

Detector system SFiNx Детектирующая система SFiNx

А.В. Исаев^{a,1}, А.В. Ерёмин^{a,б}, Н.И. Замятин^a, И.Н. Изосимов^a, А.А. Кузнецова^a,
О.Н. Малышев^{a,б}, Р.С. Мухин^a, А.Г. Попеко^{a,б}, Ю.А. Попов^{a,б}, Б. Сайлаубеков^{a,в}, А.И. Свирихин^{a,б},
Е.А. Сокол^a, М.С. Тезекбаева^{a,в}, Д.А. Тестов^a, М.Л. Челноков^a, В.И. Чепигин^a, С. Анталик^г,
П. Мошат^г, П. Брионе^д, Б. Галл^д, О. Дорво^д, К. Кессаси^д, А. Селлам^д, А. Лопез-Мартенс^е,
К. Хошилд^е

^a Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

^в Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

^г Университет им. Я. Коменского, Братислава, Словакия

^д IPHC, IN2P3-CNRS, Страсбург, Франция

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

A.V. Isaev^a, A.V. Yeremin^{a,b}, N.I. Zamyatin^a, I.N. Izosimov^a, A.A. Kuznetsova^a, O.N. Malyshev^{a,b},
R.S. Mukhin^a, A.G. Popeko^{a,b}, Yu.A. Popov^{a,b}, B. Sailaubekov^{a,c}, A.I. Svirikhin^{a,b}, E.A. Sokol^a,

M.S. Tezekbayeva^{a,c}, D.A. Testov^a, M.L. Chelnokov^a, V.I. Chepigin^a, S. Antalic^d, P. Mosat^d,
P. Brionnet^e, B. Gall^e, O. Dorvaux^e, K. Kessaci^e, A. Sellam^e, A. Lopez-Martens^f, K. Hauschild^f

^a Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

^b Dubna State University, Dubna, Russia

^c Institute of Nuclear Physics, Almaty, Republic of Kazakhstan

^d Comenius University, Bratislava, Slovakia

^e IPHC, IN2P3-CNRS, Strasbourg, France

^f IJCLab, IN2P3-CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France

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 счётчиков нейтронов, наполненных ^3He . Эффективность регистрации нейтронов составила $54.7 \pm 0.1\%$. Детекторная система была испытана в эксперименте по изучению характеристик спонтанного деления изотопа ^{252}No , в котором данные о выходах нейтронов спонтанного деления сравнивались с ранее опубликованными результатами. Были получены среднее число нейтронов на одно деление ($\bar{\nu} = 4.25 \pm 0.09$) и распределение нейтронов по множественностям, для последнего так же произведено восстановление истинной формы методом статистической регуляризации.

A new detector system aimed to study spontaneous fission properties of short-lived transuranium nuclei was created. This system consists of assembly of DSSSD surrounded by 116 proportional counters of neutrons filled with ^3He . Single neutron registration efficiency was measured as $54.7 \pm 0.1\%$. The detector system was tested in an experiment to study the characteristics of spontaneous fission of the ^{252}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 also was restored using statistical regularisation 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. Флёрова накоплен значительный опыт в области исследования свойств спонтанного деления тяжёлых 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 $60 \times 60 \text{ mm}^2$, которую окружали 54 ${}^3\text{He}$ -счётчика нейтронов [11].

В последние годы в экспериментах по спектроскопии тяжёлых 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 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ и 128×128 стрипов. За счёт увеличенной примерно в 3 раза площади, детектор позволяет захватывать большее число ядер отдачи (ЯО). Применение такого детектора, совместно с детектором нейтронов, заметно расширяет чувствительность проводимых экспериментов. За счёт 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 счётчиков, на языке Swift была написана программа NeutronGeometry [14]. В данной программе в явном виде можно сформировать требуемую геометрию и конвертировать её 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 ${}^3\text{He}$. Значение данной величины 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 счётчиков нейтронов, необходимых для того, чтобы получить высокую эффективность. Другими важными параметрами были размер и форма вакуумной камеры с полупроводниковыми детекторами, вокруг которой планировалось разместить счётчики нейтронов. Вакуумная камера проектировалась из нержавеющей стали, практически в форме кубоида с внешним размером $155 \times 155 \times 893 \text{ mm}$. Исходя из опыта проектирования и использования предыдущего детектора [11], было известно, что счётчики первого слоя дают максимальный вклад в эффективность регистрации при их расположении вблизи от вакуумной

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

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

Давление ^3He для всех типов счётчиков составляло 7 атм. Для компенсации «пристеночного» эффекта, газовая смесь в счётчиках содержит CO_2 или Ar .

