

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ $^{252,254}\text{No}$

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

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

^в Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

^г IPHC, IN2P3-CNRS, Страсбург, Франция

^д IJCLab, IN2P3-CNRS, Университет Париж–Сакле, Орсе, Франция

^е Университет им. Я. Коменского, Братислава

На сепараторе SHELS была проведена серия экспериментов по изучению свойств спонтанного деления изотопов $^{252,254}\text{No}$. Для синтеза изотопов нобелия мишени из $^{206,208}\text{Pb}$ бомбардировались пучком ионов ^{48}Ca , выведенным из циклотрона У-400. В результате для изотопов $^{252,254}\text{No}$ были измерены периоды полураспада, дана сравнительная оценка полных кинетических энергий осколков, а также измерены множественности мгновенных нейтронов деления. Среднее число нейтронов в акте деления для ^{254}No было получено впервые и составило $4,88 \pm 0,53$.

Experiments to study spontaneous fission properties of $^{252,254}\text{No}$ isotopes were carried out on SHELS separator. $^{206,208}\text{Pb}$ targets were bombarded with ^{48}Ca ions from the U-400 cyclotron. Half-lives, total kinetic energies of fission fragments, as well as multiplicities of prompt neutrons were measured for $^{252,254}\text{No}$ isotopes. The average number of neutrons per spontaneous fission act of ^{254}No (4.88 ± 0.53) was obtained for the first time.

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

ВВЕДЕНИЕ

Распад в ходе спонтанного деления характерен для многих тяжелых ядер с $Z \geq 100$. Именно спонтанное деление определяет в области тяжелых ядер границу существования элементов. Образовавшиеся в процессе деления осколки, как

¹E-mail: isaev@jinr.ru

правило, сильно возбуждены и перегружены нейтронами. Они могут снимать свое возбуждение, испуская некоторое число нейтронов и γ -квантов. Испускаемое в процессе деления количество нейтронов (непосредственно зависящее от степени возбуждения осколков) имеет важное значение для восстановления энергетического баланса реакции и развития теоретических подходов по делению ядер. В настоящее время множественность мгновенных нейтронов деления является одной из наименее изученных характеристик для многих тяжелых спонтанно делящихся изотопов. Нашей группой уже накоплен большой опыт по изучению этой важной характеристики деления [1–4]. В данной работе представлены результаты экспериментов по исследованию свойств нейтронодефицитных четно-четных изотопов $^{252,254}\text{No}$.

Изотоп ^{254}No интересен тем, что имеет полностью заполненную подоболочку $N = 152$. Именно влияние замкнутой нейтронной подоболочки приводит к резкому увеличению барьера деления данного изотопа и, как следствие, к росту его стабильности. Период полураспада ^{254}No — около 51 с. Он преимущественно испытывает α -распад, а спонтанное деление испытывает крайне редко. Коэффициент ветвления по пути спонтанного деления (b_{SF}) составляет 0,0017. При движении в сторону уменьшения числа нейтронов стабильность изотопов нобелия резко падает. Так, для исследуемого ^{252}No период полураспада составляет уже около 2,4 с, поэтому, хотя α -распад тут по-прежнему доминирует, спонтанное деление начинает играть все большую роль ($b_{\text{SF}} = 0,322$).

Дополнительный интерес к изотопам $^{252,254}\text{No}$ вызван открытием у них K -изомерных состояний [5, 6]. Такие состояния могут образовываться, если при возбуждении четно-четного ядра происходит разрыв нейтронных или протонных пар и переход одного или нескольких нуклонов на более высокие энергетические уровни. Образующиеся метастабильные состояния с высоким значением проекции спина K на ось симметрии ядра называют K -изомерами. Данное явление играет ключевую роль в понимании структуры деформированных ядер.

Характеристики спонтанного деления этих изотопов исследовались во многих экспериментах, были измерены периоды полураспада [7, 8], коэффициенты ветвления [8, 9], полные кинетические энергии осколков [10, 11] для обоих изотопов и множественность мгновенных нейтронов деления для ^{252}No [12, 13]. Данные по выходам мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{254}No до настоящего времени не публиковались.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по синтезу и изучению свойств спонтанного деления изотопов $^{252,254}\text{No}$ проводились на сепараторе SHELS [14] в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ (Дубна).

