

УДК: 539.172.17

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

© 2022 г. Н.Д. Коврижных,^{1,*} Ю.Ц. Оганесян,¹ В.К. Утенков,¹ Ф.Ш. Абдуллин,¹ С.Н. Дмитриев,¹ А.А. Джигоев,¹ Д. Ибадуллаев,^{1,2,3} М.Г. Иткис,¹ А.В. Карпов,¹ Д.А. Кузнецов,¹ О.В. Петрушкин,¹ А.В. Подшибякин,¹ А.Н. Поляков,¹ А.Г. Попеко,¹ И.С. Рогов,¹ Р.Н. Сагайдак,¹ Л. Шлаттауэр,⁴ И.В. Широковский,¹ В.Д. Шубин,¹ М.В. Шумейко,¹ Д.И. Соловьев,¹ Ю.С. Цыганов,¹ А.А. Воинов,¹ В.Г. Субботин,¹ А.Ю. Бодров,¹ А.В. Сабельников,¹ А.В. Халкин,¹ В.Б. Злоказов,¹ К.П. Рикачевски,⁵ Т.Т.Кинг,⁵ Дж.Б. Роберто,⁵ Н.Т.Брюэр,⁵ Р.К. Грживач,^{5,6} З.Г. Ган,⁷ З.Я.Чжан,⁷ М.Х. Хуан,⁷ Х.Б. Ян.^{1,7}

¹ Объединённый Институт Ядерных Исследований, RU-141980 Дубна,

Российская Федерация

² Институт Ядерной Физики, 050032 Алматы, Казахстан

³ Евразийский Национальный Университет им. Л.Н.Гумилёва, 010000 Астана,

Казахстан

⁴ Университет Палацкого, 771 46 Оломоуц, Чехия

⁵ Ок-Риджская Национальная Лаборатория, Ок-Ридж, Теннесси 37831, США

⁶ Кафедра Физики и Астрономии, Университет Теннесси, Ноксвилл, Теннесси

37996, США

⁷ Институт Современной Физики, Китайская Академия Наук, Ланьчжоу

730000, Китай

*Электронный адрес: kovrizhnyx@jinr.ru

Поступила в редакцию 23.09.2022

После доработки 25.09.2022

Принята к публикации 30.10.2022

Мы представляем результаты серии экспериментов по синтезу изотопов Mc в реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$, проведённых на новом сепараторе DGFRS-2 и циклотроне DC280 на Фабрике Сверхтяжёлых 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}Lr 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 сверхтяжёлых 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.

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 годах была проведена другая серия экспериментов в диапазоне энергий ^{48}Ca 240 – 254 MeV [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 цепочки). Кроме того, изотопы ^{289}Mc and ^{290}Mc наблюдались как

дочерние ядра изотопов $^{293,294}\text{Tс}$, продуктов реакции $^{249}\text{Вк} + ^{48}\text{Са}$, в двух экспериментах, проведённых в 2009-2010 и 2012 годах (суммарно 20 цепочек распада [3]). Известно, что сложный спектр α -частиц нечётных ядер затрудняет их идентификацию. Однако, основываясь на комбинированном анализе их радиоактивных свойств, результатов экспериментов при разных энергиях $^{48}\text{Са}$ и в реакциях с разными мишенями (^{243}Am и $^{249}\text{Вк}$), мы отнесли наблюдавшиеся в этих реакциях цепочки к ядрам ^{287}Mc , ^{288}Mc и ^{289}Mc . Результаты экспериментов, проведённых в 2013 и 2015 годах на сепараторах TАССА (GSI) и BGS (LBNL), были представлены в [4] и [5]. Продукты реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Са}$ 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 $\alpha - \gamma$ -совпадений, энергии α -распада нескольких членов цепочки были измерены и были предложены схемы уровней ^{276}Mt и $^{272}\text{Вh}$. Короткие и длинные цепочки (две цепочки $^{293}\text{Tс}$ и две $^{294}\text{Tс}$) были также зарегистрированы в реакции $^{249}\text{Вк} + ^{48}\text{Са}$ в [7]. В обеих коротких цепочках $^{293}\text{Tс}$, 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 году были опубликованы результаты экспериментов по измерению массового числа продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Са}$ 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 проведён 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 сверхтяжёлых 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 времён 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 Сверхтяжёлых Элементов (SHE Factory) с новым циклотроном DC280, введён в строй в конце 2019 года. 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 тяжёлых ионов и низкий фон в фокальной плоскости.

