуумную камеру, внутри которой была помещена новая сборка из DSSD. Фокальный кремниевый детектор с конфигурацией  $128\times 128$  стрипов имеет размер  $100\times 100$  мм и толщину 500 мкм. Перпендикулярно фокальному детектору располагаются 8 кремниевых полупроводниковых детекторов, образующих сборку в виде колодца (Рис. 1). Боковые  $16\times 16$ -стриповые детекторы имеют размер

50×60 мм, толщину 700 мкм и размещаются попарно вдоль каждой из сторон фокального детектора.

Таблица 1. Характеристики и число счётчиков нейтронов, используемых в сборке. Нумерация слоёв счётчиков приводится относительно центральной оси детектора

Производитель	Диаметр, мм	Активная длина, мм	Рабочее напряжение, В	Слой	Количество	Давление $^3\text{He}$ , атм
НПФ «Консенсус»	32	530	1400	1	20	7
				4	44	
ЛЯР ОИЯИ		460	1775	2	24	
				3	28	

Исследуемые ЯО, проходя на своём пути через времяпролётные детекторы, имплантируются внутрь фокального DSSD, где и происходит их последующий распад. С использованием сборки из Si-детекторов можно производить регистрацию осколков деления и  $\alpha$ -частиц. Разрешение детекторов для  $\alpha$ -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 DSSD смонтирована на охлаждаемом держателе.

С использованием дополнительных линейных усилителей система может быть переведена в режим регистрации электронов, что позволяет использовать детектор для изучения запаздывающего деления и запаздывающих нейтронов после  $\beta$ -распада.

Образующиеся в процессе спонтанного деления мгновенные нейтроны замедляются в полиэтилене до тепловой энергии и, попадая в счётчики нейтронов, захватываются ядрами  $^3\text{He}$ . 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 её основаниях.

Поскольку процесс спонтанного деления сопровождается испусканием большого количества  $\gamma$ -квантов, совпадения с ними могут являться дополнительным фактором очистки от фоновых импульсов в DSSD с большой амплитудой. Для регистрации  $\gamma$ -квантов непосредственно за фокальным DSSD были установлены 9 CLLBC сцинтилляционных детекторов.

Проверка работоспособности системы SFiNx и уточнение её характеристик производилось с  $^{248}\text{Cm}$ -источником спонтанных делений. Источник был нанесен на одну из сторон тонкой фольги, которая затем устанавливалась внутри сборки из DSSD по центру и в 5 мм от фокального детектора. При обнаружении осколка деления в данных производился поиск нейтронных событий в интервале 0 – 128 мкс. Окно поиска осколков по энергии подбиралось таким образом, чтобы полностью исключить ложные корреляции с  $\alpha$ -частицами из источника. Для определения точного значения эффективности регистрации и её погрешности применялся нелинейный метод

наименьших квадратов. Полученное значение эффективности регистрации одиночного нейтрона детектором составило  $(55 \pm 1) \%$  [2]. Среднее время жизни нейтрона в сборке определялось из распределения значений времени между осколками деления и нейтронами и составило  $(18 \pm 1)$  мкс.

На модернизированном кинематическом сепараторе ядер отдачи SHELS [Д3] в ЛЯР ОИЯИ была проведена серия экспериментов по изучению свойств спонтанного деления короткоживущих изотопов трансфермиевых элементов [2–4]. Исследуемые ядра синтезировались в реакциях полного слияния ионов  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{54}\text{Cr}$ , ускоренных на циклотроне У-400, с мишенями из обогащенных изотопов  $^{204,206,207,208}\text{Pb}$ . Сепаратор обеспечивал отделение искомым ядер отдачи от продуктов побочных реакций и рассеянных ионов пучка. После сепарации ЯО пролетали через времяпролётный детектор и имплантировались в фокальный Si полупроводниковый детектор системы SFiNx, где происходил их дальнейший распад.

