

## СВОЙСТВА РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА НОВОГО ЯДРА $^{227}\text{Pu}$

А. А. Кузнецова<sup>а, 1</sup>, А. И. Свирихин<sup>а, б</sup>, А. В. Исаев<sup>а, б</sup>, М. А. Бычков<sup>а</sup>,  
В. Д. Данилкин<sup>а, е</sup>, Х. М. Деваража<sup>а</sup>, Н. И. Замятин<sup>а</sup>,  
И. Н. Изосимов<sup>а</sup>, Чж. Лю<sup>з, д</sup>, О. Н. Малышев<sup>а, б</sup>, Р. С. Мухин<sup>а</sup>,  
А. Г. Попеко<sup>а, б</sup>, Ю. А. Попов<sup>а, б</sup>, В. А. Рачков<sup>а, б</sup>, Б. Сайлаубеков<sup>а, е, ж</sup>,  
Е. А. Сокол<sup>а</sup>, М. С. Тезекбаева<sup>а, е</sup>, И. И. Уланова<sup>а, б</sup>, Ф. Ш. Чжан<sup>з, и, к</sup>,  
В. И. Чепигин<sup>а</sup>, М. Л. Челноков<sup>а</sup>, А. В. Еремин<sup>а, б</sup>

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

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

<sup>в</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>г</sup> Институт современной физики Китайской академии наук, Ланьчжоу, Китай

<sup>д</sup> Университет Китайской академии наук, Пекин

<sup>е</sup> Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

<sup>ж</sup> Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана

<sup>з</sup> Колледж ядерных наук и технологий, Пекинский педагогический университет, Пекин

<sup>и</sup> Институт радиационных технологий, Пекинская академия науки и технологий, Пекин

<sup>к</sup> Центр теоретической ядерной физики, Национальная лаборатория ускорителей тяжелых ионов в Ланьчжоу, Ланьчжоу, Китай

В цепочках радиоактивных распадов ядер, полученных в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$  и  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$  на сепараторе GRAND (фабрика СТЭ, ЛЯР ОИЯИ), были зарегистрированы события, относящиеся к распаду неизвестного ранее изотопа  $^{227}\text{Pu}$ . Для ядра  $^{227}\text{Pu}$  измерены энергия  $\alpha$ -частиц ( $E_\alpha = (8156 \pm 26)$  кэВ) и период полураспада ( $T_{1/2} = 2,2_{-0,3}^{+0,5}$  с). Единственное событие с  $E_\alpha = (8754 \pm 24)$  кэВ и оценкой периода полураспада для нижней границы 1 мс, которое, вероятно, можно отнести к распаду  $^{226}\text{Pu}$ , было идентифицировано в цепочке распада, приводящей к известному изотопу  $^{222}\text{U}$ .

A new isotope  $^{227}\text{Pu}$  was discovered by complete fusion reactions  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$  and  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$ . The experiment was carried out at the GRAND separator of the SHE Factory at FLNR, JINR. For the nucleus  $^{227}\text{Pu}$ , an  $\alpha$ -particle energy of  $E_\alpha = (8156 \pm 26)$  keV and a half-life of  $T_{1/2} = 2.2_{-0.3}^{+0.5}$  s were measured. A single event with  $E_\alpha = (8754 \pm 24)$  keV and an estimated lower limit half-life of 1 ms from the measured lifetime, which is probably attributed to the new isotope  $^{226}\text{Pu}$ , was identified by chains with  $^{222}\text{U}$ .

PACS: 23.60.+e; 25.70.-z; 25.60.Pj; 27.90.+b; 29.40.Gx

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

Эту работу мы посвящаем своему коллеге и наставнику — Александру Владимировичу ЕРЕМИНУ, который скоропостижно скончался до выхода данной работы. Его уход — огромная потеря для науки и для людей, которых он объединял вокруг себя. Многие годы он руководил сектором, в котором проводились исследования на сепараторах ВАСИЛИСА и GRAND. В последние годы А. В. Еремин занимал должность заместителя директора ЛЯР, в этом качестве он был незаменимым участником многих новых проектов лаборатории. Выражаем нашу глубочайшую скорбь и горечь утраты.

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение свойств ядер, расположенных вдали от линии  $\beta$ -стабильности, позволяет определить влияние избытка нейтронов или протонов в ядре на свойства радиоактивного распада. В текущей работе, в реакциях полного слияния ионов  $^{26}\text{Mg}$  с ядрами мишеней из  $^{204,206}\text{Pb}$ , в каналах с испарением нескольких нейтронов изучались свойства радиоактивного распада самых легких изотопов плутония, вплоть до  $N = 132$ . Полученные данные сравнивались с теоретическими оценками ( $Q_\alpha$ ) [1] и систематикой периодов полураспада, представленной на рис. 1.