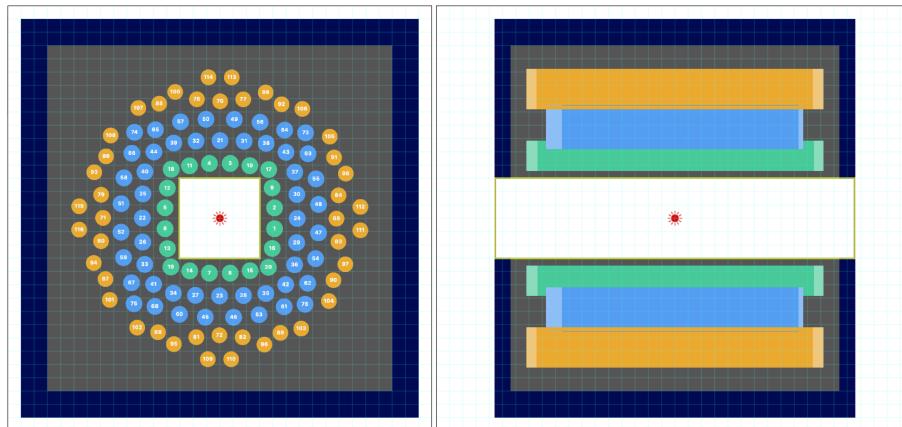


Рис. 1. Окно программы формирования геометрии: вид спереди – слева, вид сбоку – справа. Шаг сетки составляет 25 мм.

Таблица 1. Основные характеристики и число счётчиков 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

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

$$f(E) = Ce^{-\frac{E}{a}} \sinh(\sqrt{bE}),$$

где С - постоянная нормировки определяемая MCNPX и параметры $a = 0.8084$ МэВ и $b = 4.536 \text{ МэВ}^{-1}$ взятые из работы [16]. Оценка эффективности регистрации рассчитывалась для четырёх слоёв детектора (таблица 1). Суммарная оценка эффективности по всем слоям детектора составила $60.55 \pm 0.02\%$ (ошибка метода Монте-Карло). Расчёчная зависимость вероятности регистрации единичного нейтрона от слоя детектора приводится на рис. 2. Видно, что с удалением слоя от оси детектора требуется всё больше и больше счётчиков, а вклад каждого из счётчиков в суммарную эффективность резко падает.

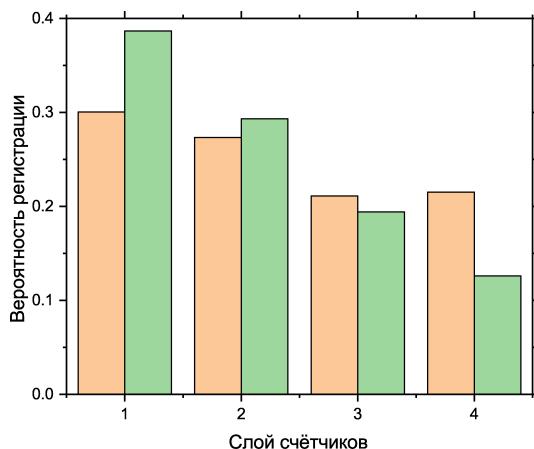


Рис. 2. Рассчитанные вероятности регистрации нейтрона по слоям детектора (левые столбцы) и по счётчику слоя (правые столбцы). Правые столбцы получены путём деления левых на число счётчиков в слое, с последующей нормировкой по сумме. Нумерация слоёв счётчиков приводится от оси детектора.

Для оценки среднего времени жизни нейтрона в сборке использовалась карта времён для счетов (T card). Зависимость суммарного потока нейтронов от времени показана на рис. 3. Значение среднего времени жизни составило 19.0 ± 0.1 мкс (приводится ошибка фитирования экспонентой).

