

## НОВЫЙ ИЗОТОП $^{249}\text{No}$

*А. И. Свирихин<sup>a,б,1</sup>, А. В. Ерёмин<sup>a,б</sup>, Н. И. Замятин<sup>a</sup>,  
И. Н. Изосимов<sup>a</sup>, А. В. Исаев<sup>a</sup>, А. А. Кузнецова<sup>a</sup>, О. Н. Малышев<sup>a,б</sup>,  
Р. С. Мухин<sup>a</sup>, А. Г. Попеко<sup>a,б</sup>, Ю. А. Попов<sup>a,б</sup>, Е. А. Сокол<sup>a</sup>,  
Б. Сайлаубеков<sup>a,б</sup>, М. С. Тезекбаева<sup>a,б</sup>, М. Л. Челноков<sup>a</sup>,  
В. И. Чепигин<sup>a</sup>, Б. Андел<sup>с</sup>, С. Антали<sup>с</sup>, А. Бронис<sup>с</sup>, П. Мошат<sup>с</sup>,  
Б. Галл<sup>д</sup>, О. Дорво<sup>д</sup>, А. Лопез-Мартенс<sup>е</sup>, К. Хошилд<sup>е</sup>*

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

<sup>с</sup> Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан,  
Алма-Ата, Казахстан

<sup>д</sup> Университет им. Я. Коменского, Братислава

<sup>е</sup> IPHC, IN2P3-CNRS, Страсбург, Франция

<sup>1</sup> IJCLab, IN2P3-CNRS, Университет Париж–Сакле, Орсе, Франция

В эксперименте, проводившемся на кинематическом сепараторе SHELS, в реакции полного слияния ионов  $^{48}\text{Ca}$  с ядрами мишени из  $^{204}\text{PbS}$  была зарегистрирована  $\alpha$ -активность, относящаяся к распаду нового, ранее неизвестного изотопа —  $^{249}\text{No}$ . С использованием комбинированной детектирующей системы GABRIELA для этого ядра измерены энергия  $\alpha$ -распада ( $E_\alpha = 9129$  кэВ) и период полураспада ( $T_{1/2} = (38,1 \pm 2,5)$  мс), а также проведена оценка коэффициента ветвления распада по отношению к спонтанному делению ( $b_{\text{SF}} \leq 0,23\%$ ).

In the experiment carried out on the SHELS separator, in the complete fusion reaction of  $^{48}\text{Ca}$  ions with the  $^{204}\text{PbS}$  target, the new  $\alpha$  line was recorded, related to the decay of a new, previously unknown isotope —  $^{249}\text{No}$ . Using the GABRIELA combined detection system, the  $\alpha$ -decay energy ( $E_\alpha = 9129$  keV) and the half-life ( $T_{1/2} = (38.1 \pm 2.5)$  ms) were measured, and the SF branching ratio was estimated ( $b_{\text{SF}} \leq 0.23\%$ ).

PACS: 21.10.Tg; 23.60.+e; 25.70.-z; 23.70.+j

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для синтеза изотопов трансфермиевых элементов в основном используются реакции полного слияния ядер мишени с тяжелыми ионами, реализуемые на пучках многозарядных ионов сильноточных ускорителей. Для отделения искоемых ядер — остатков испарения (ядер отдачи — ЯО) от побочных продуктов взаимодействия пучка с ядрами мишени наиболее успешно себя зарекомендовали

<sup>1</sup>E-mail: asvirikhin@jinr.ru

методики, использующие различные кинематические характеристики ЯО и фоновых продуктов реакций.

В результате глубокой модернизации сепаратора VASSILISSA [1] был создан кинематический сепаратор (фильтр скоростей) SHELS [2, 3], который с использованием комбинированной детектирующей системы GABRIELA [4, 5] позволяет успешно выделять и регистрировать ядра из области трансфермиевых элементов. В этой работе описывается эксперимент, в котором был синтезирован новый короткоживущий нейтронодефицитный изотоп нобелия —  $^{249}\text{No}$ . Он получен в реакции полного слияния ядер мишени из  $^{204}\text{Pb}$  с ионами  $^{48}\text{Ca}$ , выведенного из циклотрона У-400, в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова (ЛЯР ОИЯИ).