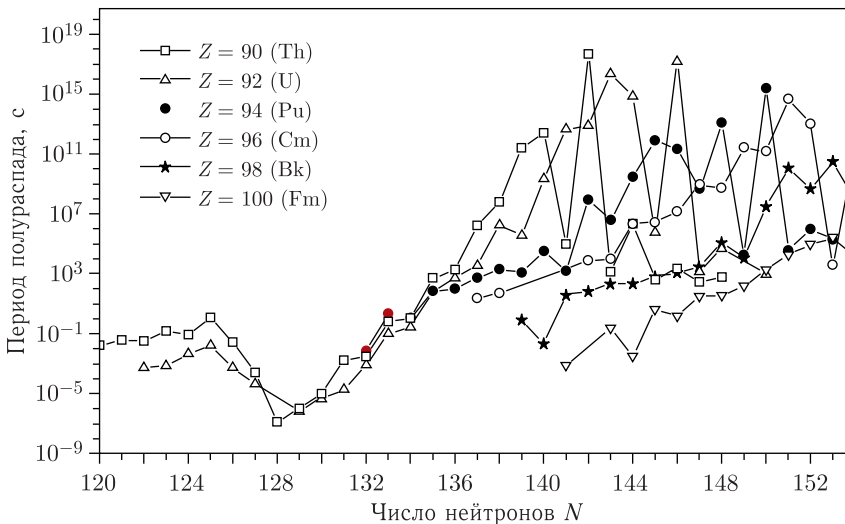


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Систематика периодов полураспада четных актиноидов в зависимости от числа нейтронов  $N$  [1]. Периоды полураспада изотопов плутония, полученные в данной работе, находятся в области  $N = 132-133$  (красные точки)

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследования проводились в ЛЯР ОИЯИ в 2023 г. на пучках тяжелых ионов с использованием сепаратора продуктов реакций полного слияния GRAND [2, 3]. Газонаполненный сепаратор GRAND установлен в экспериментальном зале нового ускорителя ДЦ-280 [4], который является базовой установкой комплекса фабрики сверхтяжелых элементов ЛЯР ОИЯИ и позволяет получать пучки многозарядных ионов  $^{48}\text{Ca}$  с рекордной интенсивностью, достигающей 10 мкА частиц.

Для регистрации ядер отдачи (evaporation residue — ER) и продуктов их распада использовалась детектирующая система GABRIELA [5], разработанная для прецизионной  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -корреляционной спектроскопии короткоживущих ядер, получаемых в реакциях с тяжелыми ионами. В этой комбинированной детектирующей системе ядра отдачи и продукты их распада регистрируются в фокальном кремниевом детекторе с двухсторонним расположением стрипов (DSSD) размером  $100 \times 100$  мм ( $128 \times 128$  стрипов) и боковыми детекторами DSSD (8 детекторов размером  $50 \times 60$  мм,  $16 \times 16$  стрипов каждый), образующими вместе с фокальным позиционно-чувствительным DSSD сборку в форме «колодца». Эти детекторы позволяют регистрировать  $\alpha$ -,  $\beta$ -частицы и осколки спонтанного деления. Для регистрации  $\gamma$ -квантов вокруг «колодца» кремниевых детекторов размещается сборка из пяти HPGe-детекторов «клеверного» типа. Спектрометрические данные о  $\gamma$ -переходах, полученные с использованием HPGe-детекторов «клеверного» типа в этом эксперименте, будут опубликованы отдельно. В данной работе не использовалась времяпролетная система (ToF), которая служит «отметчиком» ядер отдачи. Это создало определенные трудности при анализе данных. Кинетическая энергия ER, принимающая значения в диапазоне от 3 до 10 МэВ, пересекается с областью энергий  $\alpha$ -частиц исследуемых ядер. Поэтому мы проводили анализ данных по длинным цепочкам распадов.

Для калибровки кремниевых детекторов и проверки работы спектрометрической электроники использовался радиоактивный распад короткоживущих ядер  $^{201,202m1}\text{At}$ , получаемых в реакции слияния  $^{26}\text{Mg} + ^{181}\text{Ta}$ . В данной работе энергетическое разрешение фокального детектора, измеренное по  $\alpha$ -линии  $^{202m1}\text{At}$  (6132 кэВ), составило 24 кэВ.

В экспериментах применялись мишени из сульфида свинца  $^{204}\text{PbS}$  толщиной  $807 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$  и  $^{206}\text{PbS}$  —  $555 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$ . Изотопный состав мишени для  $^{204}\text{Pb}$ :  $^{204}\text{Pb}$  (99,940 %),  $^{206}\text{Pb}$  (0,040 %),  $^{207}\text{Pb}$  (0,010 %),  $^{208}\text{Pb}$  (0,010 %); для  $^{206}\text{Pb}$ :  $^{206}\text{Pb}$  (99,979 %),  $^{204}\text{Pb}$  (0,006 %),  $^{207}\text{Pb}$  (0,010 %),  $^{208}\text{Pb}$  (0,005 %).