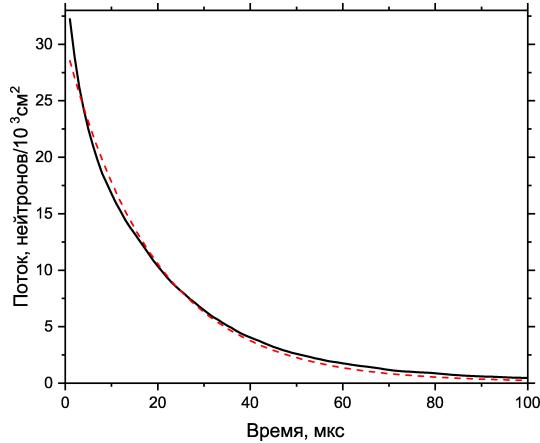


Рис. 3. Поток нейтронов по всем слоям счётчиков в зависимости от времени (сплошная линия). Пунктиром показано фильтрование экспонентой.

Детектор

Новая детектирующая система была названа SFInx (Spontaneous Fission, Neutrons and x-rays). Система состоит из 116 ${}^3\text{He}$ -счётчиков нейтронов, расположенных вокруг вакуумной камеры с DSSSD (рис. 4).

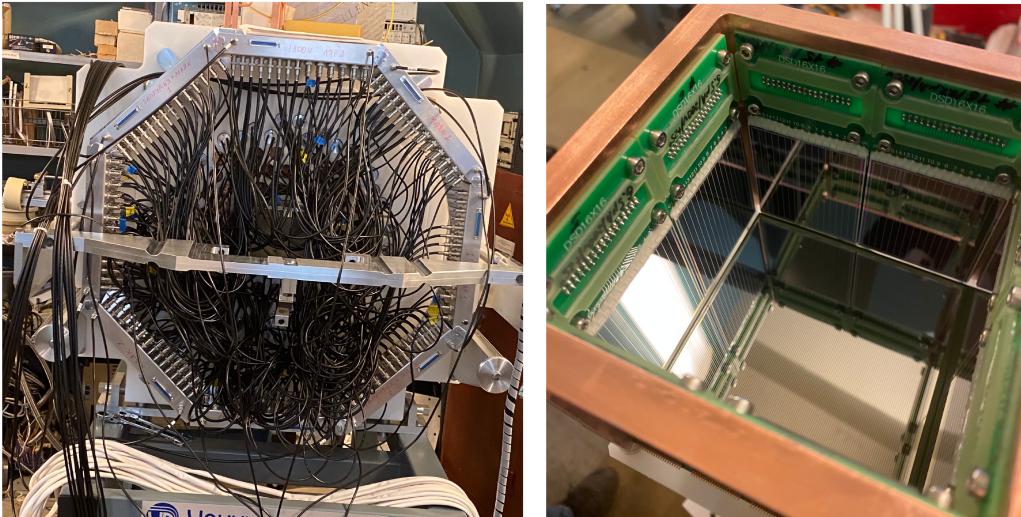
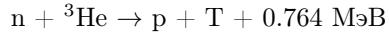


Рис. 4. Сборка из счётчиков нейтронов (слева) и «колодец» из DSSSD (справа).

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



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

Счётчики нейтронов окружают вакуумную камеру, внутрь которой была помещена новая сборка из DSSSD. Фокальный кремниевый детектор, с конфигурацией 128×128 -стрипов, имеет размер активной области $100 \times 100 \text{ mm}^2$ и толщину 500 мкм. Перпендикулярно фокальному детектору располагаются 8 кремниевых полупроводниковых детекторов, образуя сборку в виде колодца (рис. 4). Боковые 16×16 -стриповые детекторы имеют размер $50 \times 60 \text{ mm}^2$, 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 своём пути через время-пролётные 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 кэВ 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, то 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 счётчиков с различными характеристиками потребовало создания соответствующей многоканальной электронной системы регистрации.