В ЛЯР ОИЯИ ранее успешно проводились эксперименты, направленные на изучение сечений образования и свойств радиоактивного распада нейтронодефицитных ядер нобелия. Одно из первых сообщений о синтезе спонтанно делящегося изотопа  $^{250}\text{No}$ , полученного на выведенном пучке циклотрона У-300 (ЛЯР ОИЯИ), было опубликовано в 1975 г. [6]. Использовалась реакция полного слияния  $^{233}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 5n)$ , период полураспада  $^{250}\text{No}$  составил  $T_{1/2} = 0,25$  мс. В 2002 г. на сепараторе VASSILISSA в реакции  $^{204}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)$  был снова синтезирован изотоп  $^{250}\text{No}$ , но с периодом полураспада  $T_{1/2} = 5,9$  мкс, а спонтанное деление ядра с  $T_{1/2} = 54$  мкс было отнесено к распаду ранее неизвестного изотопа —  $^{249}\text{No}$  [7]. Однако в работе [8] при прямом измерении массы ЯО на масс-анализаторе FMA (Аргон, США) было показано, что эта спонтанно делящаяся активность относится, скорее, к изомерному состоянию ядра  $^{250}\text{No}$ .

В дальнейшем увеличенная эффективность транспортировки ЯО сепаратора SHELS в сравнении с сепаратором VASSILISSA позволила провести эксперимент [9], в котором изучались обнаруженные ранее активности, отнесенные к распадам нейтронодефицитных изотопов нобелия при разных энергиях пучка. Из сравнения полученных значений выходов короткоживущих спонтанно делящихся активностей с опубликованными ранее значениями функции возбуждения для реакции  $^{48}\text{Ca}(^{204}\text{Pb}, xn)^{252-x}\text{No}$  [7] был сделан вывод, что зарегистрированные события относятся к спонтанному делению из основного ( $T_{1/2} = (5,1 \pm 0,3)$  мкс) и изомерного ( $T_{1/2} = (36 \pm 3)$  мкс) состояний ядра  $^{250}\text{No}$ .

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В описываемом эксперименте ускоренный пучок ионов  $^{48}\text{Ca}$ , выведенный из циклотрона У-400, со средней интенсивностью  $0,5$  мкА · частиц взаимодействовал с вращающейся мишенью из  $^{204}\text{PbS}$  толщиной  $(0,47 \pm 0,1)$  мг/см<sup>2</sup>. Мишень была нанесена методом электроосаждения на подложку из титановой фольги толщиной  $1,5$  мкм. Обогащение мишенного материала по  $^{204}\text{Pb}$  составляло  $99,94\%$ , состав примесей:  $^{206}\text{Pb}$  —  $0,04\%$ ,  $^{207}\text{Pb}$  —  $0,01\%$ ,  $^{208}\text{Pb}$  —  $0,01\%$ . Энергия ионов  $^{48}\text{Ca}$  в ходе эксперимента варьировалась для определения выхода изотопов  $^{249,250,251}\text{No}$  из  $3n$ -,  $2n$ - и  $1n$ -каналов реакций полного слияния соответственно. В экспериментально обнаруженном максимуме функции возбуждения  $3n$ -канала реакции энергия пучка в середине мишени составляла  $E_{\text{lab}} = 225,4$  МэВ. После сепарации продукты реакций пролетали через времяпролетный детектор и регистрировались в детектирующей системе GABRIELA, установленной в фокальной плоскости сепаратора.

