

УДК 539.172.17

ПЕРВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ФАБРИКЕ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ: НОВЫЕ ДАННЫЕ В РЕАКЦИИ $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$

© 2023 г. Н. Д. Коврижных^{1, *}, Ю. Ц. Оганесян¹, В. К. Утенков¹, Ф. Ш. Абдуллин¹,
С. Н. Дмитриев¹, А. А. Джигоев¹, Д. Ибадуллаев^{1, 2, 3}, М. Г. Иткис¹, А. В. Карпов¹, Д. А. Кузнецов¹,
О. В. Петрушкин¹, А. В. Подшибякин¹, А. Н. Поляков¹, А. Г. Попеко¹, И. С. Рогов¹,
Р. Н. Сагайдак¹, Л. Шлаттауэр⁴, В. Д. Шубин¹, М. В. Шумейко¹, Д. И. Соловьев¹,
Ю. С. Цыганов¹, А. А. Воинов¹, В. Г. Субботин¹,
А. Ю. Бодров^{1, 5}, А. В. Сабельников¹, А. В. Халкин¹

¹Международная межправительственная организация
“Объединенный институт ядерных исследований”, Дубна, Россия

²Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

⁴Университет Палацкого, Оломоуц, Чехия

⁵Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, химический факультет, Москва, Россия

*E-mail: kovrizhnykh@jinr.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Обсуждаются результаты серии экспериментов по синтезу изотопов Mc в реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$, проведенных на новом сепараторе DGFRS-2 и циклотроне DC280 на Фабрике Сверхтяжелых Элементов в ЛЯР ОИЯИ. Зарегистрированы 110 новых цепочек распада ^{288}Mc , 10 цепочек ^{289}Mc и 4 цепочки ^{287}Mc . Альфа-распад ^{268}Db с энергией 7.6–8.0 МэВ, периодом полураспада 16_{-4}^{+6} ч и α -ветвью $51_{-12}^{+14}\%$ зарегистрирован впервые вместе с новым спонтанно делящимся изотопом ^{264}Lg с периодом полураспада $4.8_{-1.3}^{+2.2}$ ч. Измеренное сечение реакции $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{288}\text{Mc}$ составило $17.1_{-4.7}^{+6.3}$ пб, что является самым большим для известных сверхтяжелых ядер. Был синтезирован новый изотоп ^{286}Mc с периодом полураспада 20_{-9}^{+98} мс и энергией α -частиц 10.71 ± 0.02 МэВ. Спонтанное деление ^{279}Rg впервые наблюдалось в одной из четырех новых цепочек распада ^{287}Mc . Функция возбуждения реакции была измерена при шести энергиях ^{48}Ca в диапазоне 239–259 МэВ, что привело к первому наблюдению $5n$ канала с сечением $0.5_{-0.4}^{+1.3}$ пб. С более высокой точностью определены свойства распада 20 ранее известных изотопов.

DOI: 10.31857/S0367676523701946, EDN: ZAXALX

ВВЕДЕНИЕ

Изотопы элемента 115, ^{288}Mc и ^{287}Mc , были впервые синтезированы в 2003 году в реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ на сепараторе DGFRS [1]. В 2010–2012 гг. была проведена другая серия экспериментов в диапазоне энергий ^{48}Ca 240–254 МэВ [2]. В результате этих экспериментов мы отнесли четыре цепочки, состоящие из двух α -распадов и спонтанного деления (SF), наблюдавшиеся в течение минуты, к активности ^{289}Mc . Другие длинные цепочки (пять последовательных α -распадов и SF) были отнесены к ^{288}Mc (31 цепочка) и к ^{287}Mc (2 це-

почки). Кроме того, изотопы ^{289}Mc and ^{290}Mc наблюдались как дочерние ядра изотопов $^{293, 294}\text{Ts}$, продуктов реакции $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$, в двух экспериментах, проведенных в 2009–2010 и 2012 гг. (суммарно 20 цепочек распада [3]). Известно, что сложный спектр α -частиц нечетных ядер затрудняет их идентификацию. Однако, основываясь на комбинированном анализе их радиоактивных свойств, результатов экспериментов при разных энергиях ^{48}Ca и в реакциях с разными мишенями (^{243}Am и ^{249}Bk), мы отнесли наблюдавшиеся в этих реакциях цепочки к ядрам ^{287}Mc , ^{288}Mc и ^{289}Mc .