Так как эффективность регистрации нейтронов счётчиками далека от 100%, наблюдаемое в эксперименте распределение множественности сильно искажено по сравнению с исходным и требует процедуры восстановления. Высокие статистические ошибки, связанные с малыми сечениями образования ЯО, и погрешность определения эффективности детектора переводят задачу в категорию математически некорректных, что требует использования специальных математических методов для восстановления истинных распределений нейтронных множественностей из измеренных распределений (Рис. 3). Для решения данной задачи применялся метод статистической регуляризации А.Н. Тихонова, успешно адаптированный для анализа экспериментальных данных, получаемых на детектирующей системе SFiNx [5].

Стоит отметить, что детектирующая система сепаратора находилась за толстой стеной (2 м) из тяжёлого железобетона, что значительно снижало фон от нейтронов и  $\gamma$ -квантов, образующихся на цилиндре Фарадея и мишени. Влияние фона было незначительным в сравнении с уровнем полученных в экспериментах статистических ошибок [3].

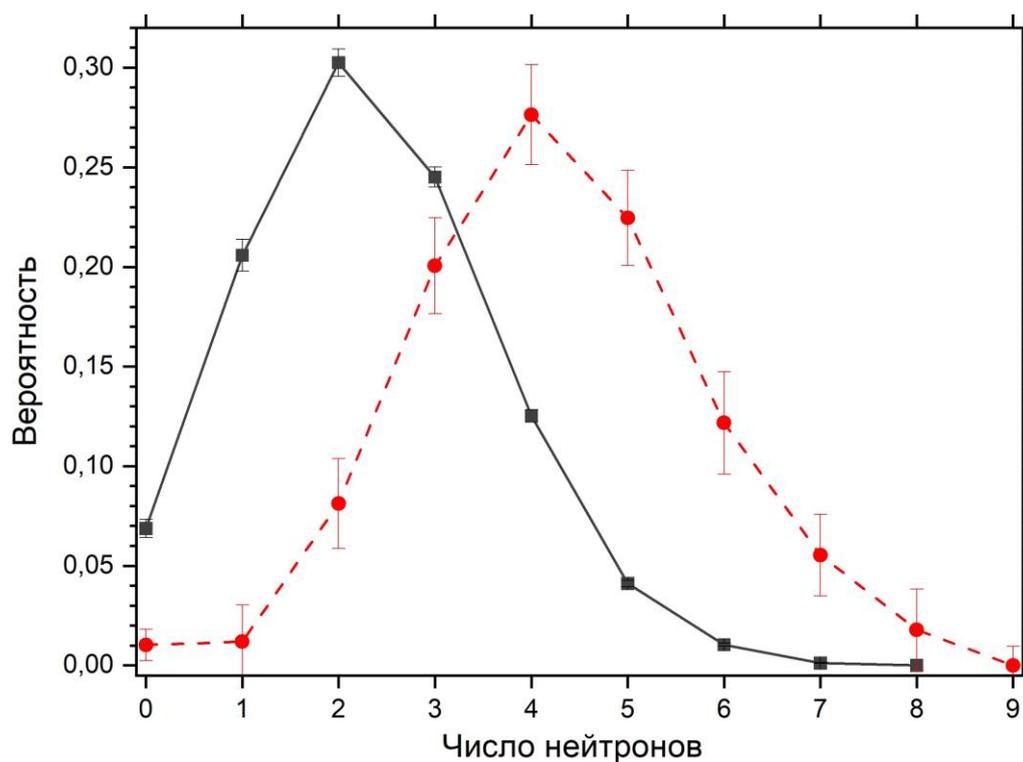


Рис. 3. Измеренное (квадраты) и восстановленное (круги) распределения множественности мгновенных нейтронов спонтанного деления  $^{252}\text{No}$ .