Интенсивность пучка ионов на мишени не превышала 2 мкА частиц. В ходе эксперимента энергия пучка ионов варьировалась от 132 до 150 МэВ для перехода по испарительным каналам реакций полного слияния.

Эффективность транспорта (трансмиссия) ядер отдачи установки GRAND для реакций  $^{26}\text{Mg} + ^{204,206}\text{Pb}$  составила 6 %. Расчеты трансмиссии проводились с использованием методики, описанной в работах [6, 7].

## ИЗОТОП $^{227}\text{Pu}$

Для четно-нечетного ядра  $^{227}\text{Pu}$  ( $N = 133$ ) теоретическая оценка энергии  $\alpha$ -распада составляет  $Q_\alpha = 8300$  кэВ [1], что соответствует энергии  $\alpha$ -частицы  $E_\alpha = 8153$  кэВ. Из систематики, представленной на рис. 1, можно ожидать, что период

полураспада ядра  $^{227}\text{Pu}$  находится в секундной области. На основе этих оценок и информации о распаде известных ядер  $^{223}\text{U}$  и  $^{219}\text{Th}$  [8] выбирались следующие условия поиска коррелированных событий, относящихся к распаду  $^{227}\text{Pu}$  и его дочерних продуктов:  $8,1 < \alpha_1 < 8,3$  МэВ,  $8,7 < \alpha_2 < 9,1$  МэВ,  $10 < \text{pile-up}(\alpha_2 + \alpha_3) < 19$  МэВ,  $8,6 < \alpha_4 < 8,8$  МэВ с окнами по времени  $\Delta T(\text{ER}-\alpha_1) < 20$  с,  $\Delta T(\alpha_1 - \alpha_2/(\alpha_2 + \alpha_3)) < 600$  мкс,  $\Delta T(\alpha_3 - \alpha_4) < 10$  мс. Поиск генетически связанных цепочек распадов осуществлялся с учетом координат ядра отдачи, вбитого в фокальный позиционно-чувствительный детектор DSSD.

В ходе анализа продуктов распада, полученных в реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$  (рис. 2), протекающей с испарением пяти нейтронов, были зарегистрированы 60  $\alpha$ -распадов, которые можно отнести к распаду ранее неизвестного ядра плутония с массовым номером 227. Статистика событий, идентифицированных в различных корреляционных цепочках, представлена в таблице.

Спектр  $\alpha$ -частиц на рис. 3, а демонстрирует хорошо выделенную линию  $\alpha$ -распада ядра  $^{227}\text{Pu}$  с энергией  $E_\alpha = (8156 \pm 26)$  кэВ (оценка  $Q_\alpha = 8302$  кэВ). Период полураспада  $^{227}\text{Pu}$  составил  $T_{1/2} = 3,5^{+0,5}_{-0,4}$  с, что находится в хорошем соответствии с систематикой, представленной на рис. 1. Распределения по временам жизни для искомым ядер  $^{227}\text{Pu}$  и коррелированных дочерних продуктов показаны на рис. 3, в-е. Для изотопа  $^{223}\text{U}$  зафиксированы две выраженные  $\alpha$ -линии  $E_\alpha = (8790 \pm 27)$ ,  $(8952 \pm 38)$  кэВ и определен период полураспада  $T_{1/2} = 26,6^{+4,0}_{-3,0}$  мкс. Измеренный период полураспада  $^{223}\text{U}$  хорошо соответствует значению, полученному ранее  $(18^{+10,0}_{-5,0}$  мкс) [9]. За-