Для получения изотопов использовались реакции $^{206,208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{252,254}\text{No}$. Обогащение мишени из сульфида свинца ^{206}PbS составляло 97 % при толщине 350 мкг/см². Мишень из ^{208}PbS толщиной 370 мкг/см² с обогащением 99,57 % содержала примеси ^{206}Pb (0,14 %) и ^{207}Pb (0,29 %). Сульфид свинца в обеих мишенях наносился на подложку из титана толщиной 2 мкм.

Пучок ионов ^{48}Ca из ускорителя У-400 попадал на вращающуюся мишень, где в реакции полного слияния образовывались исследуемые изотопы. Энергия пучка ионов кальция на половине толщины мишени в обоих случаях составляла (215 ± 2) МэВ, что соответствовало максимуму функции возбуждения для $2n$ -канала реакций. Сечения реакций, протекающих по каналу с испарением двух нейтронов, составляют приблизительно 800 нб для ^{252}No и 1800 нб для ^{254}No . Средняя интенсивность пучка в ходе экспериментов составляла $0,3 \text{ мкА} \cdot \text{частиц}$.

После мишени располагался первый триплет магнитных квадрупольных линз, осуществляющий первичную фокусировку ядер отдачи (ЯО). Затем ЯО, продукты побочных реакций и рассеянные ионы пучка попадали в фильтр скоростей, состоящий из двух электростатических дефлекторов и двух дипольных магнитов, где происходила сепарация ЯО. Во втором триплете магнитных квадрупольных линз осуществлялась окончательная фокусировка ЯО, далее они попадали в поворотный магнит, отклонявший их на 8° для окончательного отсева от фона.

На последнем этапе ЯО имплантировались в фокальный кремниевый полупроводниковый детектор (ППД), по бокам которого находились еще четыре кремниевых ППД, образующих вместе «колодец» [15]. Вокруг вакуумной камеры со сборкой из ППД располагались счетчики нейтронов.

Si-детекторы использовались для регистрации осколков деления и α -частиц. Фокальный 48×48 -стриповый детектор имеет активную область 58×58 мм, позиционное разрешение 1×1 мм, толщину 300 мкм и разрешение по энергии около 20 кэВ для α -частиц с энергией 8 МэВ. Боковые 16-стриповые кремниевые детекторы (совместно с фокальным детектором) использовались для оценки полной кинетической энергии осколков (ТКЕ). Эффективность регистрации фокального детектора для α -частиц составляла 50 %, а для хотя бы одного осколка — 100 %.

Мгновенные нейтроны спонтанного деления тяжелых ядер регистрировались с помощью детектора нейтронов [16]. Детектор состоял из 54 пропорциональных счетчиков, наполненных газом ^3He под давлением 7 атм. Каждый счетчик имел длину 500 мм, диаметр 32 мм и помещался в замедлитель из полиэтилена. Снаружи детектор был покрыт защитой из борированного полиэтилена для снижения внешнего фона от ускорителя. Эффективность регистрации единичного нейтрона сборкой, измеренная с использованием источника ^{248}Cm , составляла (43 ± 1) %. Импульс от осколка деления в фокальном Si-детекторе открывал «окно» регистрации нейтронов длительностью 128 мкс, что позволяло достоверно измерять количество нейтронов, сопровождающих каждый акт деления. Разрешение временного счетчика для опроса детекторов нейтронов составляло 1 мкс, среднее время жизни нейтрона в сборке — около 23 мкс.

Сопровождающие процесс спонтанного деления γ -кванты регистрировались сцинтилляционным детектором на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и ФЭУ Hamamatsu R7600, который был установлен непосредственно за фокальным ППД. Сигнал от сцинтилляционного детектора являлся дополнительным фактором очистки от возможных фоновых сигналов в ППД с большой амплитудой.

Детектирующая система сепаратора находилась за толстой стеной (толщиной 2 м) из железобетона, что значительно снижало фон от нейтронов и γ -квантов, образующихся на цилиндре Фарадея и мишени.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Сечение реакции образования ^{254}No значительно больше, чем сечение реакции синтеза ^{252}No . Однако b_{SF} для ^{254}No составляет около 0,0017, в то время как для ^{252}No он равен 0,322. Поэтому незначительное присутствие ^{206}Pb в мишени при синтезе ^{254}No требовалось принять во внимание при проведении анализа данных.