Сигнал от зарядочувствительного предусилителя ${}^3\text{He}$ -счётчика поступает в один из четырёх 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 ${}^3\text{He}$ -счётчика составляет ~ 20 мкс и если второй нейtron попадает в момент формирования сигнала, то сигналы не будут разделены. Однако, учитывая высокую гранулярность детектора нейтронов, вероятность случайных наложений двух сигналов в отдельном счётчике, 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}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}Cf в источнике осуществлялась по спектру α -частиц, а также из паспортных данных источника. Проведённый анализ позволяет не учитывать примесь ^{252}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 (соответственно 7×10^{-6} и 6×10^{-2} событий в расчёте на одно спонтанное деление ^{248}Cm).

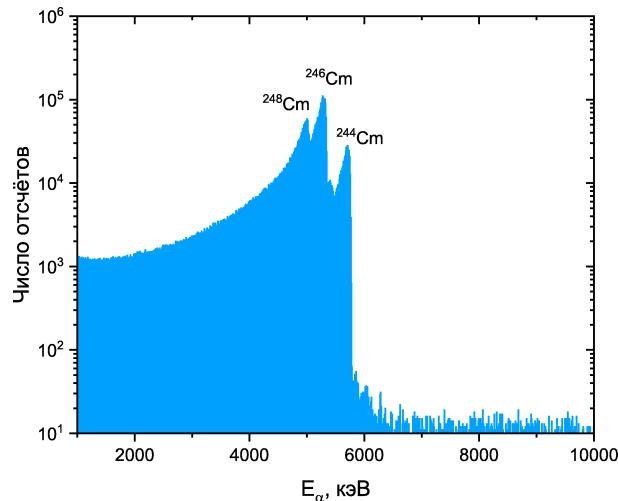


Рис. 5. Спектры α -частиц от источника.

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 расчётными значениями.

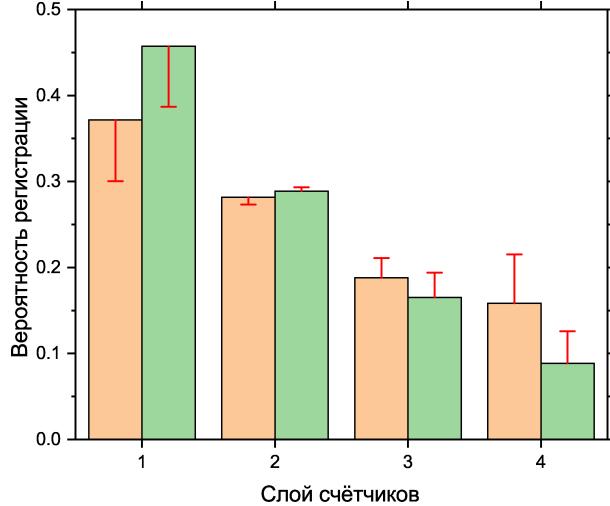


Рис. 6. Измеренные вероятности регистрации нейтрона по слоям детектора (левые столбцы) и по счётчику слоя (правые столбцы). Значения распределений были нормированы по их суммам. На графике приводятся отклонения от рассчитанных в MC-NPX значений.

Эффективность регистрации одиночных нейтронов была измерена с помощью ^{248}Cm источника. Для определения точного значения эффективности регистрации и её погрешности, применялась реализация нелинейного метода наименьших квадратов (МНК) из библиотеки SciPy [19]. Известные значения распределения нейтронов 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 . Грубая оценка эффективности определялась из соотношения между измеренным средним числом нейтронов 1.71 к известному значению среднего числа нейтронов 3.13 для ^{248}Cm [20, 21]. Оба выбора привели к одинаковому значению эффективности регистрации нейтрона детектором $54.7 \pm 0.1\%$ (приводится ошибка метода).