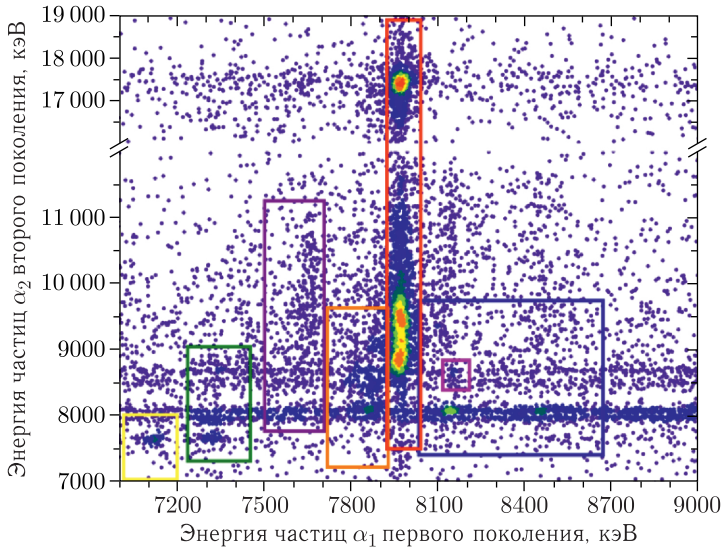


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Двумерный энергетический спектр  $\alpha_1$ -частиц первого поколения, коррелирующих с  $\alpha_2$ -частицами второго поколения, которые были получены в реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$  при  $\Delta T(\alpha_1 - \alpha_2) < 10$  мс, в цепочках распада ER- $\alpha_1$ - $\alpha_2$ . Корреляции  $^{227}\text{Pu} \rightarrow ^{223}\text{U}$  и  $^{227}\text{Pu} \rightarrow ^{215}\text{Ra}$  выделены розовой рамкой,  $^{225}\text{U} \rightarrow ^{221}\text{Th}$  — оранжевой,  $^{221}\text{Th} \rightarrow ^{217}\text{Ra}$  и  $^{221}\text{Th} \rightarrow ^{213}\text{Rn}$  — синей,  $^{222}\text{Th} \rightarrow \text{pile-up}$  — красной,  $^{223}\text{Th} \rightarrow ^{219}\text{Ra}$  и  $^{223}\text{Th} \rightarrow ^{215}\text{Rn}$  — зеленой,  $^{219}\text{Ra} \rightarrow ^{215}\text{Rn}$  — фиолетовой и  $^{218}\text{Rn} \rightarrow ^{214}\text{Po}$  — желтой

**Результаты поиска генетически связанных цепочек распада ядра  $^{227}\text{Pu}$ , синтезируемого в реакциях  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb} \rightarrow ^{227}\text{Pu} + 5n$  и  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb} \rightarrow ^{227}\text{Pu} + 3n$**

Цепочка распада	$^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb} \rightarrow ^{227}\text{Pu} + 5n$	$^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb} \rightarrow ^{227}\text{Pu} + 3n$
(I) ER $\rightarrow ^{227}\text{Pu} (\alpha_1) \rightarrow ^{223}\text{U} (\alpha_2) \rightarrow ^{215}\text{Ra} (\alpha_4)$	7	—
(II) ER $\rightarrow ^{227}\text{Pu} (\alpha_1) \rightarrow ^{223}\text{U} (\alpha_2)$	18	8
(III) ER $\rightarrow ^{227}\text{Pu} (\alpha_1) \rightarrow (^{223}\text{U} (\alpha_2) + ^{219}\text{Th} (\alpha_3))^*$	15	13
(IV) ER $\rightarrow ^{227}\text{Pu} (\alpha_1) \rightarrow ^{215}\text{Ra} (\alpha_4)$	10	8
(V) ER $\rightarrow ^{227}\text{Pu} (\alpha_1) \rightarrow ^{219}\text{Th} (\alpha_3)$	—	3
(VI) ER $\rightarrow ^{227}\text{Pu} (\alpha_1) \rightarrow (^{223}\text{U} (\alpha_2) + ^{219}\text{Th} (\alpha_3))^* \rightarrow ^{215}\text{Ra} (\alpha_4)$	10	—
(VII) ER** $\rightarrow ^{227}\text{Np} (\alpha_1) \rightarrow ^{223}\text{Pa} (\alpha_2)$	8	4
<b>Всего</b>	<b>68 событий</b>	<b>36 событий</b>
(VIII) $^{229}\text{Pu}(\text{ER}) \rightarrow ^{221}\text{Th} (\alpha_3) \rightarrow ^{217}\text{Ra} (\alpha_4)$	16 (8***)	—

\* Фиксировались pile-up, т. е. результат сложения сигналов от  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ .  $T_{1/2} \text{ } ^{223}\text{U} (\alpha_2) = 26,6_{-3,0}^{+4,0}$  мкс и  $T_{1/2} \text{ } ^{219}\text{Th} (\alpha_3) = 1,05(3)$  мкс [8].

\*\* Цепочки, отнесенные к распаду  $^{227}\text{Pu}$  через электронный захват.

\*\*\* Ожидаемое число цепочек, оцененное через сечение реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$  с испарением трех нейтронов, и вероятность зарегистрировать  $^{229}\text{Pu}$  в окне по времени менее 20 с.

мечено, что распределение времени  $^{223}\text{U}$  имеет два пика (см. рис. 3, д). Второй пик  $\tau = 182,5$  мкс свидетельствует о появлении случайных событий в корреляциях. На рис. 3, б, где показан  $\alpha$ -спектр  $^{223}\text{U}$ , красным цветом выделены события из реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$ , по которым становится ясно, что пик с энергией 8790 кэВ более интенсивный, чем 8952 кэВ, и это подтверждают данные, полученные в работе [8].

В реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{204,206}\text{Pb}$  был зафиксирован  $\alpha$ -распад ядер  $^{227}\text{Np}$  ( $E_\alpha = (7626 \pm 24)$  и  $(7687 \pm 21)$  кэВ), который можно объяснить либо распадом  $^{227}\text{Pu}$  по пути электронного захвата (ЕС), либо образованием ядер  $^{227}\text{Np}$  в  $p\alpha n$ -каналах реакций. Полученные значения энергий  $\alpha$ -частиц  $^{227}\text{Np}$  и  $^{223}\text{Pa}$  согласуются с опубликованными данными [10, 11]. На рис. 4 показано общее для двух описываемых реакций распределение времени жизни, построенное для корреляций типа ER  $\rightarrow \alpha_1 \rightarrow \alpha_2$ . Наиболее интенсивный пик  $\tau = 3,6$  с, очевидно, относится к электронному захвату  $^{227}\text{Pu}$  (суммарно зарегистрированы 12 событий, см. таблицу, цепочка VII), а второй пик  $\tau = 133$  мс (5 событий), по всей видимости, относится к распаду ядра  $^{227}\text{Np}$ , образованного в  $p4n$ -канале для реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$  и в  $p2n$ -канале для реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$ .

Полученный период полураспада для электронного захвата  $^{227}\text{Pu}$  составил  $T_{1/2} = 2,5_{-0,5}^{+0,8}$  с (см. рис. 4), что несколько меньше указанного ранее значения для  $\alpha$ -распада  $^{227}\text{Pu}$  ( $T_{1/2} = 3,5_{-0,4}^{+0,5}$  с). Это наводит на мысль, что изотоп  $^{227}\text{Pu}$  живет меньше, это подтверждается данными, полученными в реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$  (см. ниже).

В реакции полного слияния  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb} \rightarrow ^{230}\text{Pu}^*$  с испарением трех нейтронов были зарегистрированы 32 события, относящихся к распаду  $^{227}\text{Pu}$ . Измеренная

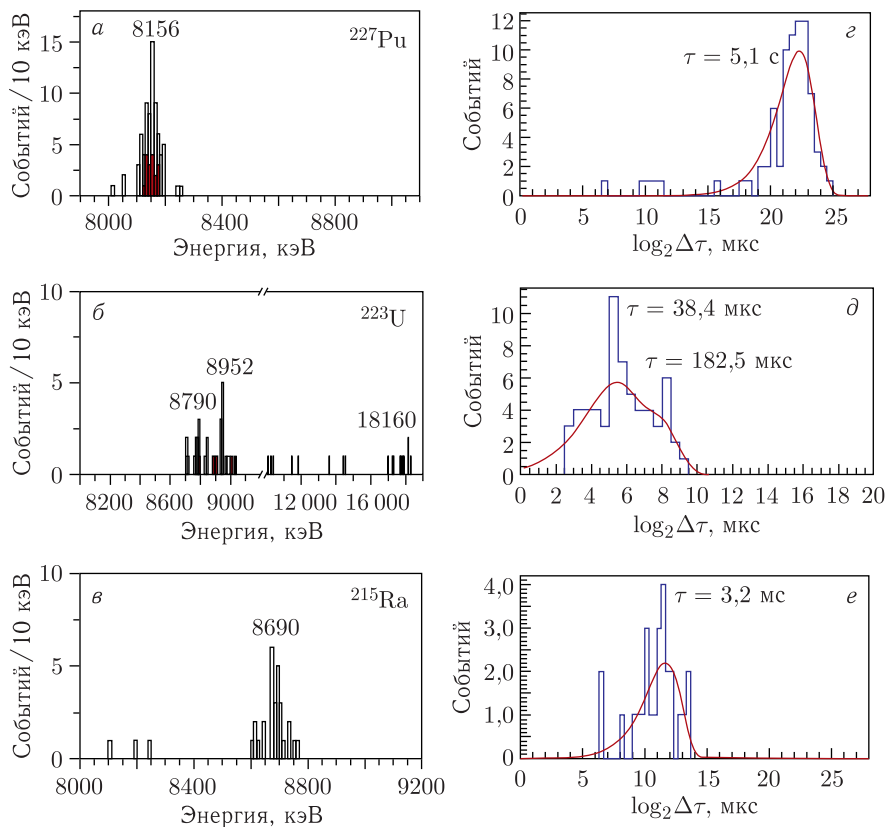


Рис. 3 (цветной в электронной версии). а) Альфа-спектр  $^{227}\text{Pu}$ , полученный в реакциях  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$  и  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$ , красный — получен в корреляции ER- $\alpha_1$ - $\alpha_4$ ; б)  $\alpha$ -спектр  $^{223}\text{U}$ , красным отмечены события из реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$ ; в)  $\alpha$ -спектр  $^{215}\text{Ra}$ ; г) распределение времени жизни  $\Delta\tau$  (ER- $\alpha_1$ ); д)  $\Delta\tau$  ( $\alpha_1$ - $\alpha_2$ ); е)  $\Delta\tau$  ( $\alpha_2$ - $\alpha_4$ )