Расчетные ожидаемые числа актов спонтанного деления для изотопов представлены в табл. 1. Эти значения мы вычисляли исходя из числа зарегистрированных корреляций «ядро отдачи – α -частица» с учетом:

- эффективности регистрации α -частиц (рис. 1), равной 50 %;
- эффективности регистрации хотя бы одного из осколков, равной 100 %;
- соотношения коэффициентов ветвления b_{α}/b_{SF} у изотопа;
- суммы вероятностей нахождения при делении не менее одного γ -кванта в сцинтилляционном детекторе и второго осколка деления в боковых детекторах (в ходе экспериментов данное значение составляло 0,61–0,66, при оценке использовалась верхняя граница).

Поиск событий осуществлялся в программе NeutronBarrel [17], написанной на комбинации языков Swift и C. Данная программа позволяет читать «сырые» данные экспериментов на сепараторе SHELS, осуществлять поиск ЯО, осколков деления, α -, β -частиц, γ -квантов, информации с ToF-детекторов и т. д.

Таблица 1. Данные по числу распадов изотопов нобелия

Реакция	Изотоп	$T_{1/2}$ [7, 8]	\sum_{α}	\sum_{SF}	
				Расчетное	Измеренное
$^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{254}\text{No}$	^{254}No	51,2 с	71305	178	174
	^{252}No от примеси ^{206}Pb	2,44 с	77	49	47
	^{250}Fm	30 мин	—	6	—
$^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{252}\text{No}$	^{252}No	2,44 с	1407	897	853

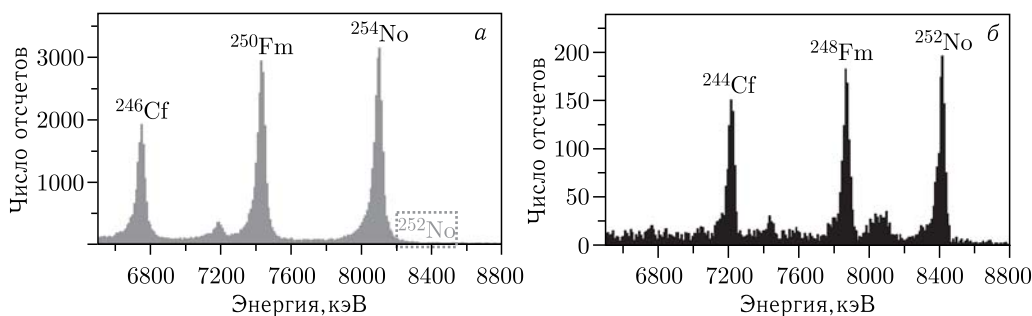


Рис. 1. α -спектры ^{254}No (а) и ^{252}No (б). Прямоугольником выделена область, в которой присутствуют α -частицы от распада ^{252}No (примесь ^{206}Pb в мишени при синтезе ^{254}No)

Важнейшей задачей при поиске корреляций был отсев паразитных импульсов ионов пучка, которые могли регистрироваться в энергетическом диапазоне осколков деления. Мы отбирали только цепочки, для которых были зарегистрированы γ -кванты в сцинтилляционном детекторе или же имелся импульс второго осколка в одном из боковых детекторов. Дополнительно, для улучшения достоверности, устанавливались строгие «окна» поиска по времени пролета и энергии ЯО.

Для ^{252}No поиск корреляций «ядро отдачи – осколок деления» осуществлялся во временном «окне» 0–25 с ($\sim 10T_{1/2}$). Всего было найдено 853 достоверных события спонтанного деления в эксперименте по синтезу ^{252}No .

При поиске корреляций для ^{254}No мы устанавливали нижнюю границу «окна» поиска корреляций «ядро отдачи – осколок деления» 15 с. Это требовалось для того, чтобы максимально избавиться от влияния примеси ^{206}Pb в мишени, которая приводила к образованию ^{252}No (рис. 2). Большая часть ядер ^{252}No , имеющих период полураспада 2,4 с, успевала распасться до момента начала поиска корреляций. Верхняя граница поиска была установлена 250 с ($\sim 5T_{1/2}$), поскольку с увеличением времени поиска корреляций растет вероятность случайных совпадений. Диапазон поиска 15–250 с позволяет найти большинство событий спонтанного деления ядер ^{254}No , всего обнаружено 174 события.