Таблица 1. Толщины мишени из ^{243}Am , энергии ^{48}Ca в середине слоя, результирующие интервалы энергии возбуждения, суммарные дозы пучка, числа наблюдаемых цепочек распада ^{288}Mc ($3n$) и ^{289}Mc ($2n$) и сечения их образования

Толщина мишени, мг/см ²	E_{lab} , МэВ	E^* , МэВ	Доза пучка $\times 10^{18}$	Число цепочек $3n/2n$	σ_{3n} , пб	σ_{2n} , пб
0.36	243.9	35.5–37.8	8.0	30/5	$9.8^{+2.6}_{-2.1}$	$1.6^{+1.2}_{-0.7}$
0.38	240.9	33.1–35.2	2.2	16/1	$17.1^{+6.3}_{-4.7}$	$1.1^{+2.5}_{-0.9}$
0.38	239.1	31.5–33.6	2.3	9/0	$9.9^{+5.1}_{-3.4}$	<2.1

Результаты экспериментов, проведенных в 2013 и 2015 гг. на сепараторах TASCА (GSI) и BGS (LBNL), были представлены в [4] и [5]. Продукты реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ были исследованы методами α -, X- и γ -совпадений. Двадцать две цепочки распада были отнесены к ^{288}Mc и одна к ^{287}Mc в [4]. В работе [6] не исключалось, что семь коротких цепочек распада могут так же быть отнесены к разным ветвям распада ^{288}Mc . В работе [5] все 46 синтезированных цепочек, включая три коротких, были отнесены к ^{288}Mc . В этих работах, благодаря регистрации α – γ -совпадений, были измерены энергии α -распада нескольких членов цепочки и были предложены схемы уровней ^{276}Mt и ^{272}Bh . Короткие и длинные цепочки (две цепочки ^{293}Ts и две ^{294}Ts) были также зарегистрированы в реакции $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$ в [7]. В обеих коротких цепочках ^{293}Ts , также как в двух из 16 в [3], после α -распада ^{281}Rg с энергией $E_\alpha = 9.3$ МэВ, было зарегистрировано спонтанное деление с периодом полураспада 5 мс. Наконец, в 2018 г. были опубликованы результаты экспериментов по измерению массового числа продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ на установке FIONA [8]. Массы первых ядер в двух цепочках оказались около 288 и 284 (после распада ^{288}Mc), что подтверждает правильность нашей идентификации ядра ^{288}Mc . В дополнение к физическим экспериментам, был проведен эксперимент по исследованию химических свойств ^{288}Mc и/или его дочерних ядер [9]. Пять зарегистрированных цепочек распада отнесены к ^{288}Mc .

Несмотря на то, что цепочки распада Mc составляют примерно половину всех цепочек сверхтяжелых ядер, зарегистрированных в реакциях ^{48}Ca с актинидными мишенями, несколько важных вопросов остаются открытыми, среди которых: масса материнского ядра в коротких цепочках, возможное существование двух времен распада ^{276}Mt , вероятность электронного захвата у ядер в цепочке распада Mc , сечение реакции слияния с испарением протона, вероятность α -распада ^{268}Db .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Новый экспериментальный комплекс, Фабрика Сверхтяжелых Элементов (SHE Factory) с новым циклотроном DC280, введен в строй в конце 2019 г. Интенсивность пучка ионов ^{48}Ca в DC280 может достигать 10 мкА частиц [10]. Для изучения продуктов реакций слияния, имеющих низкие сечения, новый газонаполненный сепаратор DGFRS-2 был установлен и протестирован в калибровочных экспериментах [11]. Его отличают от DGFRS высокая трансмиссия тяжелых ионов и низкий фон в фокальной плоскости.

Кроме научных задач первого эксперимента, проведенного в период с ноября 2020 г. по февраль 2021 г. [12] (см. табл. 1), были тесты DGFRS-2 в условиях длительной работы, измерение распределения ядер на фокальной плоскости и сравнение результатов с расчетами трансмиссии [13, 14], а также изучение фоновых условий.

Сепаратор состоит из 5 магнитов в конфигурации $Q_v D_h Q_h Q_v D$, где D обозначает дипольный магнит и Q – квадрупольный магнит, а индексы h и v обозначают горизонтальное и вертикальное фокусирование соответственно [11]. Сепаратор был заполнен водородом при давлении 1.15 мбар, который постоянно прокачивался через сепаратор в направлении от детекторной камеры до мишенного блока. Детекторная камера была отделена от объема DGFRS-2 майларовой фольгой толщиной 0.7 мкм и заполнена пентаном при давлении 1.60 мбар. В течение первой серии экспериментов, объем сепаратора, заполненного водородом, был отделен от ионопровода вращающимся титановым окном толщиной 0.62 мг/см². В последующих экспериментах мы использовали систему дифференциальной откачки [11]. Мишени из изотопа ^{243}Am (обогащение 99.5%) были изготовлены путем электроосаждения на подложку из Ti толщиной 0.62 мг/см². Шесть мишенных секторов были установлены на диск с диаметром 15 см и вращались со скоростью 1500 об./мин. Интенсивность пучка постепенно повышалась до 1.2–1.3 мкА частиц. Фокальный детектор размером 48 мм по вертикали и 220 мм по горизонтали состоял из двух двухсторонних стриповых детек-

торов (DSSD) площадью $48 \times 128 \text{ мм}^2$ с шириной стрипа 1 мм, установленных таким образом, что передний детектор закрывает часть заднего детектора. Фокальный детектор окружен восемью $60 \times 120\text{-мм}^2$ боковыми детекторами, каждый с 8 стрипами, формируя параллелепипед с пятью гранями и глубиной 120 мм. Перед детекторами установлены две многопроволочные пропорциональные камеры (МППК) для регистрации прилетающих из сепаратора ядер [11]. Система набора данных позволяла в онлайн режиме регистрировать пространственные, энергетические и временные корреляции между сигналами от имплантации ядер в детекторы и α -распадами изотопов Mc или их дочерних ядер. После этого пучок автоматически отключался для наблюдения распадов дочерних ядер при низком фоне. Энергии и времена распада ядер в цепочках ^{288}Mc и ^{289}Mc приведены в [12].

