

P7-2024-50

А. А. Кузнецова* и др.

СВОЙСТВА РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА
НОВОГО ЯДРА ^{227}Pu

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

* E-mail: aakuznetsova@jinr.ru

А. А. Кузнецова¹, А. И. Свирихин^{1,2}, А. В. Исаев^{1,2}, М. А. Бычков¹,
В. Д. Данилкин^{1,3}, Х. М. Деваража¹, Н. И. Замятин¹, И. Н. Изосимов¹,
Чж. Лю^{4,5}, О. Н. Малышев^{1,2}, Р. С. Мухин¹, А. Г. Попеко^{1,2}, Ю. А. Попов^{1,2},
В. А. Рачков^{1,2}, Б. Сайлаубеков^{1,6,7}, Е. А. Сокол¹, М. С. Тезекбаева^{1,6},
И. И. Уланова^{1,2}, Ф. Ш. Чжан^{8,9,10}, В. И. Чепигин¹, М. Л. Челноков¹,
А. В. Еремин^{1,2}

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

⁴ Институт современной физики Китайской академии наук, Ланьчжоу, Китай

⁵ Университет Китайской академии наук, Пекин

⁶ Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

⁷ Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан

⁸ Ключевая лаборатория пучковых технологий Министерства образования КНР, Колледж ядерных наук и технологий, Пекинский педагогический университет, Пекин

⁹ Институт радиационных технологий, Пекинская академия науки и технологий, Пекин

¹⁰ Центр теоретической ядерной физики, Национальная лаборатория ускорителей тяжелых ионов в Ланьчжоу, Ланьчжоу, Китай

Свойства радиоактивного распада нового ядра ^{227}Pu

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}Pu . Для ядра ^{227}Pu измерены энергия α -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}Pu , было идентифицировано в цепочке распада, приводящей к известному изотопу ^{222}U .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Properties of Radioactive Decay of the New Nucleus ^{227}Pu

A new isotope ^{227}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}Pu , an α -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}Pu , was identified by chains with ^{222}U .

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Эту работу мы посвящаем своему коллеге и наставнику — Александру Владимировичу ЕРЕМИНУ, который скоротечно 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 β -стабильности, позволяет определить влияние избытка нейтронов или протонов в ядре на свойства радиоактивного распада. В текущей работе, в реакциях полного слияния ионов ^{26}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_α) [1] и систематикой периодов полураспада, представленной на рис. 1.

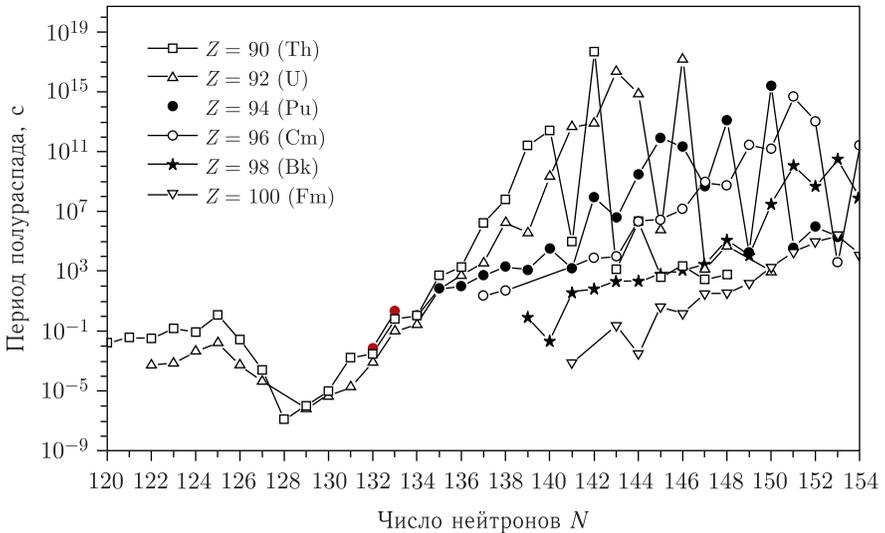


Рис. 1. Систематика периодов полураспада четных актиноидов в зависимости от числа нейтронов N [1]. Периоды полураспада изотопов плутония, полученные в данной работе, находятся в области $N = 132-133$ (красные точки)

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}Ca с рекордной интенсивностью, достигающей $10 \text{ мкА} \cdot \text{частиц}$.