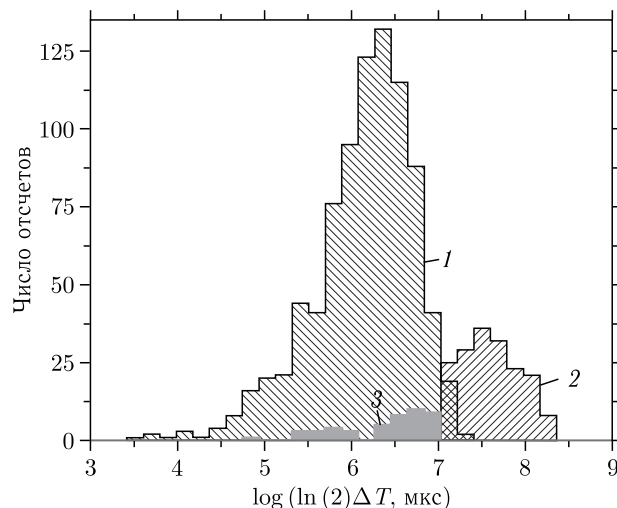


Рис. 2. Времена жизни, измеренные в отдельных экспериментах по синтезу ^{252}No (1) и ^{254}No (2). Влияние ^{252}No (3) от примеси ^{206}Pb в мишени при синтезе ^{254}No можно нивелировать выбором правильного окна поиска корреляций

Для расчета периода полураспада ^{252}No использовались времена совпадений «ядро отдачи – осколок деления» и «ядро отдачи – α -частица». Период полураспада для ^{252}No составил $(2,46 \pm 0,05)$ с, и в пределах ошибок он согласуется с полученными ранее значениями $(2,30 \pm 0,22)$ с [10] и $(2,44 \pm 0,04)$ с [8]. Для ^{254}No период полураспада рассчитывался на основе совпадений «ядро отдачи – α -частица». Значение периода полураспада для ^{254}No составило $(44,1 \pm 1,0)$ с, что довольно близко к известному значению $(51,2 \pm 0,4)$ с [7]. Отличие от табличного периода полураспада

для ^{254}No , вероятно, связано с наличием фона от рассеянного пучка в α -диапазоне, который приводит к искажению данных при поиске длительных корреляций. Уточним, что ошибки значений периодов полураспада были получены при фитировании распределений времен жизни экспонентой.

Спектры осколков деления были найдены суммированием сигналов с фокального и боковых детекторов (рис. 3). Спектр полной кинетической энергии осколков ^{252}No был откалиброван с использованием известного значения ТКЕ из работы [10], величина ТКЕ составила $(198,7 \pm 1,1)$ МэВ. Применяя данную калибровку для ^{254}No , мы получили значение ТКЕ, равное $(207,2 \pm 1,1)$ МэВ. Значение ТКЕ для ^{254}No не соответствует найденному в работе [11] значению 189,2 МэВ, однако, авторы указывают, что их значение могло быть несколько заниженным. Кроме того, наши значения ТКЕ содержат только ошибку определения центра пика при фитировании гауссианом.

Данные по измеренным множественностям нейтронов приведены на рис. 4. Измеренные средние числа нейтронов в акте деления составили $1,94 \pm 0,10$ для ^{252}No

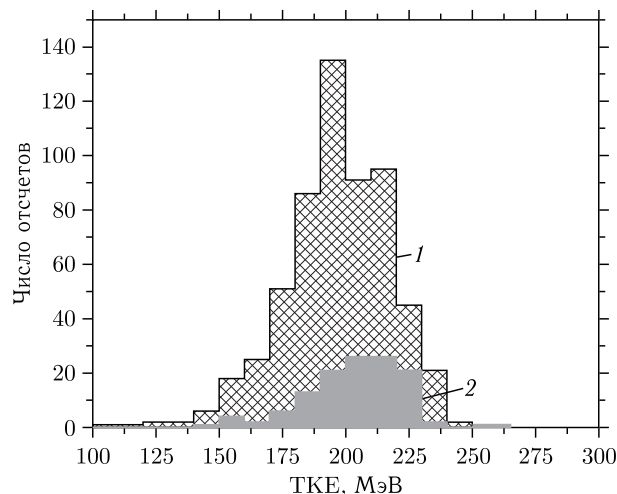


Рис. 3. Полная кинетическая энергия осколков деления изотопов ^{252}No (1) и ^{254}No (2)