Кроме научных задач первого эксперимента, проведённого в период с ноября 2020 г. по февраль 2021 г. [12] (см. Таблицу I), были тесты DGFRS-2 в условиях длительной работы, измерение распределения ядер на фокальной

плоскости и сравнение результатов с расчётами 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 объёма DGFRS-2 майларовой фольгой толщиной 0.7 мкм и заполнена пентаном при давлении 1.60 мбар. В течение первой серии экспериментов, объём сепаратора, заполненного водородом, был отделён от ионопровода вращающимся титановым окном толщиной 0.62 мг/см². В последующих экспериментах, мы использовали систему дифференциальной откачки [11]. Мишени из изотопа ²⁴³Am (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 детекторов (DSSD) площадью 48×128 мм² с шириной стрипа 1 мм, установленных таким образом, что передний детектор закрывает часть заднего детектора. Фокальный детектор окружён восемью 60×120-мм² 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 $N = 165$, 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 $E_\alpha = 7 - 9$ 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 $E_\alpha = 7 - 10$ 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 отсчёта) показано на Рис. 1(а).

Как видно, во временном интервале от -10 до 0 часов и $E_\alpha = 7.6-8.0$ МэВ наблюдается повышенная концентрация событий, что говорит об их

неслучайном происхождении. Рисунок 1(б) показывает временное распределение событий с $E_\alpha = 7.6 - 8.0$ МэВ, из которого мы определили период полураспада спонтанно делящегося ядра $T_{1/2} = 4.9_{-1.3}^{+2.1}$ ч, которое следует за α -распадом ^{272}Vh и другого ядра с $E_\alpha = 7.6-8.0$ МэВ. Энергетическое распределение событий, зарегистрированных за 10 часов перед SF, показано на Рис. 1(в). Виден пик в диапазоне $E_\alpha = 7.6 - 8.0$ МэВ. Рисунок 1(д) представляет спектр α -подобных событий, зарегистрированных за всё время эксперимента, который показывает пики ядер, оставшиеся после калибровочных экспериментов, например, ^{211}Po ($E_\alpha = 7.45$ МэВ). Неслучайная природа пика 7.6 – 8.0-МэВ также следует из рис. 1(б). Например, вероятность наблюдения 14 событий в пике при уровне фона около единицы меньше 10^{-11} . Энергетический диапазон 7.6 – 8.0 МэВ хорошо согласуется с величиной, ожидаемой для ^{268}Db из таблиц масс [15 - 17], а также энергией 7.9 МэВ, отнесённой к ^{270}Db в [7]. Основываясь на этом, мы относим α -распад с $E_\alpha = 7.6 - 8.0$ 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}Vh и событиями с $E_\alpha = 7.6 - 8.0$ МэВ, за которыми следовало спонтанное деление в течение 5 ч, мы вычислили период полураспада ^{268}Db 16_{-4}^{+6} ч. Кривая распада ^{268}Db показана на Рис. 1(г). Ветвь α -распада составила $55_{-1}^{+20}\%$. Так как во всех предыдущих экспериментах период полураспада ^{268}Db был рассчитан из временных интервалов между распадами ^{272}Vh 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 определён впервые с использованием его ветви α -распада.

Измеренное сечение реакции $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca},3n)^{288}\text{Mc}$ составило $17.1_{-4.7}^{+6.3}$ 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 сверхтяжёлых 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 Таблице II.

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 ниже) мы зарегистрировали α -распад нового изотопа ^{286}Mc с $E_{\alpha} = 10.71 \pm 0.02$ МэВ и $T_{1/2} = 20_{-9}^{+98}$ 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 ^{282}Nh до ^{270}Bh не противоречат временам, измеренным ранее. Период полураспада ^{266}Db составил 11_{-4}^{+21} мин.

Сечение реакции $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca},5\text{n})^{286}\text{Mc}$ было измерено впервые для реакций ^{48}Ca с нечётными по Z ядрами мишени и составило $0.5^{+1.3}_{-0.4}$ пб при $E^*=49$ МэВ (Рис. 3). Это значение близко к измеренным в реакциях $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},5\text{n})^{287}\text{Fl}$ ($1.1^{+2.6}_{-0.9}$ пб при $E^*=53$ МэВ) [20] и $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},5\text{n})^{285}\text{Fl}$ ($0.6^{+0.9}_{-0.5}$ 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 ($T_{\text{SF}}=1.4^{+1.0}_{-0.4}$ ч) практически совпадают с известными ранее данными. Периоды полураспада ^{283}Nh and ^{271}Bh оказались несколько больше, но разница не превышает экспериментальных неопределённостей.

