

МГНОВЕННЫЕ НЕЙТРОНЫ СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ ^{254}Rf

А. И. Свирихин^{а, б, 1}, *А. В. Андреев*^а, *А. В. Еремин*^{а, б}, *Н. И. Замятин*^а,
И. Н. Изосимов^а, *А. В. Исаев*^а, *А. Н. Кузнецов*^а, *А. А. Кузнецова*^а,
О. Н. Малышев^{а, б}, *А. Г. Попеко*^{а, б}, *Ю. А. Попов*^{а, б}, *Е. А. Сокол*^а,
М. С. Тезекбаева^{а, в}, *М. Л. Челноков*^а, *В. И. Чепигин*^а, *Т. М. Шнейдман*^а,
Б. Андел^г, *С. Антали*^г, *А. Бронис*^г, *П. Мошат*^г, *Б. Галл*^д, *О. Дорво*^д,
Б. М. Рэтайо^д, *К. Хошильд*^е, *А. Лопез-Мартенс*^е, *П. Шово*^е,
Е. Стефанова^ж, *Д. Тонев*^ж

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

^в Институт ядерной физики, Алма-Ата, Республика Казахстан

^г Университет им. Я. Коменского, Братислава

^д IPHC, IN2P3-CNRS, Страсбург, Франция

^е CSNSM, IN2P3-CNRS, Орсе, Франция

^ж Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской АН, София

С использованием комбинированной детектирующей системы сепаратора SHELS проведено измерение выходов нейтронов спонтанного деления короткоживущего нейтронодефицитного ядра ^{254}Rf , получаемого в реакции полного слияния на пучке многозарядных ионов ускорителя У-400 ЛЯР. Кроме того, для указанного ядра были измерены период полураспада и относительная вероятность распада по каналу спонтанного деления. Данные о множественности мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{254}Rf ($\bar{\nu} = 3,87 \pm 0,34$) приводятся впервые.

The neutron-deficient isotope ^{254}Rf , produced in the complete fusion reaction with the heavy ion beam and SHELS separator, was investigated with the use of combined detection system. The half-life and decay branching ratio of ^{254}Rf are measured. The average number of neutrons per spontaneous fission of ^{254}Rf ($\bar{\nu} = 3.87 \pm 0.34$) is determined for the first time.

PACS: 23.70.+j; 25.70.Jj; 25.85.Ca; 27.90.+b

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе описан эксперимент, продолжающий цикл исследовательских работ по изучению характеристик спонтанного деления ядер, лежащих в экзотической области трансфермиевых короткоживущих нейтронодефицитных изотопов. В реакциях с тяжелыми ионами (^{40}Ar , ^{48}Ca , ^{50}Ti) были синтезированы короткоживущие нейтронодефицитные изотопы $^{250,252}\text{No}$ [1, 2], $^{244,246}\text{Fm}$ [2, 3] и ^{256}Rf [4], определены периоды

¹E-mail: asvirikhin@jinr.ru

их полураспада, вероятности распада через спонтанное деление (b_{SF} , branching ratio), а также оценены полные кинетические энергии (ТКЕ, total kinetic energy) осколков деления. Основной задачей этих экспериментов было получение новых данных по такой важной составляющей процесса спонтанного деления, как испарение мгновенных нейтронов. Для теории деления ядер важно, что испускаемое в процессе деления количество нейтронов непосредственно зависит от степени возбуждения осколков деления и, таким образом, играет важную роль в восстановлении энергетического баланса реакции.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ядра ^{254}Rf синтезировались в реакции полного слияния $^{50}\text{Ti}(^{206}\text{Pb}, 2n)$. Мишень из ^{206}PbS ($0,39 \text{ мг/см}^2$), нанесенного на подложку из титана толщиной $1,5 \text{ мкм}$, облучалась пучком многозарядных ионов ^{50}Ti с энергией $(253,5 \pm 1,0) \text{ МэВ}$. Обогащение мишени по изотопу ^{206}Pb составляло $99,5 \%$, состав примесей: $^{208}\text{Pb} \leq 0,25 \%$, $^{207}\text{Pb} \leq 0,25 \%$. Разделение искомых ядер с продуктами побочных реакций осуществлялось сепаратором SHELS [5, 6], работающим по схеме «фильтр скоростей». После сепарации ядра ^{254}Rf проходят через времяпролетный детектор и останавливаются в комбинированной детектирующей системе, смонтированной в фокальной плоскости сепаратора SHELS.