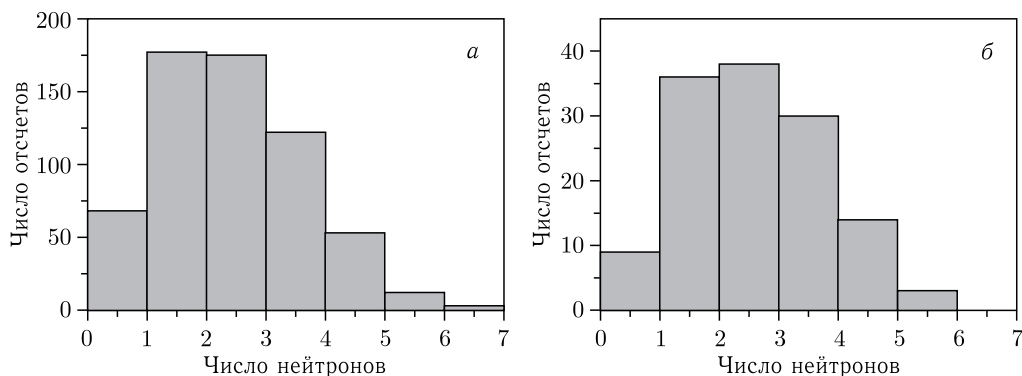


Рис. 4. Измеренные множественности нейтронов изотопов ^{252}No (а) и ^{254}No (б)

и $2,10 \pm 0,22$ для ^{254}No . Принимая в расчет эффективность нейтронного детектора, получаем средние числа нейтронов (\bar{n}) спонтанного деления ядер ^{252}No и ^{254}No равными $4,51 \pm 0,25$ и $4,88 \pm 0,53$. Среднее число нейтронов, полученное для ^{252}No , достаточно хорошо согласуется с известными ранее значениями $4,15 \pm 0,30$ [12] и $4,43 \pm 0,45$ [13]. Приводимые нами значения ошибок среднего числа нейтронов содержат статистическую ошибку и ошибку, связанную с разбросом эффективности нейтронного детектора.

Для оценки фоновой множественности мы использовали случайные совпадения α -частиц и нейтронов во временном окне 128 мкс. Вклад фоновых нейтронов был незначительным (рис. 5) и не вносил существенных ошибок при определении множественности нейтронов спонтанного деления.

Поскольку эффективность детектора нейтронов далека от 100%, данные по измеренным распределениям нейтронов по множественностям в экспериментах являются искаженными. Восстановление истинных распределений является обратной некорректной задачей, решение которой может быть найдено с использованием метода

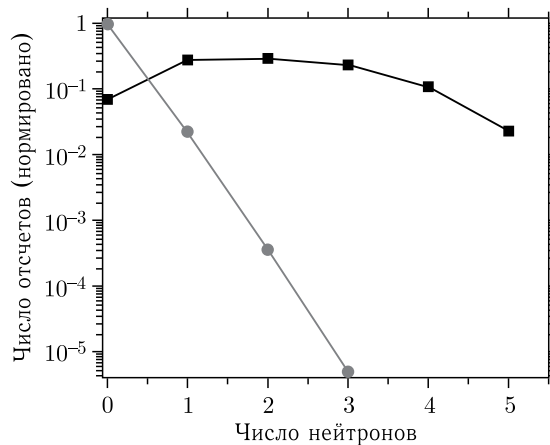


Рис. 5. Результаты сравнения измеренных множественностей фоновых нейтронов (кружки) и нейтронов от спонтанного деления ^{254}No (квадраты). Значения по вертикальной оси были нормированы по сумме