Детектирующая система включает в себя фокальный кремниевый DSSS-детектор (DSSSD в конфигурации  $128 \times 128$  стрипов) размером  $100 \times 100$  мм, в котором происходит регистрация полученных ядер и продуктов их распада ( $\alpha$ -частиц, электронов и осколков спонтанного деления). Вокруг фокального DSSSD, в обратной полусфере, дополнительно смонтирована сборка-«колодец» из восьми боковых детекторов (DSSSD в конфигурации  $16 \times 16$  стрипов) с целью увеличения эффективности регистрации продуктов распада, вылетевших с фокального DSSSD. Геометрическая эффективность регистрации вылетевших в обратную полусферу частиц составляет 55% от  $2\pi$ , это значение определено путем анализа зарегистрированных в «колодце» осколков спонтанного деления получаемых ранее ядер  $^{250,252}\text{No}$ . Энергетическое разрешение фокального DSSSD для  $\alpha$ -частиц в диапазоне 6–10 МэВ составляет величину порядка 20 кэВ. Позиционное разрешение детектора определяется шириной горизонтальных и вертикальных стрипов и составляет 0,8 мм. Для калибровки и проверки амплитудных и временных характеристик DSSSD используются тестовые реакции, приводящие к образованию известных изотопов с большими сечениями образования. В данном случае использовались реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{164}\text{Dy} \rightarrow ^{212}\text{Rn}^*$  и  $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb} \rightarrow ^{222}\text{Th}^*$ .

Для регистрации гамма-квантов, сопровождающих распад ЯО, вокруг вакуумной камеры с «колодцем» фокального детектора расположены четыре коаксиальных HPGe-детектора, а на минимальном расстоянии от фокального DSSSD смонтирован HPGe-детектор «клеверного» типа. Эффективность регистрации гамма-квантов сборкой германиевых детекторов достигает 30% для фотонов с энергией около 100 кэВ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

За время эксперимента в фокальной плоскости сепаратора было зарегистрировано около 220 событий, относящихся к  $\alpha$ -распаду нового изотопа  $^{249}\text{No}$ . Идентификация искомого ядра осуществлялась путем поиска коррелированных событий « $\alpha$ -ЯО». Поиск ЯО осуществлялся в том же «пикселе» DSSSD, что и событие распада искомого ядра. Энергия ЯО после пролета через сепаратор и времяпролетную систему находится в диапазоне от 1 до 18 МэВ. Поиск коррелированных  $\alpha$ -распадов  $^{249}\text{No}$  осуществлялся во временном «окне»  $0 \leq \tau \leq 500$  мс с энергией  $\alpha$ -частиц в диапазоне  $5 \leq E_\alpha \leq 10$  МэВ. Для более достоверной идентификации нового изотопа проводился поиск генетически связанных цепочек распада « $\alpha$ - $\alpha$ -ЯО» (рис. 1), при этом была обнаружена  $\alpha$ -активность, относящаяся к известному, но слабо изученному ядру  $^{245}\text{Fm}$  ( $E_\alpha = 8169$  кэВ).

Периоды полураспада искомого и дочернего ядер вычислялись с использованием методики анализа распределений экспериментально измеренных времен жизни на логарифмической шкале [10]. Вычисленный период полураспада ядра  $^{245}\text{Fm}$  составил  $(5,4 \pm 0,8)$  с, это значение хорошо согласуется с табличным значением  $T_{1/2} = (4,2 \pm 1,3)$  с [11].

Активность с энергией  $\alpha$ -частиц, равной 9129 кэВ, и периодом полураспада  $T_{1/2} = (38,1 \pm 2,5)$  мс ранее не регистрировалась и относится к распаду нового ядра —  $^{249}\text{No}$ .

Кроме того, было обнаружено несколько десятков событий, относящихся к распадам ядер  $^{241}\text{Cf}$  и  $^{245}\text{Es}$ , которые являются дочерними продуктами ядра  $^{245}\text{Fm}$  по