Детектирующая система включает в себя фокальный кремниевый DSSS-детектор (48×48 стрипов) размером $60 \times 60 \text{ мм}$, где происходит регистрация полученных ядер, а также испускаемых ими α -частиц и осколков спонтанного деления. С целью увеличения эффективности регистрации продуктов распада, вылетевших из фокального DSSS-детектора, вокруг него в обратной полусфере дополнительно смонтированы четыре боковых стриповых детектора, которые образуют «колодец» [7]. Вокруг вакуумной камеры с «колодцем» фокального детектора смонтирована сборка из $54 \text{ } ^3\text{He}$ -счетчиков нейтронов в замедлителе. Чтобы исключить влияние фоновых нейтронов, регистрация нейтронов спонтанного деления осуществлялась по сигналу-триггеру от фокального DSSS-детектора. Сепаратор SHELS в комбинации с этой детектирующей системой позволяет проводить эксперименты по изучению свойств короткоживущих изотопов с периодом полураспада от нескольких микросекунд.

Типичное энергетическое разрешение фокального DSSS-детектора для α -частиц в диапазоне $6\text{--}10 \text{ МэВ}$ составляет величину порядка 20 кэВ . Позиционное разрешение детектора 1 мм . Эффективность нейтронного детектора, измеренная при помощи источника ^{248}Cm , составила $(45 \pm 1) \%$ для единичных нейтронов. При работающем ускорителе счет фоновых нейтронов не превышал 100 с^{-1} .

РЕЗУЛЬТАТЫ

За время эксперимента в фокальной плоскости сепаратора было зарегистрировано 130 актов спонтанного деления, относящихся к распаду ядра ^{254}Rf . Идентификация искомых ядер осуществлялась путем поиска коррелированных событий «ЯО-деление» во временном «окне» $1 \leq \tau \leq 200 \text{ мкс}$ (рис. 1). Вычисленный период полураспада составил значение $(32 \pm 10) \text{ мкс}$, которое хорошо согласуется с ранее опубликованными значениями [8, 9]. Как и в предыдущих работах [8, 9], не удалось обнаружить ни одного

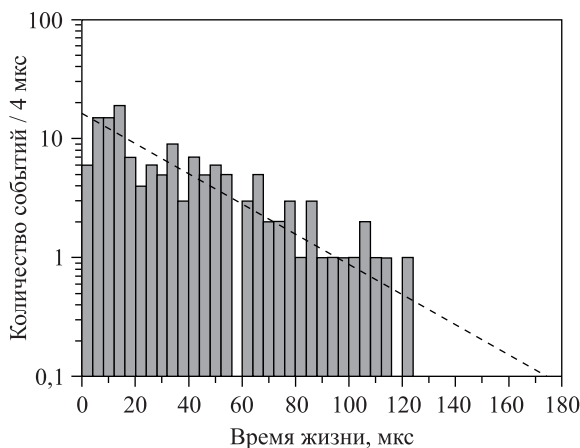


Рис. 1. Распределение коррелированных событий «ЯО-деление», разбитое на интервалы 4 мкс. Штриховая линия — экспонента (приводится для наглядности)

α -распада, соответствующего распаду ^{254}Rf , таким образом, вероятность спонтанного деления для этого изотопа близка к 100 %.

Методические возможности детектирующей системы не позволили идентифицировать двух- и четырехквaziчастичные K -изомерные состояния ^{254}Rf , обнаруженные в эксперименте [9] и сопровождающиеся испусканием конверсионных электронов (СЕ).

Среднее число нейтронов на один акт спонтанного деления ^{254}Rf измерялось впервые и составило $\bar{\nu} = 3,87 \pm 0,34$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные нами результаты сравнивались с расчетами, сделанными в рамках усовершенствованной модели точки разрыва [10], где делящееся ядро рассматривается как двойная ядерная система, состоящая из двух соприкасающихся фрагментов эллипсоидальной формы. Энергия возбуждения системы в момент разрыва рассчитывается как разница между потенциальной энергией делящегося ядра в основном состоянии и потенциальной энергией двойной ядерной системы в точке разрыва.

Потенциальная энергия системы есть сумма «жидкокапельных» энергий фрагментов, оболочечных поправок, кулоновского и ядерного взаимодействий фрагментов. Модель позволяет рассчитывать потенциальную энергию двойной ядерной системы в зависимости от массовой и зарядовой асимметрий и от параметров деформаций осколков. Средние значения этих параметров находятся с помощью статистического подхода.