**В результате серии исследований данные о выходах мгновенных нейтронов спонтанного деления были впервые получены для изотопов  $^{250}\text{No}$  и  $^{260}\text{Sg}$  и существенно уточнены для изотопов  $^{244,246}\text{Fm}$  и  $^{252}\text{No}$  (табл. 2). Обновлённая систематика среднего числа нейтронов в акте деления (Рис. 4), показывает продолжающийся общий тренд на увеличение значений этой характеристики при движении в сторону более тяжёлых ядер.**

Таблица 2. Характеристики эмиссии мгновенных нейтронов спонтанного деления изотопов трансфермиевых элементов

Изотоп	Среднее число в акте деления	Дисперсия распределения	Вероятности эмиссии
$^{244}\text{Fm}$	$3,5\pm 0,2$	1,4	уточнены
$^{246}\text{Fm}$	$3,8\pm 0,3$	2,1	уточнены
$^{250}\text{No}$	$4,1\pm 0,1$	1,8	измерены впервые
$^{252}\text{No}$	$4,25\pm 0,09$	2,1	уточнены
$^{260}\text{Sg}$	$4,9\pm 0,4$	3,0	измерены впервые

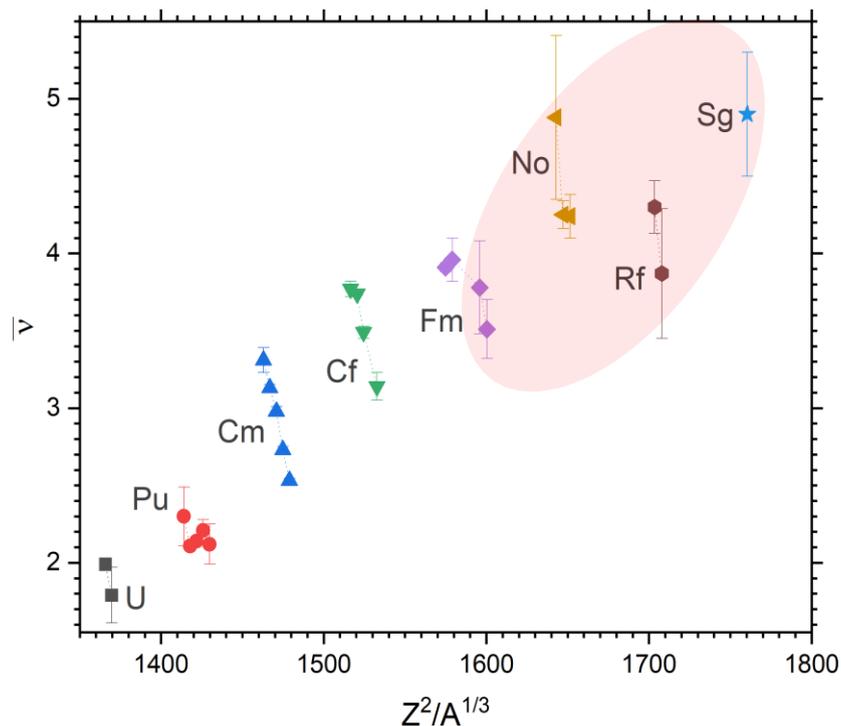


Рис. 4. Систематика среднего числа нейтронов в акте деления. Овалом выделены данные, полученные на сепараторе SHELS

Важнейшей особенностью нашей серии исследований была возможность получать данные не только для первых двух моментов распределений мгновенных нейтронов (среднее число и дисперсия), но и для форм распределений нейтронной множественности, которые содержат информацию о динамике процесса спонтанного деления [Д4, 8]. Как видно из систематики на Рис. 5, формы распределений уникальны для каждого отдельного изотопа и могут быть условно разделены на симметричные и ассиметричные. Последние могут иметь особо ценное значения для поиска мод деления тяжёлых ядер [Д4].

Детектирующая система SFiNx также была скомбинирована с цифровой системой сбора и обработки формы сигналов (National Instruments), что позволило более тонко настроить систему порогов нейтронных счётчиков и дало возможность анализа временных корреляций на уровне десятков наносекунд [6–7]. Возможности цифровой электроники SFiNx были проверены в ходе эксперимента на сепараторе SHELS по исследованию свойств распада нейтронодефицитного изотопа  $^{250}\text{No}$  [4].