В одной из цепочек распада ^{287}Mc , мы впервые зарегистрировали спонтанное деление ^{279}Rg , третьего из 26 нечётных по Z известных ядер с $Z>105$ и $N>162$. Это позволило оценить ветвь α -распада ^{279}Rg $b_{\alpha}=87^{+05}_{-19}$ %; парциальные периоды полураспада $T_{\alpha}=0,10^{+0,08}_{-0,03}$ с и $T_{\text{SF}}=0,7^{+0,7}_{-0,5}$ с.

В этих экспериментах, продукты 4n -испарительного канала наблюдались в диапазоне энергий возбуждения от 35 до 49 МэВ. Максимальное сечение в $1.4^{+3,2}_{-1,2}$ 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 $E_\alpha=7.6-8.0$ МэВ между α -распадами ^{272}Vh и событиями спонтанного деления, которые мы отнесли к изотопу ^{264}Lr . Новые результаты позволили более точно измерить период полураспада ^{264}Lr ($4.8^{+2.2}_{-1.3}$ ч) и ветвь α -распада для ^{268}Db (51^{+14}_{-12} %).

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}Mc (SF/ β^+ , $T_{1/2}=0.2$ с)- ^{288}Fl ($E_\alpha=9.9$ МэВ, $T_{1/2}=0.7$ с)- ^{284}Cn (SF, $T_{1/2}=0.1$ 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, 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 ценили периоды полураспада относительно EC в рамках независимого квазичастичного приближения на основе функционалов

плотности энергии Скирма SLy4 и SkO. Периоды составили 1.1×10^3 с (SLy4), 1.0×10^2 с (SkO) для ^{288}Mc и 9.9×10^2 с (SLy4), 2.0×10^2 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 лёгких 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, отнесённых 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 TASCА [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 TASCА, 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^{+10}_{-9} %, что не противоречит результату [6]. Мы оценили парциальные периоды полураспада $T_{\alpha} = 2.6^{+0.7}_{-0.5}$ с и $T_{\text{SF}} = 12^{+12}_{-5}$ с для ^{285}Nh . Мы также оценили ветвь α -распада для дочернего ядра ^{281}Rg в 14^{+10}_{-4} % и парциальные периоды полураспада $T_{\alpha} = 79^{+42}_{-34}$ с и $T_{\text{SF}} = 13^{+4}_{-2}$ с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На новом газонаполненном сепараторе DGFRS-2 Фабрики Сверхтяжёлых 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 $17.1^{+6.3}_{-4.7}$ пб, что является самым большим для известных сверхтяжёлых 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^{+6}_{-4} ч и α -ветвью $51^{+14}_{-12}\%$. Был также впервые синтезирован новый спонтанно делящийся изотоп ^{264}Lr с периодом полураспада $4.8^{+2.2}_{-1.3}$ 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 $18^{+10}_{-9}\%$ для ^{285}Nh , а также его парциальные периоды полураспада $T_{\alpha}=2.6^{+0.7}_{-0.5}$ с и $T_{\text{SF}}=12^{+12}_{-5}$ с. Мы также оценили ветвь α -распада для дочернего ядра ^{281}Rg в $14^{+10}_{-4}\%$ и парциальные периоды полураспада $T_{\alpha}=79^{+42}_{-34}$ с и $T_{\text{SF}}=13^{+4}_{-2}$ с.

Зарегистрированы четыре новые цепочки распада ^{287}Mc . Впервые наблюдалось спонтанное деление ^{279}Rg . Были установлены его парциальные периоды полураспада $T_{\alpha}=0.10^{+0.08}_{-0.03}$ с и $T_{\text{SF}}=0.7^{+0.7}_{-0.5}$ 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^{+98}_{-9} мс. Сечение 5n канала составляло $0.5^{+1.3}_{-0.4}$ пб. Это значение

близко к тем, которые были измерены в реакциях $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},5\text{n})^{287}\text{Fl}$ и $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},5\text{n})^{285}\text{Fl}$, где было получено по одному ядру в каждой из реакций.

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

Эти исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта № 075-10-2020-117 и грантом дирекции ОИЯИ, а также грантами DE-AC05-00OR22725 Министерства энергетики США и XDB34010000 Китайской академии наук.