Основываясь на результатах работы [7], где был зарегистрирован α -распад ^{270}Db ($N = 165$) с периодом полураспада 1 ч, и ожидаемом сходстве свойств распада изотопов с $N = 163$ и 165, после онлайн регистрации десяти цепочек распада $^{288}\text{Mc} - ^{272}\text{Bh}$ мы продлили отключение пучка до 3–4 ч. В течение этих остановок мы не наблюдали α -частицы с $E_\alpha = 7\text{--}9 \text{ МэВ}$ в тех же самых стрипах фокального детектора, где наблюдались распады ^{288}Mc .

Мы также искали α -распады ^{268}Db , после которых наблюдалось бы деление ^{264}Lr с относительно коротким периодом полураспада. Мы выбрали цепочки ^{288}Mc , в которых α -подобные события с $E_\alpha = 7\text{--}10 \text{ МэВ}$ наблюдались между распадами ^{272}Bh и спонтанным делением. Энергетическое распределение α -подобных событий в зависимости от времени их регистрации относительно времени регистрации SF в цепочках (время SF взято как точка отсчета) показано на рис. 1а.

Как видно, во временном интервале от -10 до 0 ч и $E_\alpha = 7.6\text{--}8.0 \text{ МэВ}$ наблюдается повышенная концентрация событий, что говорит об их неслучайном происхождении. На рис. 1б показано временное распределение событий с $E_\alpha = 7.6\text{--}8.0 \text{ МэВ}$, из которого мы определили период полураспада спонтанно делящегося ядра $T_{1/2} = 4.9^{+2.1}_{-1.3} \text{ ч}$, которое следует за α -распадом ^{272}Bh и другого ядра с $E_\alpha = 7.6\text{--}8.0 \text{ МэВ}$. Энергетическое распределение событий, зарегистрированных за 10 ч перед SF, показано на рис. 1в. Виден пик в диапазоне $E_\alpha = 7.6\text{--}8.0 \text{ МэВ}$. Рисунок 1д) представляет спектр α -подобных событий, зарегистрированных за все время эксперимента, который показывает пики ядер, оставшиеся после калибровочных экспериментов, например, ^{211}Po ($E_\alpha = 7.45 \text{ МэВ}$). Не-

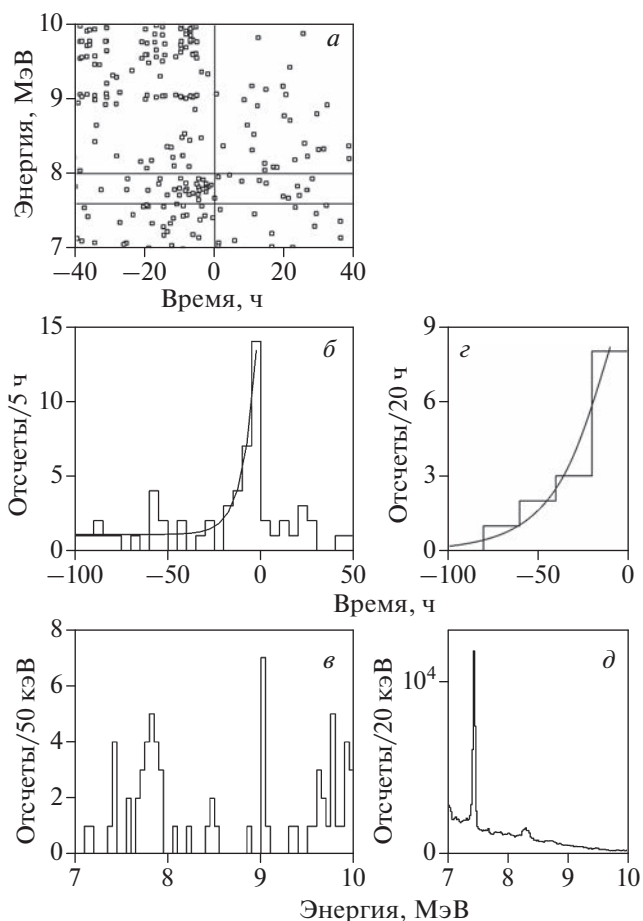


Рис. 1. Распределение энергии α -подобных событий в зависимости от времени их обнаружения по отношению к времени регистрации SF (а), распределение событий по времени с $E_\alpha = 7.6\text{--}8.0 \text{ МэВ}$ (б) и распределение энергии событий, зарегистрированных за 10 ч до SF (в). Большая часть событий с $E_\alpha \geq 9 \text{ МэВ}$ возникает в результате α -распадов $^{272}\text{Bh} - ^{284}\text{Nh}$. Кривая распада ^{268}Db (з); см. текст. Спектр α -подобных событий, зарегистрированных во время всех трех опытов (д).