4. R.S. Mukhin, A.V. Isaev, A.V. Andreev, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, H.M. Devaraja, O. Dorvaux, B. Gall, K. Hauschild, I.N. Izosimov, A.A. Kuznetsova, A. Lopez-Martens, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, Yu.A. Popov, A. Rahmatinejad, B. Sailaubekov, T.M. Shneidman, E.A. Sokol, A.I. Svirikhin, M.S. Tezekbayeva and A.V. Yeremin, “The search for spontaneous fission from the  $^{250}\text{No}$  isomeric state via prompt neutron multiplicity distribution analysis”, JINR Preprint E7-2023-61 (2023).
5. R.S. Mukhin, V.N. Dushin, A.V. Eremin, I.N. Izosimov, A.V. Isaev, A.I. Svirikhin, “Reconstruction of Spontaneous Fission Neutron Multiplicity Distribution Spectra by the Statistical Regularization Method”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 18, No. 4, pp. 439–444 (2021).
6. R.S. Mukhin, A.V. Yeremin, I.N. Izosimov, A.V. Isaev, A.A. Kuznetsova, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, Yu.A. Popov, B. Sailaubekov, A.I. Svirikhin, E.A. Sokol, M.S. Tezekbayeva, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, K. Hauschild, “Prototype of the Digital Electronics Chain for the GABRIELA Detector Assembly and First Tests”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 18, No. 6, pp. 652–657 (2021).
7. R.S. Mukhin, A.V. Yeremin, I.N. Izosimov, A.V. Isaev, A.A. Kuznetsova, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, Yu.A. Popov, B. Sailaubekov, A.I. Svirikhin, E.A. Sokol, M.S. Tezekbayeva, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, K. Hauschild, “Digital signal processing for the GABRIELA detector assembly”, Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement, No 4, Vol. 14 (2021).
8. R.S. Mukhin, A.V. Isaev, A.V. Andreev, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, H.M. Devaraja, B. Gall, K. Hauschild, I.N. Izosimov, A.A. Kuznetsova, A. Lopez-Martens, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, Yu.A. Popov, A. Rahmatinejad, B. Sailaubekov, T.M. Sheidman, E.A. Sokol, A.I. Svirikhin, M.S. Tezekbayeva, A.V. Yeremin, “Analysis of the shape of multiplicity distributions of prompt neutrons emitted in spontaneous fission”, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, <https://doi.org/10.1007/s10967-023-09164-0> (2023).

#### Список дополнительной литературы:

- Д1. A.I. Svirikhin, A.V. Isaev, A.V. Yeremin, A.N. Kuznetsov, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, E.A. Sokol, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, “A detector for studying the characteristics of spontaneous fission of short-lived heavy nuclei”, Instruments and Experimental Techniques, Vol. 54, No. 5, pp. 644–648 (2011).
- Д2. R. Chakma, K. Hauschild, A. Lopez-Martens, A.V. Yeremin, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, Yu.A. Popov, A.I. Svirikhin, V.I. Chepigin, O. Dorvaux, B. Gall, K. Kessaci, “Gamma and conversion electron spectroscopy using GABRIELA”, The European Physical Journal A, Vol. 56, 245 (2020).
- Д3. A.G. Popeko, A.V. Yeremin, O.N. Malyshev, V.I. Chepigin, A.V. Isaev, Yu.A. Popov, A.I. Svirikhin, K. Hauschild, A. Lopez-Martens, K. Rezynkina, O. Dorvaux, “Separator for Heavy Element Spectroscopy – velocity filter SHELS”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 376, pp. 140–143 (2016).
- Д4. A.V. Isaev, R.S. Mukhin, A.V. Andreev, Z. Asfari, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, H.M. Devaraja, O. Dorvaux, B. Gall, K. Hauschild, I.N. Izosimov, A.A. Kuznetsova, A. Lopez-Martens, O.N. Malyshev, A.G. Popeko, Yu.A. Popov, A. Rahmatinejad, B. Sailaubekov, T.M. Shneidman, E.A. Sokol, A.I. Svirikhin, M.S. Tezekbayeva, A.V. Yeremin, N.I. Zamyatin, “Structure of the prompt neutron multiplicity distribution in the spontaneous fission of  $^{256}\text{Rf}$ ”, Physics Letters B 843 138008 (2023).