Таблица 2. Множественности нейтронов ^{254}No (значения нормированы)

Число нейтронов	Измеренное значение	Ошибка измеренного значения	Восстановленное значение	Ошибка восстановленного значения
0	0,069	0,023	0	0,023
1	0,277	0,046	0	0,025
2	0,292	0,047	0,059	0,070
3	0,231	0,042	0,140	0,079
4	0,108	0,029	0,208	0,082
5	0,023	0,013	0,241	0,083
6	0	—	0,218	0,098
7	0	—	0,131	0,092
8	0	—	0,003	0,050
9	0	—	0	0,060

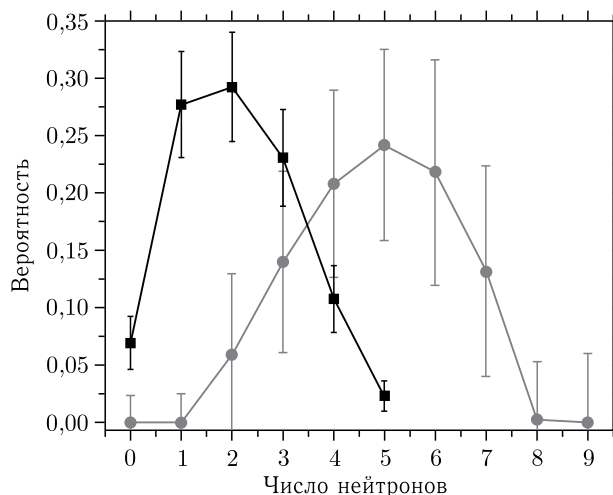


Рис. 6. Измеренные (квадраты) и восстановленные (кружки) спектры множественности нейтронов ^{254}No

статистической регуляризации А. Н. Тихонова [18, 19]. Суть метода заключается в поиске такого распределения, свертка которого с функцией детектора даст результат, ближайший к измеренному и удовлетворяющий априорной информации о среднем количестве нейтронов и дисперсии. Данный метод уже использовался для анализа выхода нейтронов в работах [20, 21], а применительно к нашим экспериментам подробно изложен в работе [22]. Измеренные и восстановленные множественности нейтронов и их ошибки приводятся в табл. 2 и на рис. 6. Дисперсия измеренного распределения с учетом эффективности детектора равна $\sigma_{\nu}^2 = 1,2$ нейтрона², а для восстановленного распределения дисперсия равна $\sigma_{\nu r}^2 = 2,0$ нейтрона².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены такие важные характеристики спонтанного деления изотопов $^{252,254}\text{No}$, как множественности нейтронов и периоды полураспада, а также дана сравнительная оценка полных кинетических энергий осколков.

Для ^{254}No определено среднее число нейтронов в акте деления $\bar{\nu} = (4,88 \pm 0,53)$ нейтрона. Проведенная оценка дисперсий измеренного (с учетом эффективности детектора) и восстановленного распределений нейтронов: $\sigma_{\nu}^2 = 1,2$ и $\sigma_{\nu r}^2 = 2,0$ нейтрона² соответственно. Все эти данные публикуются впервые.

Обновленная систематика среднего числа нейтронов в акте деления тяжелых ядер показана на рис. 7.

Чтобы существенно увеличить эффективность регистрации ЯО и проводить эксперименты в области более низких сечений, мы планируем использовать новую сборку из ППД — с 128×128 -стриповым (100×100 мм) фокальным Si-детектором. Поскольку геометрия вакуумной камеры с ППД сильно изменится, был произведен расчет новой оптимальной конфигурации нейтронного детектора с использованием программ MCNPX [23] и NeutronGeometry [24]. Общее количество ^3He -счетчиков будет увеличено до 116.