Важную роль в расчетах играют деформации осколков, так как осколки значительно деформированы в точке разрыва; энергия деформации, высвобождающаяся после их разделения, увеличивает энергию возбуждения осколков. Энергия возбуждения снимается последующим испарением нейтронов и гамма-квантов. Число испускаемых осколками нейтронов рассчитывается из предположения, что каждый вылетевший нейтрон уменьшает энергию возбуждения на величину его энергии связи, а средняя кинетическая энергия нейтрона равна удвоенной температуре осколка. Среднее число нейтронов получается

усреднением по распределению параметров двойной ядерной системы в точке разрыва и внесением поправки на испускание гамма-квантов. Экспериментальные значения $\bar{\nu}$, полученные в работе, сравнивались с расчетными значениями, вычисленными с использованием описанной выше модели. Эта модель с хорошей точностью описывает динамику процесса деления, и, как видно из таблицы, соответствие расчетов и экспериментальных данных находится на высоком уровне.

Имеющиеся экспериментальные данные о величине среднего числа нейтронов на деление $\bar{\nu}$, полученные для спонтанного деления изотопов от Pu до Db, представлены на рис. 2. Полученное значение среднего числа нейтронов на одно спонтанное деление для ^{254}Rf ($\bar{\nu} = 3,87 \pm 0,34$) не выбивается из тенденции к уменьшению среднего числа испа-

Ядро	Расчетное значение* $\bar{\nu}$	Экспериментальное значение $\bar{\nu}$	Расчетное значение* ТКЕ, МэВ	Экспериментальное значение ТКЕ, МэВ
^{248}Cm	3,1	$3,13 \pm 0,01$	183	182
^{252}Cf	3,6	$3,77 \pm 0,01$	186	$184,1 \pm 1,3$
^{244}Fm	3,5	$3,3 \pm 0,3^{**}$	196	$195 \pm 14^{**}$
^{246}Fm	3,6	$3,6 \pm 0,5^{**}$	196	199 ± 4
^{250}No	4,3	$4,38 \pm 0,22^{**}$	202	$192 \pm 14^{**}$
^{252}No	4,1	$4,06 \pm 0,12^{**}$	201	$198,7 \pm 1,2$
^{254}Rf	4,7	$3,87 \pm 0,34^{**}$	—	—
^{256}Rf	4,6	$4,47 \pm 0,09^{**}$	208	$220 \pm 15^{**}$

* Расчет в модели [10].
** Результаты наших экспериментов.

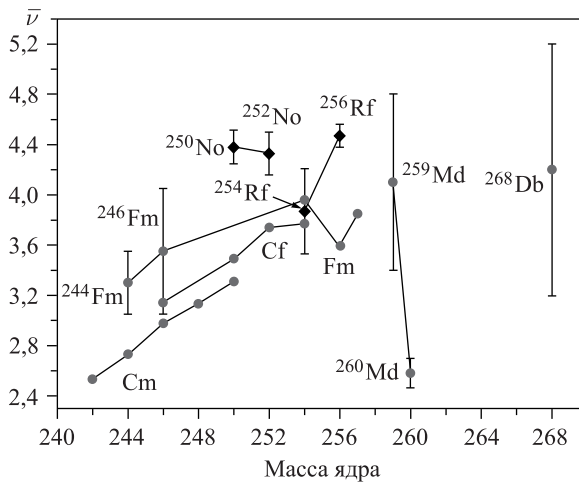


Рис. 2. Систематика среднего числа нейтронов спонтанного деления $\bar{\nu}$ (кружки) в зависимости от массы ядра A . Ромбы — результаты, полученные на сепараторе SHELS [1, 4]