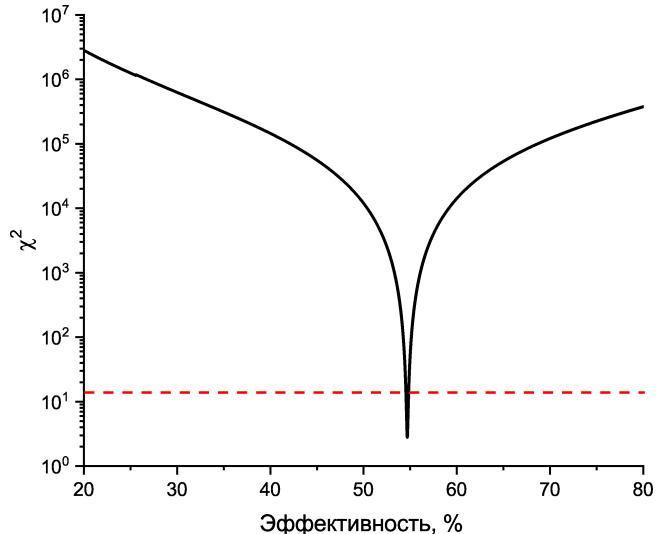


Рис. 7. Распределение χ^2 . Пунктиром указан 5% предел.

Полученное значение эффективности регистрации одиночного нейтрона ($54.7 \pm 0.1\%$) хорошо согласуется со значением, рассчитанным в MCNPX ($60.55 \pm 0.02\%$). С учётом того, что источник нейтронов в измерениях не был точечным, а его геометрическое расположение было неидеальным.

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 ± 0.2 мкс (приводится ошибка фитирования экспонентой), что довольно близко к расчётному значению (19.0 ± 0.1 мкс).

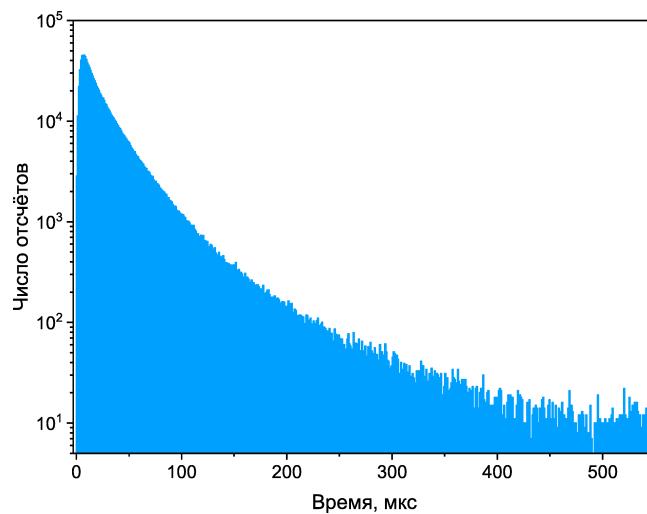


Рис. 8. Распределения нейтронов по времени относительно акта спонтанного деления.

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.

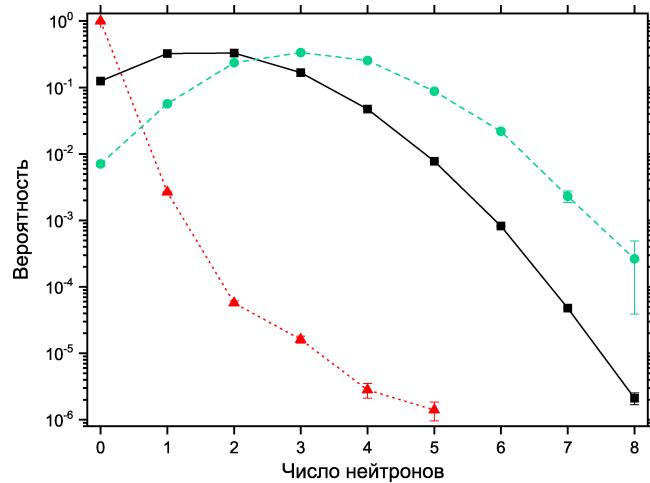


Рис. 9. Сравнение измеренных множественностей фоновых нейтронов (треугольники) и мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{248}Cm (квадраты), а также результат восстановления истинного распределения (круги). Значения распределений были нормированы по их суммам. Линии соединяющие точки добавлены для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

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 ($b_{sf} \approx 0.667$, рис. 10), а коэффициент ветвления по пути спонтанного деления составляет $b_{sf} \approx 0.322$. Детектирующая система сепаратора находится за толстой стеной (2 м) из тяжёлого 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, попавшем 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