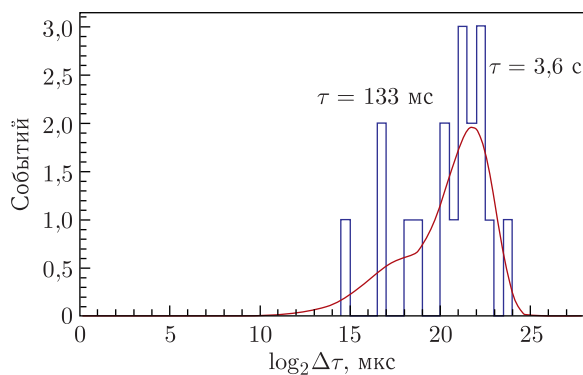


Рис. 4. Распределение времени жизни  $\Delta\tau$  ( $^{227}\text{Pu} + ^{227}\text{Np}$ ) и  $\Delta\tau$  ( $^{227}\text{Np}$ ), полученное в реакциях  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$  и  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$

энергия  $\alpha$ -частиц  $^{227}\text{Pu}$   $E_\alpha = (8157 \pm 25)$  кэВ совпадает с той, что была получена в реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$ . Период полураспада для ядра  $^{227}\text{Pu}$ , идентифицированного в этом облучении, составил величину  $2,2_{-0,3}^{+0,5}$  с.

Чтобы прояснить разницу времен жизни  $^{227}\text{Pu}$  в обсуждаемых реакциях ( $3,5_{-0,4}^{+0,5}$  с и  $2,2_{-0,3}^{+0,5}$  с), отметим, что в реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$  с испарением трех нейтронов образуются ядра  $^{229}\text{Pu}$ . Согласно опубликованным данным изотоп  $^{229}\text{Pu}$  имеет  $E_\alpha = (7457 \pm 20)$  кэВ и  $T_{1/2} = 67_{-19}^{+41}$  с [11–14]. Это ядро испускает  $\alpha$ -частицу и превращается в  $^{225}\text{U}$  ( $E_\alpha = (7846 \pm 24)$  кэВ и др.,  $64,2_{-13,5}^{+23,4}$  мс), который распадается в  $^{221}\text{Th}$  ( $E_\alpha = (8140 \pm 59)$  кэВ и др.,  $1,8_{-0,07}^{+0,08}$  мс), и т. д. Таким образом, цепочка распада  $^{229}\text{Pu}(\text{ER}) \xrightarrow{<20 \text{ с}} ^{221}\text{Th}(\alpha_3) \xrightarrow{<600 \text{ мкс}} ^{217}\text{Ra}(\alpha_4)^1$ , в которой не фиксируется распад  $^{225}\text{U}$ , может быть идентифицирована как цепочка  $^{227}\text{Pu}(\text{ER}) \xrightarrow{<20 \text{ с}} ^{227}\text{Pu}(\alpha_1) \xrightarrow{<600 \text{ мкс}} ^{223}\text{U}(\alpha_2)$ . Всего было зарегистрировано 16 цепочек, которые можно отнести к распадам  $^{229}\text{Pu}$  (см. таблицу). Принимая во внимание существенно большее время жизни  $^{229}\text{Pu}$ , нужно отметить, что такое «наложение» приводит к искажению измерения времени жизни  $^{227}\text{Pu}$ , регистрируемого в цепочках II и III. Если исключить такие «наложения» из рассмотрения, то период полураспада в реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$  станет  $T_{1/2} = 2,4_{-0,6}^{+1,3}$  с. В реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$ , где канал с испарением одного нейтрона сильно подавлен, не обнаружено образование изотопа  $^{229}\text{Pu}$ , поэтому время жизни  $^{227}\text{Pu}$  определяется без искажений ( $2,2_{-0,3}^{+0,5}$  с). На рис. 5, а представлены длинные корреляции, где хорошо различаются изотоп  $^{227}\text{Pu}(\alpha_1)$  и продукт его последующего  $\alpha$ -распада  $^{215}\text{Ra}(\alpha_4)$ .

В реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$  также были найдены четыре цепочки распада  $\text{ER} \rightarrow ^{227}\text{Np}(\alpha_1) \rightarrow ^{223}\text{Pa}(\alpha_2)$ , относящиеся к распаду  $^{227}\text{Pu}$  по пути электронного захвата (см. таблицу, цепочка VII).

На основе полученной статистики по корреляциям  $\text{ER} \rightarrow ^{227}\text{Pu}(\alpha_1) \rightarrow (^{223}\text{U}(\alpha_2) + ^{219}\text{Th}(\alpha_3))^* \rightarrow ^{215}\text{Ra}(\alpha_4)$  (10 событий) и  $\text{ER} \rightarrow ^{227}\text{Np}(\alpha_1) \rightarrow ^{223}\text{Pa}(\alpha_2)$  (12 событий) вероятность электронного захвата для  $^{227}\text{Pu}$  составляет  $b_{\text{EC}} = 0,23 \pm 0,10$ .