Для регистрации ядер отдачи (evaporation residue — ER) и продуктов их распада использовалась детектирующая система GABRIELA [5], разработанная для прецизионной α -, β -, γ -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 $100 \times 100 \text{ мм}$ (128×128 стрипов) и боковыми детекторами DSSD (8 детекторов размером $50 \times 50 \text{ мм}$, 16×16 стрипов каждый), образующими вместе с фокальным позиционно-чувствительным DSSD сборку в форме «колодца». Эти детекторы позволяют регистрировать α -, β -частицы и осколки спонтанного деления. Для регистрации γ -квантов вокруг «колодца» кремниевых детекторов размещается сборка из пяти HPGe-детекторов «клеверного» типа. Спектрометрические данные о γ -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 α -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 α -линии $^{202m1}\text{At}$ (6132 кэВ), составило 24 кэВ.

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

Интенсивность пучка ионов на мишени не превышала $2 \text{ мкА} \cdot \text{частиц}$. 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}Pu

Для четно-нечетного ядра ^{227}Pu ($N = 133$) теоретическая оценка энергии α -распада составляет $Q_\alpha = 8300$ кэВ [1], что соответствует энергии α -частицы $E_\alpha = 8153$ кэВ. Из систематики, представленной на рис. 1, можно ожидать, что период полураспада ядра ^{227}Pu находится в секундной области. На основе этих оценок и информации о распаде известных ядер ^{223}U и ^{219}Th [8] выбирались следующие условия поиска коррелированных событий, относящихся к распаду ^{227}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.

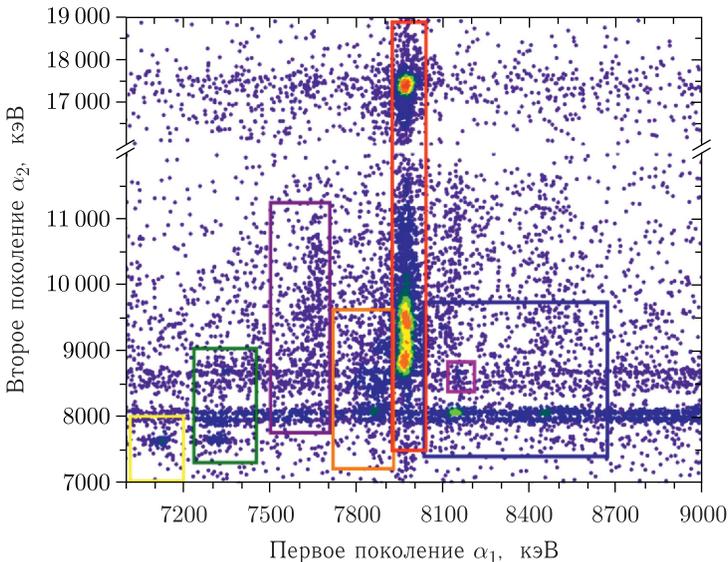


Рис. 2. Двумерный энергетический спектр α_1 -частиц первого поколения, коррелирующих с α_2 -частицами второго поколения, которые были получены в реакции $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$ при $\Delta\tau(\alpha_1-\alpha_2) < 10$ мс, в цепочках распада ER- α_1 - α_2 . Корреляции $^{227}\text{Pu} \rightarrow ^{223}\text{U}$ 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

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

Результаты поиска генетически связанных цепочек распада ядра ^{227}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
Всего	68 событий	36 событий
(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 α_2 и α_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}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}Pu в окне по времени менее 20 с.