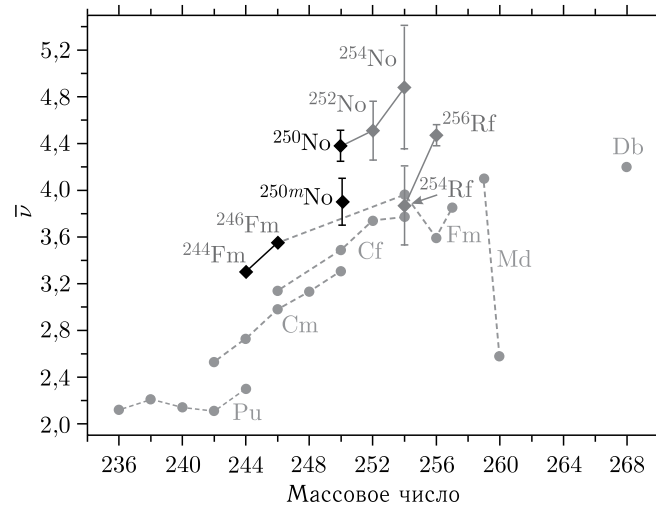


Рис. 7. Систематика среднего числа нейтронов спонтанного деления тяжелых ядер с добавленным новым значением для ^{254}No . Ромбами отмечены результаты, полученные в экспериментах на сепараторах VASSILISSA и SHELS

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-52-15004), а также ОМУС ОИЯИ (грант для молодых научных сотрудников ОИЯИ № 21-502-09, грантополучатель М. Тезекбаева).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Свирихин А. И., Ерёмин А. В., Изосимов И. Н., Исаев А. В., Кузнецов А. Н., Малышев О. Н., Попеко А. Г., Попов Ю. А., Сокол Е. А., Челноков М. Л., Чепигин В. И., Андел Б., Асфари М. З., Галл Б., Йошихиро Н., Каланинова З., Мулинс С., Пио Ж., Стефанова Е., Тонев Д. Спонтанное деление ^{256}Rf — новые данные // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 4(202). С. 759–762.
4. Свирихин А. И., Андреев А. В., Ерёмин А. В., Изосимов И. Н., Исаев А. В., Кузнецов А. Н., Кузнецова А. А., Малышев О. Н., Попеко А. Г., Попов Ю. А., Сокол Е. А., Челноков М. Л., Чепигин В. И., Шнейдман Т. М., Галл Б., Дорво О., Брионе П., Хошилд К., Лопез-Мартенс А., Резинкина К., Мулинс С., Джонс П., Мошати П. Характеристики спонтанного деления изотопа ^{250}No // Письма в ЭЧАЯ. 2017. Т. 14, № 4(209). С. 382–388.
5. Sulignano B., Heinz S., Heßberger F. P., Hofmann S., Ackermann D., Antalic S., Kindler B., Kojouharov I., Kuusiniemi P., Lommel B., Mann R., Nishio K., Popeko A. G., Saro S., Streicher B., Venhart M., Yeremin A. V. Identification of a *K* Isomer in ^{252}No // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 33. P. 327–331.