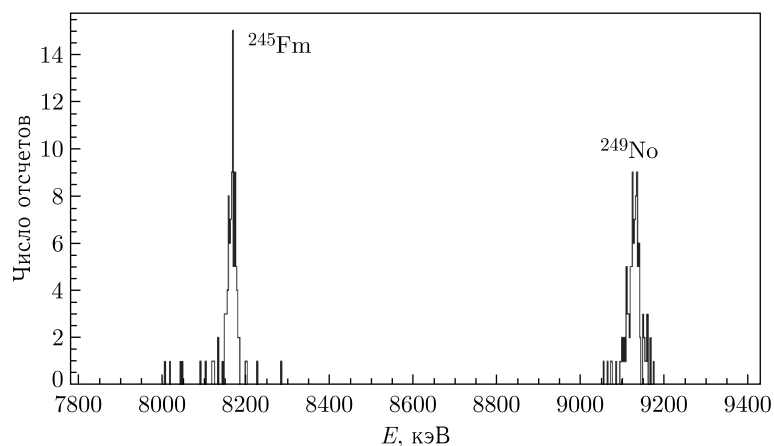


Рис. 1. Энергия  $\alpha$ -частиц ядра  $^{249}\text{No}$  и его дочернего ядра  $^{245}\text{Fm}$ , полученных путем анализа корреляций « $\alpha$ - $\alpha$ -ЯО»

ветвям  $\alpha$ - и  $\beta$ -распада соответственно. Для уточнения этих данных необходимо более детальное изучение свойств распада ядра  $^{245}\text{Fm}$ .

Алгоритм поиска корреляций «осколок-ЯО» был использован для регистрации возможных актов спонтанного деления  $^{249}\text{No}$  для событий с энергией более 30 МэВ,

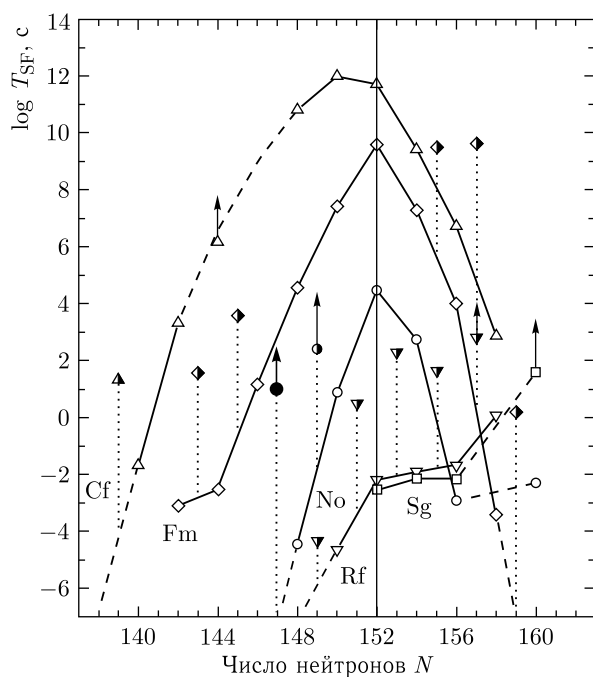


Рис. 2. Систематика парциальных периодов полураспада спонтанно делящихся изотопов некоторых тяжелых элементов: светлые символы — четно-четные ядра; наполовину заполненные символы — четно-нечетные ядра; темный кружок — значение из данной работы

характерной для осколков деления. Всего одно такое событие с временем распада более 200 мс позволяет определить верхнюю границу вероятности распада  $^{249}\text{No}$  спонтанным делением:  $b_{\text{SF}} \leq 0,23\%$ . Это значение находится в согласии с тенденцией к увеличенной стабильности четно-нечетных тяжелых ядер по отношению к спонтанному делению (рис. 2). Наблюдаемое уменьшение стабильности относительно соседнего четно-нечетного ядра  $^{251}\text{No}$  объясняется большей удаленностью от подболочки  $N = 152$  (вертикальная линия на рис. 2).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа, выполненная на сепараторе SHELS, является продолжением ряда успешных экспериментов по определению свойств распада короткоживущих нейтронодефицитных ядер. Статистика данных, набранных в эксперименте, показывает, что для детального изучения схемы распада изотопа  $^{249}\text{No}$  (а также его дочерних продуктов распада) необходимо проведение более длительного эксперимента либо использование более интенсивных пучков ионов, например, выведенных из ускорителя ДЦ-280 («Фабрика сверхтяжелых элементов» ЛЯР ОИЯИ).