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

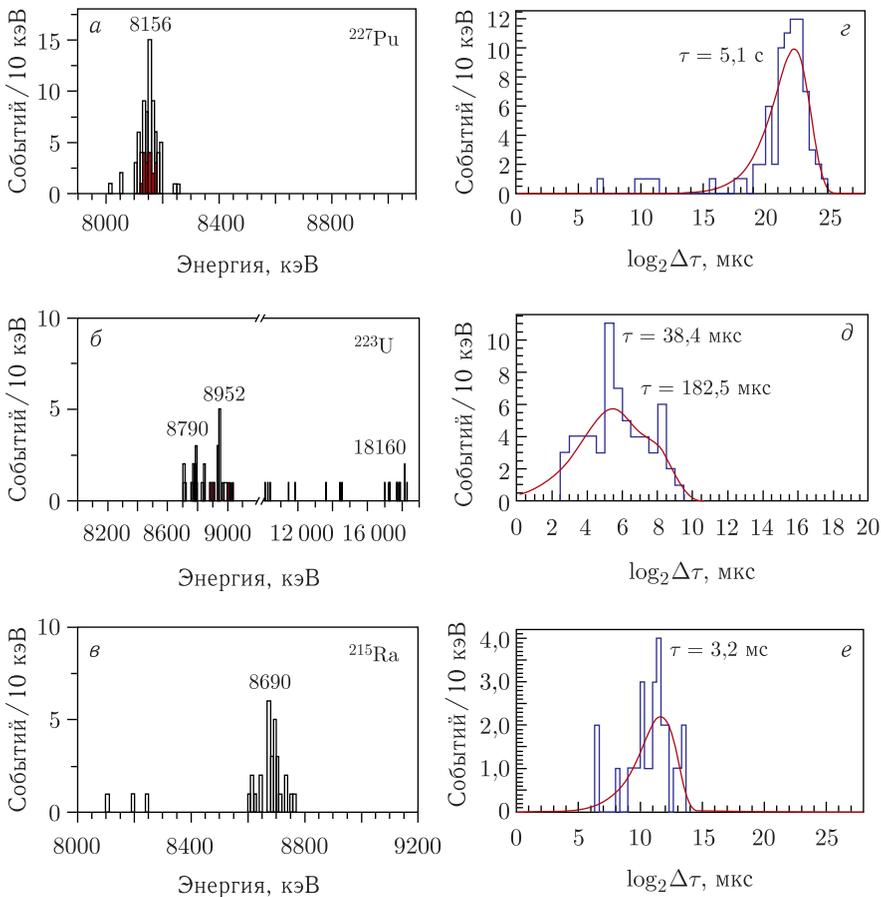


Рис. 3. а) Альфа-спектр ^{227}Pu , полученный в реакциях $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$ и $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$, красный — получен в корреляции $\text{ER-}\alpha_1\text{-}\alpha_4$; б) α -спектр ^{223}U , красным отмечены события из реакции $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$; в) α -спектр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

$^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$, 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 α -распад ядер ^{227}Pu ($E_\alpha = (7626 \pm 24)$ и (7687 ± 21) кэВ), который можно объяснить либо распадом ^{227}Pu по пути электронного захвата (ЕС), либо образованием ядер ^{227}Pu в pxn -каналах реакций. Полученные значения энергий α -частиц ^{227}Pu и ^{223}Ra согласуются с опубликованными данными [10, 11]. На рис. 4 показано общее для двух описываемых реакций распределение времени

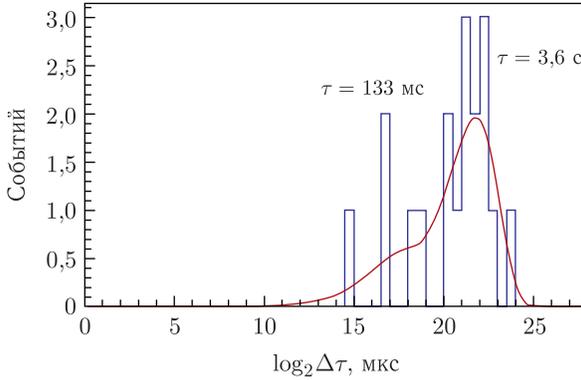


Рис. 4. Распределение времени жизни $\Delta\tau$ ($^{227}\text{Pu} + ^{227}\text{Np}$) и $\Delta\tau$ (^{227}Np), полученное в реакциях $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$ и $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$

жизни, построенное для корреляций типа $\text{ER} \rightarrow \alpha_1 \rightarrow \alpha_2$. Наиболее интенсивный пик $\tau = 3,6$ с, очевидно, относится к электронному захвату ^{227}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}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}Pu составил $T_{1/2} = 2,5_{-0,5}^{+0,8}$ с (см. рис. 4), что несколько меньше указанного ранее значения для α -распада ^{227}Pu ($T_{1/2} = 3,5_{-0,4}^{+0,5}$ с). Это наводит на мысль, что изотоп ^{227}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}Pu . Измеренная энергия α -частиц ^{227}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}Pu , идентифицированного в этом облучении, составил величину $2,2_{-0,3}^{+0,5}$ с.

Чтобы прояснить разницу времен жизни ^{227}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}Pu . Согласно опубликованным данным изотоп ^{229}Pu имеет $E_\alpha = (7457 \pm 20)$ кэВ и $T_{1/2} = 67_{-19}^{+41}$ с [11–14]. Это ядро испускает α -частицу и превращается в ^{225}U ($E_\alpha = (7846 \pm 24)$ кэВ и др., $64,2_{-13,5}^{+23,4}$ мс), который распадается в ^{221}Th ($E_\alpha = (8140 \pm 59)$ кэВ и др., $1,8_{-0,07}^{+0,08}$ мс), и т. д. Таким образом, цепочка распада ^{229}Pu (ER) $\xrightarrow{<20 \text{ с}}$ ^{221}Th (α_3) $\xrightarrow{<600 \text{ мкс}}$ ^{217}Ra (α_4)¹, в которой

¹ Период полураспада ^{217}Ra составляет 1,6 мкс [14].

не фиксируется распад ^{225}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}Pu (см. таблицу). Принимая во внимание существенно большее время жизни ^{229}Pu , нужно отметить, что такое «наложение» приводит к искажению измерения времени жизни ^{227}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}Pu , поэтому время жизни ^{227}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 α -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}Pu по пути электронного захвата (см. таблицу, цепочка VII).