6. Heßberger F. P., Antalic S., Sulignano B., Ackermann D., Heinz S., Hofmann S., Kindler B., Khuyagbaatar J., Kojouharov I., Kuusiniemi P., Leino M., Lommel B., Mann R., Nishio K., Popeko A. G., Šáro Š., Streicher B., Uusitalo J., Venhart M., Yeremin A. V. Decay Studies of *K* Isomers in ²⁵⁴No // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 43. P. 55–66.
7. Herzberg R.-D., Greenlees P. T., Butler P. A., Jones G. D., Venhart M., Darby I. G., Eeckhaudt S., Eskola K., Grahn T., Gray-Jones C., Heßberger F. P., Jones P., Julin R., Juutinen S., Ketelhut S., Kortén W., Leino M., Leppänen A.-P., Moon S., Nyman M., Page R. D., Pakarinen J., Pritchard A., Rakkila P., Sarén J., Scholey C., Steer A., Sun Y., Theisen Ch., Uusitalo J. Nuclear Isomers in Superheavy Elements as Stepping Stones towards the Island of Stability // Nature. 2006. V. 442, No. 24. P. 896–899.
8. 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., Loughheed R. W. Measurements of Cross Sections for the Fusion-Evaporation Reactions ^{204,206,207,208}Pb + ⁴⁸Ca and ²⁰⁷Pb + ³⁴S: Decay Properties of the Even–Even Nuclides ²³⁸Cf and ²⁵⁰No // Phys. Rev. C. 2001. V. 64. P. 054606.
9. Lazarev Yu. A., Lobanov Yu. V., Sagaidak R. N., Utyonkov V. K., Hussonnois M., Kharitonov Yu. P., Shirokovsky I. V., Tretyakova S. P., Oganessian Yu. Ts. Study of the Stability of the Ground States and *K*-Isomeric States of ²⁵⁰Fm and ²⁵⁴102 against Spontaneous Fission // Physica Scripta. 1989. V. 39. P. 422–435.
10. 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 ²⁵²No // Phys. Rev. C. 1977. V. 15. P. 705–712.
11. Wild J. F., Hulet E. K., Loughheed R. W., Moody K. J., Bandong B. B., Dougan R. J., Veeck A. Spontaneous Fission Properties of ^{252,254}No and ^{256,258}[104] and the Disappearance of the Outer Fission Barrier // J. Alloys Compd. 1994. V. 213–214. P. 86–92.
12. Lazarev Yu. A., Nefediev O. K., Oganessian Yu. Ts., Dakowski M. Multiplicity of Prompt Neutrons from Spontaneous Fission of the Isotope ²⁵²102 // Phys. Lett. B. 1974. V. 52, No. 3. P. 321–324.
13. Yeremin A. V., Belozеров A. V., Chelnokov M. L., Chepigina V. I., Gorshkov V. A., Kabachenko 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 Setup VASSILISSA // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 539. P. 441–444.
14. Popeko A. G., Yeremin A. V., Malyshev O. N., Chepigina V. I., Isaev A. V., Popov Yu. A., Svirikhin A. I., Hauschild K., Lopez-Martens A., Rezyunkina K., Dorvaux O. Separator for Heavy Element Spectroscopy — Velocity Filter SHELS // Nucl. Instr. Meth. B. 2016. V. 376. P. 140–143.
15. Isaev A. V., Yeremin A. V., Zamyatin N. I., Kuznetsov A. N., Malyshev O. N., Svirikhin A. I., Chelnokov M. L., Chepigina 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.
16. Svirikhin A. I., Isaev A. V., Yeremin A. V., Kuznetsov A. N., Malyshev O. N., Popeko A. G., Sokol E. A., Chelnokov M. L., Chepigina 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.
17. Исходный код программы NeutronBarrel. <https://github.com/siberianisaev/NeutronBarrel>.
18. Турчин В. Ф., Козлов В. П., Малкевич М. С. Использование методов математической статистики для решения некорректных задач // УФН. 1970. Т. 102, № 3. С. 345–386.

19. Турчин В. Ф. Решение уравнения Фредгольма I рода в статистическом ансамбле гладких функций // Журн. вычисл. математики и матем. физики. 1967. Т. 7, № 6. С. 1270–1284.
20. Dakowski M., Lazarev Yu. A., Turchin V. F., Turovtseva L. S. Reconstruction of Particle Multiplicity Distribution Using the Method of Statistical Regularization // Nucl. Instr. Meth. 1973. V. 113, No. 2. P. 195–200.
21. Dushin V. N., Hamsch F.-J., Jakovlev V. A., Kalinin V. A., Kraev I. S., Laptev A. B., Nikolaev D. V., Petrov B. F., Petrov G. A., Petrova V. I., Pleva Y. S., Shcherbakov O. A., Shpakov V. I., Sokolov V. E., Vorobyev A. S., Zavarukhina T. A. Facility for Neutron Multiplicity Measurements in Fission // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 516, No. 2–3. P. 539–553.
22. Мухин Р. С., Душин В. Н., Еремин А. В., Изосимов И. Н., Исаев А. В., Свирихин А. И. Восстановление спектров распределения нейтронов спонтанного деления по множественностям методом статистической регуляризации // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 4(236). С. 339–346; Препринт ОИЯИ Р6-2021-6. Дубна, 2021.
23. Pelowitz D. B., Durkee J. W., Elson J. S., Fensin M. L., Hendricks J. S., James M. R., Johns R. C., McKinney G. W., Mashnik S. G., Waters L. S., Wilcox T. A., Verbeke J. M. MCNPX 2.7.0 Extensions. United States: N. p. 2011; doi:10.2172/1058045.
24. Исходный код программы NeutronGeometry. <https://github.com/siberianisaev/NeutronGeometry>.

Получено 20 февраля 2021 г.