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). Эксперимент проводился в рамках соглашения между ОИЯИ (Дубна, Россия) и IN2P3 (Франция) № 04-63. С французской стороны работа поддерживалась ANR (гранты ANR-06-BLAN-0034-01 и ANR-12-BS05-0013).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yeremin A. V., Andreyev A. N., Bogdanov D. D., Ter-Akopian G. M., Chepigin V. I., Gorshkov V. A., Kabachenko A. P., Malyshev O. N., Popeko A. G., Sagaidak R. N., Sharo S., Voronkov E. N., Taranenko A. V., Lavrentjev A. Yu. The Kinematic Separator VASSILISSA Performance and Experimental Results // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 350. P. 608.
2. 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., Rezyunkina K., Dorvaux O. Separator for Heavy Element Spectroscopy — Velocity Filter SHELS // Nucl. Instr. Meth. B. 2016. V. 376. P. 140.
3. Ерёмин 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  $^{50}\text{Ti}$  // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 1(192). С. 74.
4. Hauschild K., Yeremin A. V., Dorvaux O., Lopez-Martens A., Belozero A. V., Briançon Ch., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Garcia-Santamaria S. A., Gorshkov V. A., Hanappe F., Kabachenko A. P., Korichi A., Malyshev O. N., Oganessian Yu. Ts., Popeko A. G., Rowley N., Shutov A. V., Stuttgé L., Svirikhin A. I. GABRIELA: A New Detector Array for  $\gamma$ -Ray and Conversion Electron Spectroscopy of Transfermium Elements // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 560. P. 388.

5. *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.
6. *Ter-Akopyan G. M., Iljinov A. S., Oganessian Yu. Ts., Orlova O. A., Popeko G. S., Tretyakova S. P., Chepigin V. I., Shilov B. V., Flerov G. N.* Synthesis of the New Neutron-Deficient Isotopes <sup>250</sup>102, <sup>242</sup>Fm and <sup>254</sup>Ku // *Nucl. Phys. A.* 1975. V. 255. P. 509.
7. *Belozero A. V., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Drobina T. P., Gorshkov V. A., Kabachenko A. P., Malyshev O. N., Merkin I. M., Oganessian Yu. Ts., Popeko A. G., Sagaidak R. N., Svirikhin A. I., Yeremin A. V., Berek G., Brida I., Saro S.* Spontaneous-Fission Decay Properties and Production Cross-Sections for the Neutron-Deficient Nobelium Isotopes Formed in the <sup>44,48</sup>Ca + <sup>204,206,208</sup>Pb Reactions // *Eur. Phys. J. A.* 2003. V. 16. P. 447.
8. *Peterson D., Back B. B., Janssens R. V. F., Khoo T. L., Lister C. J., Seweryniak D., Ahmad I., Carpenter M. P., Davids C. N., Hecht A. A., Jiang C. L., Lauritsen T., Wang X., Zhu S.* Decay Modes of <sup>250</sup>No // *Phys. Rev. C.* 2006. V. 74. P. 014316.
9. *Свирихин А. И., Андреев А. В., Ерёмин А. В., Изосимов И. Н., Исаев А. В., Кузнецов А. Н., Кузнецова А. А., Мальшев 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., Мошат П.* Характеристики спонтанного деления изотопа <sup>250</sup>No // *Письма в ЭЧАЯ.* 2017. Т. 14, № 4(209). С. 389.
10. *Schmidt K. H., Sahn C.-C., Pielenz K., Clerc H.-G.* Some Remarks on the Error Analysis in the Case of Poor Statistics // *Z. Phys. A.* 1984. V. 316. P. 19.
11. *Audi G., Kondev F. G., Meng Wang, Huang W. J., Naimi S.* The NUBASE2016 Evaluation of Nuclear Properties // *Chin. Phys. C.* 2017. V. 41, No. 3. P. 030001.

Получено 19 февраля 2021 г.