случайная природа пика $7.6\text{--}8.0 \text{ МэВ}$ также следует из рис. 1б. Например, вероятность наблюдения 14 событий в пике при уровне фона около единицы меньше 10^{-11} . Энергетический диапазон $7.6\text{--}8.0 \text{ МэВ}$ хорошо согласуется с величиной, ожидаемой для ^{268}Db из таблиц масс [15–17], а также энергией 7.9 МэВ , отнесенной к ^{270}Db в [7]. Основываясь на этом, мы относим α -распад с $E_\alpha = 7.6\text{--}8.0 \text{ МэВ}$ к ^{268}Db . В этом случае спонтанное деление с периодом полураспада 4.9 ч принадлежит новому изотопу ^{264}Lr .

Из временных интервалов между α -распадами ^{272}Bh и событиями с $E_\alpha = 7.6\text{--}8.0 \text{ МэВ}$, за которыми следовало спонтанное деление в течение 5 ч, мы вычислили период полураспада ^{268}Db 16^{+6}_{-4} ч .

Таблица 2. Энергии пучка в середине мишенного слоя, соответствующие диапазоны энергий возбуждения, дозы пучка, количество наблюдаемых цепочек распада $^{289}\text{Mc}(2n)$, $^{288}\text{Mc}(3n)$, $^{287}\text{Mc}(4n)$ и $^{286}\text{Mc}(5n)$ и сечения их образования

$E_{\text{lab}}, \text{МэВ}$	$E^*, \text{МэВ}$	Доза пучка $\times 10^{18}$	Число цепочек $2n/3n/4n/5n$	$\sigma_{2n}, \text{пб}$	$\sigma_{3n}, \text{пб}$	$\sigma_{4n}, \text{пб}$	$\sigma_{5n}, \text{пб}$
242.2	34.0–36.3	9.2	4/52/2/0	$1.2^{+1.0}_{-0.6}$	15^{+5}_{-3}	$0.6^{+0.7}_{-0.4}$	
250.8	41.3–43.5	2.0	0/3/1/0		$4.1^{+4.2}_{-2.3}$	$1.4^{+3.2}_{-1.2}$	
259.1	48.2–50.4	5.0	0/0/1/1			$0.5^{+1.3}_{-0.4}$	$0.5^{+1.3}_{-0.4}$

Кривая распада ^{268}Db показана на рис. 1г. Ветвь α -распада составила $55^{+20}_{-15}\%$. Так как во всех предыдущих экспериментах период полураспада ^{268}Db был рассчитан из временных интервалов между распадами ^{272}Bh и спонтанным делением, которое может происходить с одинаковой вероятностью от ^{268}Db и ^{264}Lr , мы приходим к выводу, что период полураспада ^{268}Db был также определен впервые с использованием его ветви α -распада.

Измеренное сечение реакции $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{288}\text{Mc}$ составило $17.1^{+6.3}_{-4.7}$ пб, что почти вдвое превышает значение, измеренное ранее при энергии возбуждения 34–38 МэВ [2], и является самым большим из всех известных реакций слияния ^{48}Ca с актинидными ядрами, приводящими к образованию сверхтяжелых ядер.

Вторая серия экспериментов по синтезу изотопов Mc прошла в ноябре–декабре 2021 г. и в феврале 2022 г. [18]. Экспериментальные условия и некоторые результаты показаны в табл. 2.

Энергетический спектр α -частиц ядер ^{286}Mc , ^{287}Mc , ^{288}Mc , ^{289}Mc и продуктов их распада, наблюдаемых в [1–8, 19], а также и в наших недавних экспериментах [12, 18], показаны на рис. 2. Для спектра α -частиц, были выбраны события с энергетическим разрешением ≤ 40 кэВ. Периоды полураспада, показанные на рисунках, определены из всех известных данных.

При максимальной энергии ^{48}Ca (см. рис. 3) мы зарегистрировали α -распад нового изотопа ^{286}Mc с $E_{\alpha} = 10.71 \pm 0.02$ МэВ и $T_{1/2} = 20^{+98}_{-9}$ с [18]. Энергии α -частиц ^{282}Nh , ^{278}Rg и ^{270}Bh совпадают с теми значениями, что были измерены в реакции $^{237}\text{Np}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{282}\text{Nh}$ [19]. Времена распада от