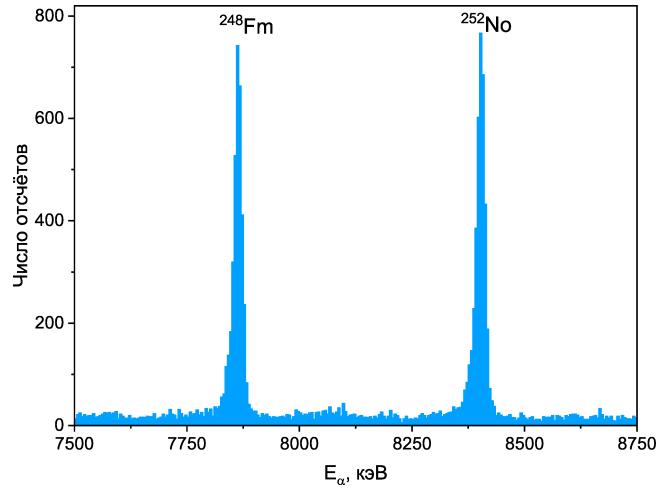


Рис. 10. Спектр альфа-частиц в области ^{252}No и его дочернего продукта распада ^{248}Fm , полученный за время эксперимента.

строгие критерии отбора по энергии. Далее искались нейтроны, относящиеся к актам распада во временном «окне» поиска 128 мкс.

Всего было найдено 3260 достоверных событий спонтанного деления ^{252}No . Период полураспада для ^{252}No рассчитывался на основе корреляций «ядро отдачи – осколок деления» (рис. 11) и составил 2.44 ± 0.05 с (приводится ошибка фитирования распределения времён жизни экспонентой), что согласуется с известными значениями 2.44 ± 0.04 с [23] и 2.30 ± 0.22 с [24].

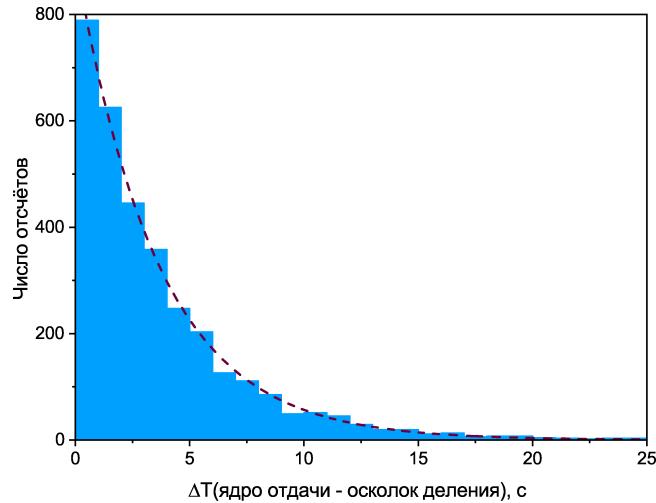


Рис. 11. Распределение разниц по времени между ЯО и осколком деления для ^{252}No .

Измеренное среднее число нейтронов в акте деления ^{252}No составило 2.32 ± 0.05 , что с учётом эффективности нейтронного детектора даёт значение среднего числа

нейтронов $\bar{\nu} = 4.25 \pm 0.09$ (содержит статистическую ошибку и погрешность эффективности нейтронного детектора). Полученное значение хорошо согласуется с уже известными 4.15 ± 0.30 [25], 4.43 ± 0.45 [26] и 4.51 ± 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 таблице 2 и на рис. 12. Дисперсия измеренного распределения нейтронов с учётом эффективности детектора $\sigma_{\nu}^2 = 2.1$ нейтрана², а для распределения, восстановленного методом статистической регуляризации [22], дисперсия $\sigma_{\nu_r}^2 = 2.2$ нейтрана².