### ИЗОТОП $^{226}\text{Pu}$

При попытке получения нового ядра  $^{226}\text{Pu}$  использовалась реакция полного слияния  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb} \rightarrow ^{226}\text{Pu} + 4n$ . Из теоретических оценок [15] энергия  $\alpha$ -распада для этого ядра составляет  $Q_\alpha = 8955$  кэВ, энергия  $\alpha$ -частиц  $E_\alpha = 8795$  кэВ соответственно. Систематика (см. рис. 1) указывает на то, что период полураспада искомого ядра располагается в миллисекундной области. С учетом этих приближений для изотопа  $^{226}\text{Pu}$  и табличных данных распада его дочерних продуктов [16] были подобраны следующие условия поиска корреляций:  $\alpha_1$  и  $\alpha_2 < 10$  МэВ,  $10 < \alpha_2 + \alpha_3 < 20$  МэВ,  $\Delta T(\text{ER}-\alpha_1) < 50$  мс,  $\Delta T(\alpha_1-\alpha_2)$  и  $\Delta T(\alpha_1-(\alpha_2 + \alpha_3)) < 20$  мкс.

Было зарегистрировано одно коррелированное событие, которое можно отнести к цепочке  $\alpha$ -распада вида  $\text{ER} \rightarrow ^{226}\text{Pu}(\alpha_1) \rightarrow (^{222}\text{U}(\alpha_2) + ^{218}\text{Th}(\alpha_3))$ . Энергия  $\alpha_1$  со-

<sup>1</sup>Период полураспада  $^{217}\text{Ra}$  составляет 1,6 мкс [14].

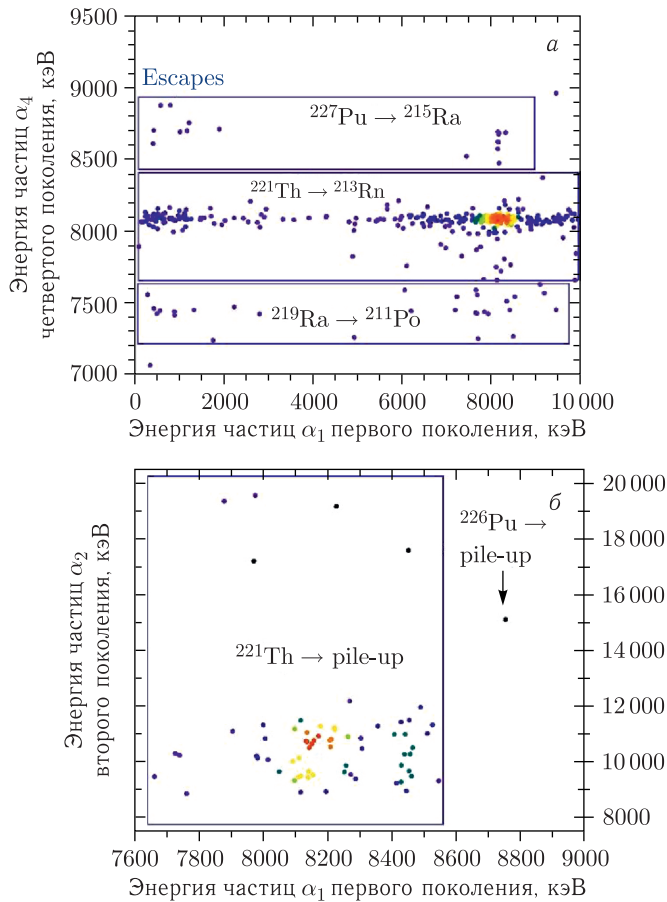


Рис. 5. а) Двумерный энергетический спектр  $\alpha_1$ -частиц первого поколения, коррелирующих с  $\alpha_4$ -частицами четвертого поколения, которые были получены в реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$  при следующих условиях:  $8,7 < \alpha_2 < 19$  МэВ,  $\Delta\tau(\alpha_1 - \alpha_2) < 300$  мкс,  $\Delta\tau(\alpha_2 - \alpha_4) < 50$  мс; б) аналогичное распределение для продуктов реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$ , наличие  $^{221}\text{Th}$  объясняется в тексте

ставила  $E_\alpha = (8754 \pm 24)$  кэВ, а время корреляции 7,5 мс; оценивая ошибку периода полураспада изотопа  $^{226}\text{Pu}$  методом максимального правдоподобия, получили нижний предел — 1 мс с вероятностью 95%. в этой же позиции DSSD через 5 мкс было зарегистрировано событие с аномально большой энергией — 15 079 кэВ (см. рис. 5, б), что очень похоже на наложение амплитуды (partial pile-up) сигналов от распада короткоживущих ядер  $^{222}\text{U}$  ( $\alpha_2$ ) с  $T_{1/2} = (4,7 \pm 7)$  мкс и  $^{218}\text{Th}$  ( $\alpha_3$ ) с  $T_{1/2} = (117 \pm 9)$  нс [16].