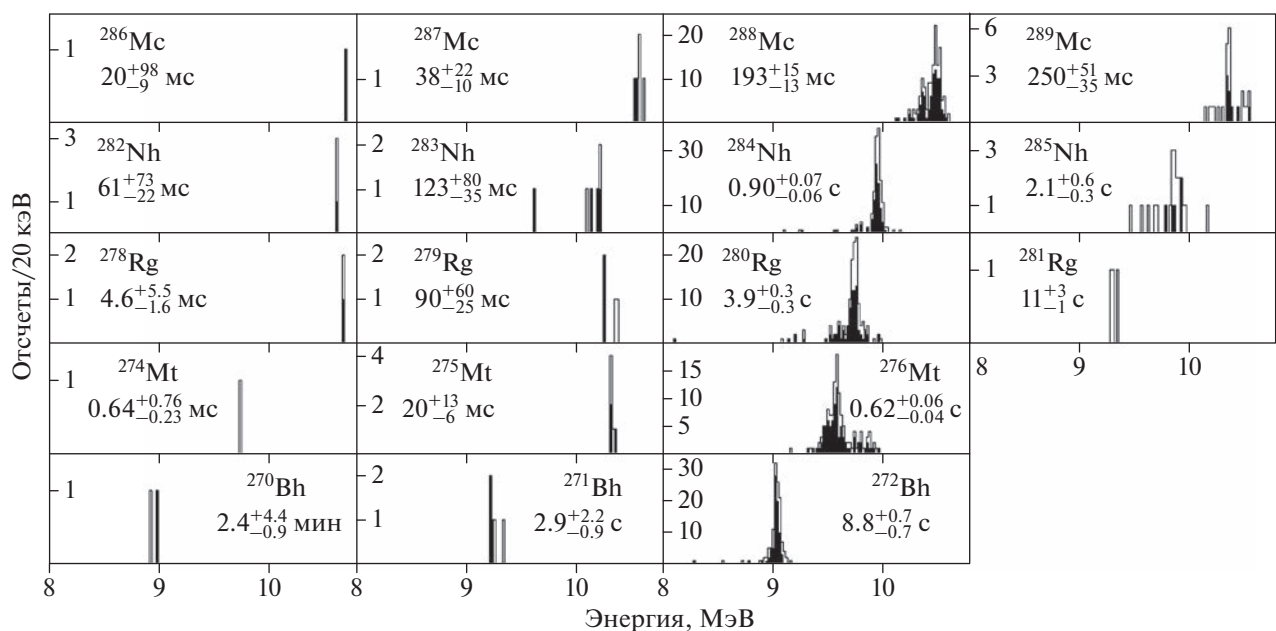


Рис. 2. Спектр α -частиц $^{286-289}\text{Mc}$ и дочерних ядер. События, зарегистрированные в обеих сериях экспериментов [12, 18], показаны закрытыми гистограммами, а их совокупность с ранее известными данными — открытыми гистограммами.

^{282}Nh до ^{270}Bh не противоречат временам, измеренным ранее. Период полураспада ^{266}Db составил 11_{-4}^{+21} мин.

Сечение реакции $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 5n)^{286}\text{Mc}$ было измерено впервые для реакций ^{48}Ca с нечетными по Z ядрами мишени и составило $0.5_{-0.4}^{+1.3}$ пб при $E^* = 49$ МэВ (рис. 3). Это значение близко к измеренным в реакциях $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 5n)^{287}\text{Fl}$ ($1.1_{-0.9}^{+2.6}$ пб при $E^* = 53$ МэВ) [20] и $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 5n)^{285}\text{Fl}$ ($0.6_{-0.5}^{+0.9}$ пб при $E^* = 50$ МэВ) [21].

В эксперименте мы зарегистрировали четыре цепочки распада ^{287}Mc . Удвоение числа цепочек ^{287}Mc по сравнению с известными данными сделало возможным более точно определить свойства распада изотопов от ^{287}Mc до ^{267}Db . По сравнению с данными работ [2, 4, 22] периоды полураспада ^{287}Mc , ^{279}Rg , ^{275}Mt и ^{267}Db ($T_{\text{SF}} = 1.4_{-0.4}^{+1.0}$ ч) практически совпадают с известными ранее данными. Периоды полураспада ^{283}Nh and ^{271}Bh оказались несколько больше, но разница не превышает экспериментальных неопределенностей.

В одной из цепочек распада ^{287}Mc , мы впервые зарегистрировали спонтанное деление ^{279}Rg , третьего из 26 нечетных по Z известных ядер с $Z > 105$ и $N > 162$. Это позволило оценить ветвь α -распада ^{279}Rg $b_{\alpha} = 87_{-19}^{+05}\%$; парциальные периоды полураспада $T_{\alpha} = 0.10_{-0.03}^{+0.08}$ с и $T_{\text{SF}} = 0.7_{-0.5}^{+0.7}$ с.

В этих экспериментах продукты $4n$ -испарительного канала наблюдались в диапазоне энергий возбуждения от 35 до 49 МэВ. Максимальное сечение в $1.4_{-1.2}^{+3.2}$ пб измерено при $E^* = 42$ МэВ.

При энергии возбуждения около 35 МэВ мы зарегистрировали 52 новых цепочки распада ^{288}Mc . Как и в первой серии экспериментов, была зарегистрирована α -активность с $E_{\alpha} = 7.6\text{--}8.0$ МэВ между α -распадами ^{272}Bh и событиями спонтанного деления, которые мы отнесли к изотопу ^{264}Lr . Новые результаты позволили более точно измерить период полураспада ^{264}Lr ($4.8_{-1.3}^{+2.2}$ ч) и ветвь α -распада для ^{268}Db ($51_{-12}^{+14}\%$).