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

ИЗОТОП ^{226}Pu

При попытке получения нового ядра ^{226}Pu использовалась реакция полного слияния $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb} \rightarrow ^{226}\text{Pu} + 4n$. Из теоретических оценок [15] энергия α -распада для этого ядра составляет $Q_\alpha = 8955$ кэВ, энергия α -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}Pu и табличных данных распада его дочерних продуктов [16] были подобраны следующие условия поиска корреляций: α_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 α -распада вида $\text{ER} \rightarrow ^{226}\text{Pu}(\alpha_1) \rightarrow (^{222}\text{U}(\alpha_2) + ^{218}\text{Th}(\alpha_3))$. Энергия α_1 составила $E_\alpha = (8754 \pm 24)$ кэВ, а время корреляции 7,5 мс; оценивая ошибку периода полураспада изотопа ^{226}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}Th , представленные на рис. 3, б, вероятно, образуются в реакции многонуклонных передач или в канале $2\alpha xn$. Они хорошо различа-

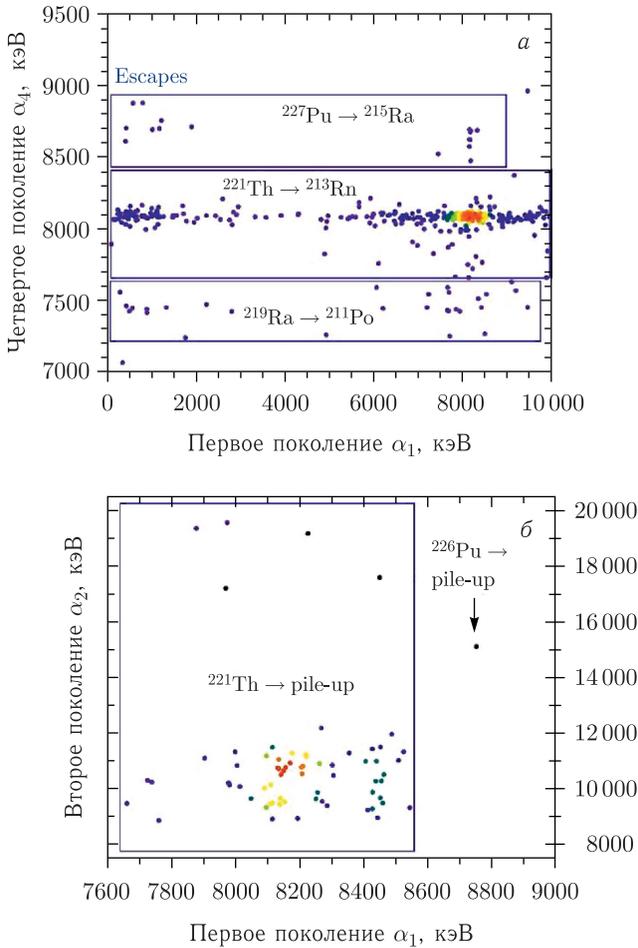


Рис. 5. а) Двумерный энергетический спектр α_1 -частиц первого поколения, коррелирующих с α_4 -частицами четвертого поколения, которые были получены в реакции $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$ при следующих условиях: $8,7 < \alpha_2 < 19$ МэВ, $\Delta\tau(\alpha_1 - \alpha_2) < 300$ мкс, $\Delta\tau(\alpha_2 - \alpha_4) < 50$ мс; б) аналогичное распределение для продуктов реакции $^{26}\text{Mg} + ^{204}\text{Pb}$, наличие ^{221}Th объясняется в тексте

ются 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}Ra [14]. То же самое можно сказать о появлении изотопов ^{218}Rn в реакции $^{26}\text{Mg} + ^{206}\text{Pb}$, показанных на рис. 2 (в желтой рамке) или $^{222-223}\text{Th}$ (красная и зеленая рамки), ^{219}Ra (фиолетовая). Подробнее об этом и об измеренных сечениях для xn -, αxn -, $2\alpha xn$ - и xpn -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}Pu и его дочерних продуктов. Новый изотоп ^{227}Pu с $E_\alpha = (8156 \pm \pm 26)$ 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 можно отнести к α -распаду нового изотопа ^{226}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}Pu можно проследить характерное для четно-нечетных ядер увеличение выживаемости по отношению к α -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. Phys. Res. A. 2022. V. 1033. P. 16640.
7. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Popeko A. G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 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. Phys. Res. A. 1994. V. 350, No. 3. P. 608–617.
12. *Andreev A. N., Bogdanov D. D., Chepigina 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., Düllmann Ch. E. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. 24250.

Получено 23 октября 2024 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 29.10.2024.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 0,73. Тираж 120 экз. Заказ № 60963.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/