Ядра  $^{221}\text{Th}$ , представленные на рис. 3, б, вероятно, образуются в реакции многонуклонных передач или в канале  $2\alpha xn$ . Они хорошо различаются по короткому периоду полураспада  $T_{1/2}(^{221}\text{Th}) = 1,8_{-0,07}^{+0,08}$  мс; наличие большого числа partial pile-up в цепочке  $\text{ER} \rightarrow ^{221}\text{Th}(\alpha_1) \rightarrow ^{217}\text{Ra}(\alpha_2) \rightarrow ^{213}\text{Rn}(\alpha_3)$  связано с коротким временем жизни  $^{217}\text{Ra}$  [14]. То же самое можно сказать о появлении изотопов  $^{218}\text{Rn}$  в реак-



ции  $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$ , показанных на рис. 2 (в желтой рамке) или  $^{222-223}\text{Th}$  (красная и зеленая рамки),  $^{219}\text{Ra}$  (фиолетовая). Подробнее об этом и об измеренных сечениях для  $xn$ -,  $\alpha xn$ -,  $2\alpha xn$ - и  $pxn$ -каналов в реакциях  $^{26}\text{Mg} + ^{204,206}\text{Pb}$  будет сказано в отдельной статье.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе описаны данные радиоактивного распада ядра  $^{227}\text{Pu}$  и его дочерних продуктов. Новый изотоп  $^{227}\text{Pu}$  с  $E_\alpha = (8156 \pm 26)$  кэВ имеет период полураспада  $2,2_{-0,3}^{+0,5}$  с и вероятность электронного захвата  $b_{\text{EC}} = 0,23 \pm 0,1$ . В реакции  $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$  зафиксировано коррелированное событие, которое, вероятно, можно отнести к  $\alpha$ -распаду нового изотопа  $^{226}\text{Pu}$  ( $E_\alpha = (8754 \pm 24)$  кэВ) с оценкой нижнего предела периода полураспада 1 мс. Впервые полученные в нашей работе значения периодов полураспада ядер Pu хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями и существующими систематиками. Для изотопа  $^{227}\text{Pu}$  можно проследить характерное для четно-нечетных ядер увеличение выживаемости по отношению к  $\alpha$ -распаду.

**Благодарности.** Выражаем благодарность всем ученым, работающим в проекте GABRIELA. Особая благодарность доктору А. Лопес-Мартенс из Центра ядерных наук и материаловедения (Орсе, Франция) за полезные дискуссии.

**Финансирование.** Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ОИЯИ и гранта ОМУС № 24-501-03 (присужденного А. А. Кузнецовой).

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>
2. *Kuznetsova A. A.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2023. V. 87, No. 8. P. 1105–1111.
3. *Еремин А. В., Попеко А. Г., Свирихин А. И. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, №3(254). С. 647–659.
4. *Gulbekian G. G., Dmitriev S. N., Itkis M. G.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16, No. 6. P. 866.
5. *Lopez-Martens A. et al. (GABRIELA Collab.)* // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58, No. 7. P. 134.
6. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Popeko A. G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2022. V. 1033. P. 16640.
7. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Popeko A. G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2023. V. 1048. P. 167978.
8. *Sun M. D., Liu Z., Huang T. H. et al.* // Phys. Rev. B. 2020. V. 800. P. 135096.
9. *Andreyev A. N., Bogdanov D. D., Chepigin V. I. et al.* // Z. Phys. A. 1991. V. 338. P. 363.
10. *Ninov V., Heßberger F. P., Armbruster P. et al.* // Z. Phys. A. At. Nucl. 1990. V. 336. P. 473–474.
11. *Yeremin A. V., Andreyev A. N., Bogdanov D. D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 350, No. 3. P. 608–617.
12. *Andreev A. N., Bogdanov D. D., Chepigin V. I. et al.* // Z. Phys. A. 1994. V. 347. P. 225.

13. *Khuyagbaatar J., Heßberger F.P., Hofmann S. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 46. P. 59.
14. *Mistry A. K., Khuyagbaatar J., Heßberger F.P. et al.* // Nucl. Phys. A. 2019. V. 987. P. 337–349.
15. *Yang H., Zhao Z., Li X. et al.* // Nucl. Phys. A. 2021. V. 1008. 122137.
16. *Khuyagbaatar J., Yakushev A., Dullmann Ch.E. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. 24250.

Получено 17 октября 2024 г.