Всего в этих экспериментах мы зарегистрировали 110 новых цепочек распада ^{288}Mc . Вместе с результатами работ [1, 2, 4, 5, 8, 12, 18] число цепочек распада этого ядра достигло примерно 210. Однако в этом и предыдущих экспериментах цепочка распада $ER - ^{288}\text{Mc} (SF/\beta^+, T_{1/2} = 0.2 \text{ с}) - ^{288}\text{Fl} (E_{\alpha} = 9.9 \text{ МэВ}, T_{1/2} = 0.7 \text{ с}) - ^{284}\text{Cn} (SF, T_{1/2} = 0.1 \text{ с})$, а именно, продукт электронного захвата или β^+ распада (EC/β^+) ^{288}Mc или $p2n$ -канала реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ не наблюдался. Из этого следует, что вероятность EC не превышает примерно 0.5% для ^{288}Mc . В то же время,

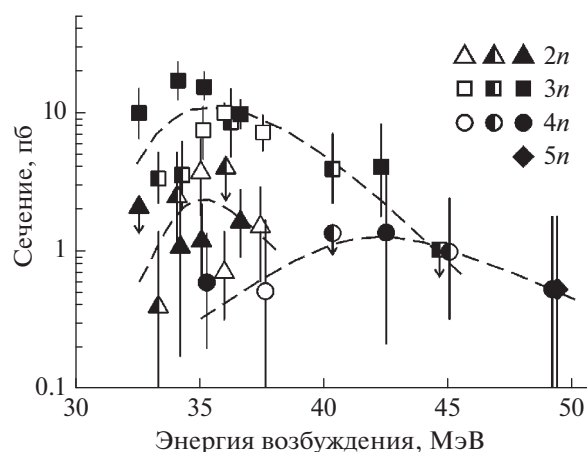


Рис. 3. Сечения $2n$ -, $3n$ -, $4n$ - и $5n$ -испарительных каналов реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$. Ошибки в величине сечения соответствуют полным неопределенностям. Символы со стрелками показывают верхние пределы сечений. Данные, показанные открытыми, полузакрытыми, и закрытыми символами взяты из работ [4, 5], [2] и [12, 18] соответственно. Пунктирные линии нарисованы через данные для упрощения визуального восприятия.

из 24 коротких цепочек, наблюдаемых в реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ в [2, 6] и в данных экспериментах [12, 18], 9 цепочек могут напоминать α -распад ^{288}Mc , за которым следует EC ^{284}Nh и спонтанное деление ^{284}Cn . К сожалению, предсказания периодов полураспада относительно EC скудны, и точность теоретических оценок может варьироваться в пределах двух порядков в зависимости от параметров моделей, см., например, [23, 24]. Однако оба ядра ^{288}Mc и ^{284}Nh расположены в области изотопов этих элементов, для которых прогнозируемые времена жизни относительно EC превышают 100 с [25].

Мы также оценили периоды полураспада относительно EC в рамках независимого квазиэстимного приближения на основе функционалов плотности энергии Скирма SLy4 и SkO. Периоды составили $1.1 \cdot 10^3$ с (SLy4), $1.0 \cdot 10^2$ с (SkO) для ^{288}Mc и $9.9 \cdot 10^2$ с (SLy4), $2.0 \cdot 10^2$ с (SkO) для ^{284}Nh [18].

Из этих оценок следует, что ветвь b_{EC} для ^{284}Nh может быть такой же, как и для ^{288}Mc , или в два раза выше, т.е. $\leq 1\%$. Исходя из этого, кажется маловероятным, что 9 цепочек обусловлены EC ^{284}Nh и делением ^{284}Cn .

Совокупность нескольких факторов указывает на то, что короткие цепочки принадлежат ^{289}Mc . Спектры α -частиц и периоды полураспада ядер, показанные на рис. 2, также включают события, зарегистрированные после распада ^{293}Ts [3, 7]. Энергетические распределения ^{289}Mc отличаются

от спектров α -частиц соседних легких изотопов. Например, спектр ^{288}Mc имеет пик с максимумом при $E_\alpha \approx 10.5$ МэВ, а спектр ^{289}Mc представляет собой распределение, состоящее из двух пиков с $E_\alpha \approx 10.35$ и 10.5 МэВ. Спектры дочерних ядер также различаются. Большинство событий, отнесенных к ^{284}Nh , имеют более узкое распределение, а спектр ^{285}Nh шире.

Времена распада материнского и дочернего ядер в длинной и короткой цепочках близки друг к другу, но периоды полураспада определенно различаются (рис. 2). Следует также иметь в виду, что вероятность деления ядер с нечетным числом нейтронов (^{288}Mc и ^{284}Nh) должна быть меньше по сравнению с ядрами с четным N (^{289}Mc и ^{285}Nh). Наконец, характер цепочки распада ^{293}Ts , продукта реакции $^{249}\text{Bk}(^{48}\text{Ca}, 4n)$, хорошо совпадает с характером распада короткой цепочки, наблюдаемой в реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$. Поэтому мы считаем, что присвоение короткой цепочки ^{289}Mc кажется более реалистичным.