ряемых нейтронов с уменьшением массы изотопа, а некоторое расхождение с расчетом в модели [10] можно объяснить невысокой статистикой экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа, выполненная на сепараторе SHELS, продолжила ряд успешных экспериментов по определению характеристик спонтанного деления короткоживущих нейтрондефицитных ядер. Невысокая статистика данных показывает, что необходимо увеличение эффективности детектирующей системы либо использование более интенсивных пучков ионов. Решением проблемы недостаточной эффективности является запланированная модернизация комбинированной детектирующей системы с заменой «колодца» с фокальным DSSS-детектором на ППД сборку, используемую в проекте GABRIELA [6] и перекрывающую значительно большую площадь фокальной плоскости (100×100 мм) сепаратора. Переход на более интенсивные пучки ионов может быть связан с запуском нового циклотрона DC-280, который входит в комплекс «Фабрика сверхтяжелых элементов» ЛЯР.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 17-02-00867, 18-52-15004), а также при поддержке ОМУС ОИЯИ (грант для молодых научных сотрудников ОИЯИ № 19-502-10, М. Тезекбаева).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свирихин А. И., Андреев А. В., Еремин 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., Хошильд К., Лопез-Мартенс А., Резинкина К., Мулинс С., Джонс П., Мошат П. Характеристики спонтанного деления изотопа ^{250}No // Письма в ЭЧАЯ. 2017. Т. 14, № 4(209). С. 382–388.
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., Yeregin 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.
3. 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., Yeregin A. V. Neutron Multiplicity at Spontaneous Fission of ^{246}Fm // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 44. P. 393.
4. Свирихин А. И., Еремин 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.
5. Еремин А. В., Попеко А. Г., Малышев О. Н., Галл Б., Асфари Ж., Лопез-Мартенс А., Хошильд К., Дорво О., Гикал Б. Н., Богомолов С. Л., Логинов В. Н., Бондаренко А. Е., Чепигин В. И., Свирихин А. И., Исаев А. В., Сокол Е. А., Челноков М. Л., Кузнецов А. Н., Кузнецова А. А., Попов Ю. А., Резинкина К., Дешери Ф., Андел Б., Хофманн З., Маурер И., Хайнц С., Руберт Ж. Экспериментальные тесты модернизированного сепаратора ВАСИЛИСА (SHELS) с использованием ускоренных ионов ^{50}Ti // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 1(192). С. 74–80.
6. Popeko A. G., Yeregin A. V., Malyshev O. N., Chepigin V. I., Isaev A. V., Popov Yu. A., Svirikhin A. I., Haushild K., Lopez-Martens A., Rezykina K., Dorvaux O. Separator for Heavy Element Spectroscopy — Velocity Filter SHELS // Nucl. Instr. Meth. B. 2016. V. 376. P. 140.

7. Исаев А. В., Еремин А. В., Замятин Н. И., Кузнецов А. Н., Мальшиев О. Н., Свирихин А. И., Челноков М. Л., Чепигин В. И., Hauschild K., Lopez-Martens A., Dorvaux O. Применение двух-стороннего стрипового Si-детектора в фокальной плоскости сепаратора ВАСИЛИСА // ПТЭ. 2011. № 1. С. 43–48.
8. Khuyagbaatar J., Yakushev A., Düllmann Ch. E., Ackermann D., Andersson L.-L., Block M., Brand H., Even J., Forsberg U., Hartmann W., Herzberg R.-D., Heßberger F. P., Hoffmann J., Hübner A., Jäger E., Jeppsson J., Kindler B., Kratz J. V., Krier J., Kurz N., Lommel B., Maiti M., Minami S., Rudolph D., Runke J., Sarmiento L. G., Schädel M., Schausten B., Steiner J., Torres De Heidenreich T., Uusitalo J., Wiehl N., Yakusheva V. Fission in the Landscape of Heaviest Elements: Some Recent Examples // Proc. of the Nobel Symp. “NS160” — Chemistry and Physics of Heavy and Superheavy Elements, Bäckaskog Castle, Sweden, 2016; EPJ Web of Conf. 2016. V. 131. P. 03003.
9. David H. M., Chen J., Seweryniak D., Kondev F. G., Gates J. M., Gregorich K. E., Ahmad I., Albers M., Alcorta M., Back B. B., Baartman B., Bertone P. F., Bernstein L. A., Campbell C. M., Carpenter M. P., Chiara C. J., Clark R. M., Cromaz M., Doherty D. T., Dracoulis G. D., Esker N. E., Fallon P., Gothe O. R., Greene J. P., Greenlees P. T., Hartley D. J., Hauschild K., Hoffman C. R., Hota S. S., Janssens R. V. F., Khoo T. L., Konki J., Kwasnick J. T., Lauritsen T., Macchiavelli A. O., Mudder P. R., Nair C., Qiu Y., Rissanen J., Rogers A. M., Ruotsalainen P., Savard G., Stolze S., Wiens A., Zhul S. Decay and Fission Hindrance of Two- and Four-Quasiparticle *K* Isomers in ^{254}Rf // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 132502.
10. Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V., Ivanova S. P., Kuklin S. N., Scheid W. Ternary Fission within Statistical Approach // Eur. Phys. J. A. 2006. V. 30. P. 579.

Получено 13 июня 2019 г.