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

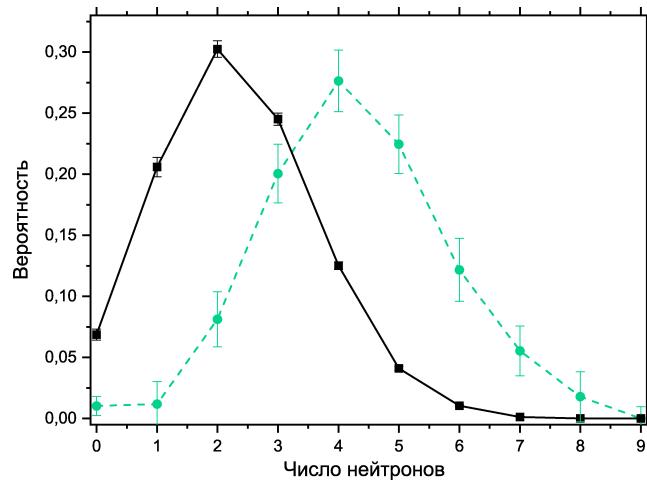


Рис. 12. Измеренный (квадраты) и восстановленный (круги) спектры множественности нейтронов ^{252}No .

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	3×10^{-4}	2×10^{-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	—	—	—

Заключение

Создана новая детектирующая система SFiNx из 116 ^3He -счётчиков нейтронов и сборки из многостриповых Si-детекторов. На настоящий момент данная система не имеет аналогов в области исследования свойств спонтанного деления короткоживущих тяжёлых ядер. При этом похожие сборки из ^3He -счётчиков используются сейчас в экспериментах по изучению запаздывающего деления [29,30] и в поиске сверхтяжёлых элементов в природе [31].

С использованием ^{248}Cm -источника, измерена эффективность регистрации одиночного нейтрона ($\epsilon = 54.7 \pm 0.1\%$) и среднее время жизни нейтрона в сборке ($\bar{\tau} = 18.4 \pm 0.2$ мкс). Более высокая эффективность SFiNx, в сравнении со старым детектором ($\sim 43\%$) [11], позволяет как быстрее набирать статистику, так и лучше восстанавливать истинное распределение мгновенных нейтронов по множественности методом статистической регуляризации Тихонова.

В ходе первого эксперимента на установке, для нейtronодефицитного изотопа ^{252}No , получено среднее число нейтронов ($\bar{v} = 4.25 \pm 0.09$) и вероятности эмиссии нейтронов различной кратности в акте деления.

Применение SFiNx позволит продвинуть исследования в область больших Z , вплоть до сверхтяжёлых элементов, где фактически отсутствуют данные о выходах мгновенных нейтронов и об кинетических энергиях осколков деления. Система может быть использована на газонаполненном сепараторе ГНС-3, недавно запущенной Фабрики сверхтяжёлых 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., Malyshев O.N., Popeko A.G., Sagaidak R.N., Ter-Akopian G.M., Lavrentjev A.Yu.*The electrostatic separator VASSILISSA. Performance and experimental results. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1997. 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. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2016. 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., Malyshев 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 Y.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 . // PEPAN Letters. 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 Y.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. // PEPAN Letters. 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 Y.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. // PEPAN Letters. 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. // PEPAN Letters. 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 VASILISSA separator. // Instrum. Exp. Tech. 2011. 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. 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. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2020. 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. 56. 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. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2001. V. 179. P. 78–82.
 17. *Skobelev N.K.* Delayed Fission of Atomic Nuclei (To the 50th Anniversary of the Discovery). // Phys. Atom. Nuclei. 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. // Radiation Effects. 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. and Shcherbakov O.A.* Distribution of prompt neutron emission probability for fission fragments in spontaneous fission of ^{252}Cf and $^{244,248}\text{Cm}$. // AIP Conference Proceedings. 2005. 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. // PEPAN Letters. 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., Tsyanov 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. 64, 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. 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., Kabachenko A.P., Malyshov 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 collaboration. Commissioning of the BRIKEN detector for the measurement of very exotic β -delayed neutron emitters. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2019. 925. P. 133–147.
30. Testov D.T., Verney D., Roussi  re B., Bettane J., Didierjean F., Flanagan K., Franchoo 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. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. 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 Conference Proceedings. 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. // EPJ Web Conf. 2016. 131. P. 08001.
33. Popeko A.G. On-line separators for the Dubna Superheavy Element Factory. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2016. 376. P. 144–149.
34. Gulbekian G.G., Dmitriev S.N., Itkis M.G., Oganessyan 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. // PEPAN Letters. 2019. V. 16. No 6. P. 866–875.