В экспериментах по синтезу элемента Ts в реакции $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$ на DGFRS α -распад ^{285}Nh не наблюдался в двух из 16 цепочек ^{293}Ts [3], но он был зарегистрирован в обеих цепочках, полученных на TASCA [7]. В реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ α -распад ^{285}Nh был обнаружен во всех четырех цепочках на DGFRS [2], но в 2 из 7 цепочек, полученных на TASCA, и в 2 из 3 цепочек на BGS [5, 6] ^{285}Nh не наблюдался. Из анализа результатов [2, 5, 6] был сделан вывод, что существует 29%-ная ветвь SF у изотопа ^{285}Nh [6]. В этой работе мы также не наблюдали α -распад ^{285}Nh в половине из 10 цепочек. Таким образом, α -распад ^{285}Nh не был зарегистрирован в 11 из 42 цепочек. Из всех полученных данных следует, что ^{285}Nh имеет ветвь на SF $18_{-9}^{+10}\%$, что не противоречит результату [6]. Мы оценили парциальные периоды полураспада $T_\alpha = 2.6_{-0.5}^{+0.7}$ с и $T_{\text{SF}} = 12_{-5}^{+12}$ с для ^{285}Nh . Мы также оценили ветвь α -распада для дочернего ядра ^{281}Rg в $14_{-4}^{+10}\%$ и парциальные периоды полураспада $T_\alpha = 79_{-34}^{+42}$ с и $T_{\text{SF}} = 13_{-2}^{+4}$ с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наномгазонаполненном сепараторе DGFRS-2 Фабрики Сверхтяжелых Элементов ЛЯР ОИЯИ были проведены две серии экспериментов по синтезу продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ при шести энергиях ^{48}Ca для изучения свойств распада Mc и его дочерних ядер, а также определения возможностей дальнейших исследований сверхтяжелых ядер.

Измерена функция возбуждения реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ в широком диапазоне энергии ^{48}Ca

239–259 МэВ. Сечение реакции $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{288}\text{Mc}$ составило $17.1_{-4.7}^{+6.3}$ пб, что является самым большим для известных сверхтяжелых ядер вблизи Острова Стабильности.

В экспериментах было зарегистрировано 110 распадов ^{288}Mc . В них впервые обнаружен α -распад ^{268}Db с энергией 7.6–8.0 МэВ, периодом полураспада 16_{-4}^{+6} ч и α -ветвью $51_{-12}^{+14}\%$. Был также впервые синтезирован новый спонтанно делящийся изотоп ^{264}Lr с периодом полураспада $4.8_{-1.3}^{+2.2}$ ч.

Зарегистрировано 10 коротких цепочек ER- α -(α)-SF. Наблюдение этих ядер в реакциях с разными мишенными изотопами ^{243}Am и ^{249}Bk , а также отличие радиоактивных свойств ядер в цепочках от свойств ядер в цепочке распада ^{288}Mc указывает на то, что их следует отнести к ^{289}Mc . Из совокупности имеющихся данных мы оценили ветвь на SF $18_{-9}^{+10}\%$ для ^{285}Nh , а также его парциальные периоды полураспада $T_\alpha = 2.6_{-0.5}^{+0.7}$ с и $T_{\text{SF}} = 12_{-5}^{+12}$ с. Мы также оценили ветвь α -распада для дочернего ядра ^{281}Rg в $14_{-4}^{+10}\%$ и парциальные периоды полураспада $T_\alpha = 79_{-34}^{+42}$ с и $T_{\text{SF}} = 13_{-2}^{+4}$ с.

Зарегистрированы четыре новые цепочки распада ^{287}Mc . Впервые наблюдалось спонтанное деление ^{279}Rg . Были установлены его парциальные периоды полураспада $T_\alpha = 0.10_{-0.03}^{+0.08}$ и $T_{\text{SF}} = 0.7_{-0.5}^{+0.7}$ с.

При максимальной энергии ^{48}Ca впервые был синтезирован новый легчайший изотоп ^{286}Mc с энергией α -частиц 10.71 ± 0.02 МэВ и периодом полураспада 20_{-9}^{+98} мс. Сечение $5n$ канала составляло $0.5_{-0.4}^{+1.3}$ пб. Это значение близко к тем, которые были измерены в реакциях $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 5n)^{287}\text{Fl}$ и $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 5n)^{285}\text{Fl}$, где было получено по одному ядру в каждой из реакций.

Свойства распада всех изотопов хорошо согласуются с данными, полученными в 2003–2018 гг. Новые данные позволили нам определить свойства распада 20 изотопов с более высокой точностью. Совокупность полученных результатов демонстрирует, что новая Фабрика Сверхтяжелых Элементов является отличной лабораторией для продолжения исследований сверхтяжелых ядер.

Исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-10-2020-117), грантом дирекции ОИЯИ, а также грантом XDB34010000 Китайской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Lobanov Yu. V. et al. // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. Art. No. 021601(R).*

2. Oganessian Yu.Ts., Abdullin F.Sh., Dmitriev S.N. et al. // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. Art. No. 014302.
3. Oganessian Yu.Ts., Abdullin F.Sh., Alexander C. et al. // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. Art. No. 054621.
4. Rudolph D., Forsberg U., Golubev P. et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. Art. No. 112502.
5. Gates J.M., Gregorich K.E., Gothe O.R. et al. // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. Art. No. 021301(R).
6. Forsberg U., Rudolph D., Andersson L.-L. et al. // Nucl. Phys. A. 2016. V. 953. P. 117.
7. Khuyagbaatar J., Yakushev A., Düllmann Ch.E. et al. // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. Art. No. 054306.
8. Gates J.M., Pang G.K., Pore J.L. et al. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. Art. No. 222501.
9. Dmitriev S.N., Aksenov N.V., Albin Yu.V. et al. // Mendeleev Commun. 2014. V. 24. P. 253.
10. Gulbekian G.G., Dmitriev S.N., Itkis M.G. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16. P. 866.
11. Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Popeko A.G. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2022. V. 1033. Art. No. 166640.
12. Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Kovrizhnykh N.D. et al. // Phys. Rev. C. 2022. V. 106. Art. No. L031301.
13. Popeko A.G. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2016. V. 376. P. 144.
14. Solov'yev D.I., Kovrizhnykh N.D. // J. Instrum. 2022. V. 17. Art. No. P07033.
15. Wang M., Audi G., Kondev F.G. et al. // Phys. C. 2017. V. 41. Art. No. 030003.
16. Muntian I., Hofmann S., Patyk Z., Sobiczewski A. // Acta Phys. Polon. B. 2003. V. 34. P. 2073.
17. Wang N., Liu M., Wu X., Meng J. // Phys. Lett. B. 2014. V. 734. P. 215.
18. Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Kovrizhnykh N.D. et al. // Phys. Rev. C. 2022. V. 106. Art. No. 064306.
19. Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al. // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. Art. No. 011601(R).
20. Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al. // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. Art. No. 054607.
21. Ellison P.A., Gregorich K.E., Berryman J.S. et al. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. Art. No. 182701.
22. Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K. // Nucl. Phys. A. 2015. V. 944. P. 62.
23. Karpov A.V., Zagrebaev V.I., Martinez Palenzuela Y. et al. // Int. J. Mod. Phys. E. 2012. V. 21. Art. No. 1250013.
24. Sarriguren P. // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. Art. No. 014309.
25. Möller P., Nix J.R., Kratz K.-L. // Atom. Data Nucl. Data Tables. 1997. V. 66. P. 131.

First experiment at the Super Heavy Element Factory: new data from the $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ reaction

N. D. Kovrizhnykh^{a,*}, Yu. Ts. Oganessian^a, V. K. Utyonkov^a, F. Sh. Abdullin^a, S. N. Dmitriev^a,
A. A. Dzhiboev^a, D. Ibadullayev^{a,b,c}, M. G. Itkis^a, A. V. Karpov^a, D. A. Kuznetsov^a, O. V. Petrushkin^a,
A. V. Podshibiakin^a, A. N. Polyakov^a, A. G. Popeko^a, I. S. Rogov^a, R. N. Sagaidak^a,
L. Schlattauer^d, V. D. Shubin^a, M. V. Shumeiko^a, D. I. Solov'yev^a, Yu. S. Tsyganov^a,
A. A. Voinov^a, V. G. Subbotin^a, A. Yu. Bodrov^{a,e}, A. V. Sabel'nikov^a, and A. V. Khalkin^a

^a Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

^b Institute of Nuclear Physics, Almaty, 050032 Kazakhstan

^c Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, 010000 Kazakhstan

^d Palacky University Olomouc, Department of Experimental Physics, Faculty of Science, Olomouc, 771 46 Czech Republic

^e Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: kovrizhnyx@jinr.ru

We presented the results of the series of experiments on the synthesis of Mc isotopes in the $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ reaction performed at the new separator DGFRS-2 and cyclotron DC280 of the SHE Factory at FLNR JINR. There were registered 110 new ^{288}Mc decay chains, 10 ^{289}Mc chains, and 4 ^{287}Mc chains. Alpha decay of ^{268}Db with an energy of 7.6–8.0 MeV, half-life 16_{-4}^{+6} h and α -branch $51_{-12}^{+14}\%$ was registered for the first time together with a new spontaneously fissioning isotope ^{264}Lr with a half-life of $4.8_{-1.3}^{+2.2}$ h. The measured cross section of the $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{288}\text{Mc}$ reaction was $17.1_{-4.7}^{+6.3}$ pb, which is the largest for known superheavy nuclei. A new isotope ^{286}Mc was synthesized with a half-life of 20_{-9}^{+98} ms and an α -particle energy of 10.71 ± 0.02 MeV. Spontaneous fission of ^{279}Rg was first observed in one of the four new decay chains of ^{287}Mc . The reaction excitation function was measured at six ^{48}Ca energies in the range of 239–259 MeV, which led to the first observation of the 5n channel with a cross section of $0.5_{-0.4}^{+1.3}$ pb. The decay properties of 20 previously known isotopes have been determined with higher accuracy.