РИСУНКИ

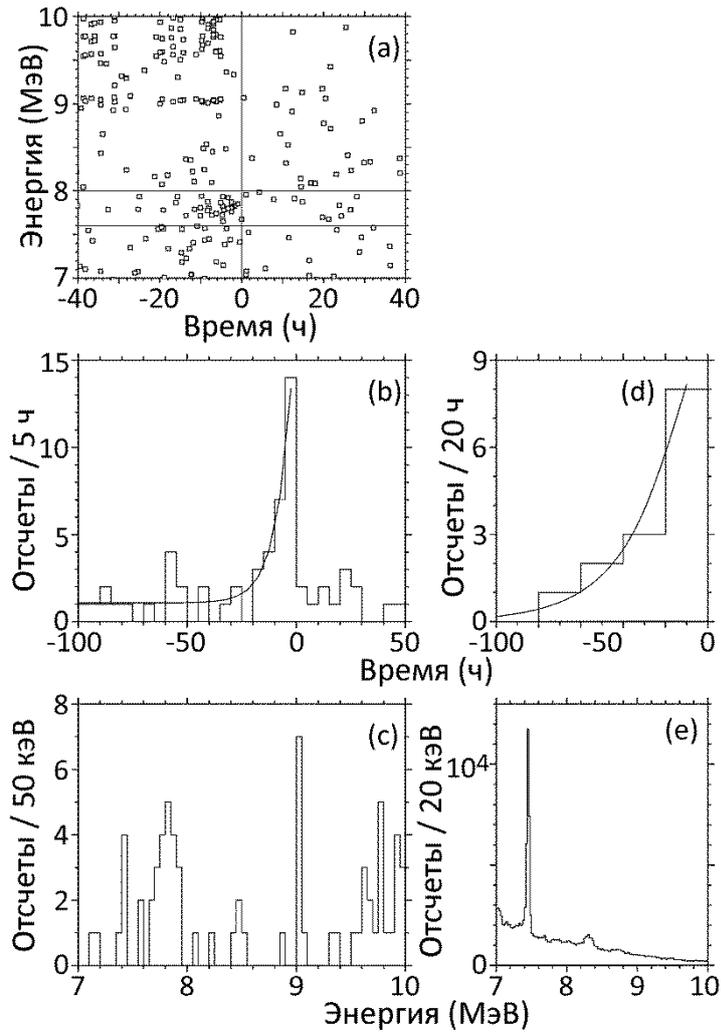


Рисунок 1

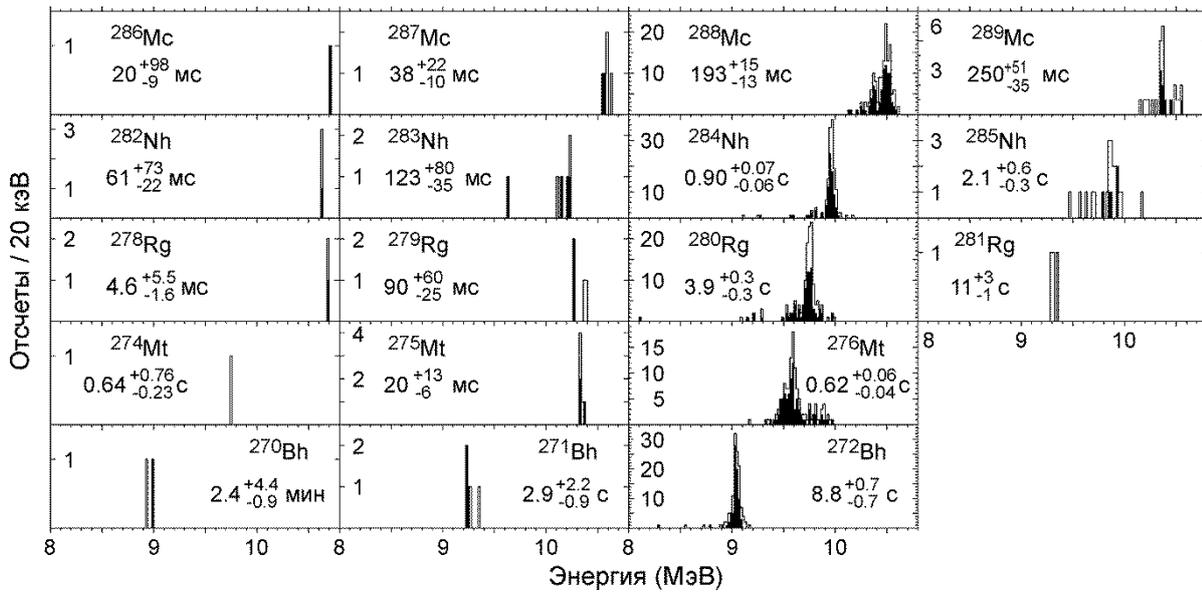


Рисунок 2

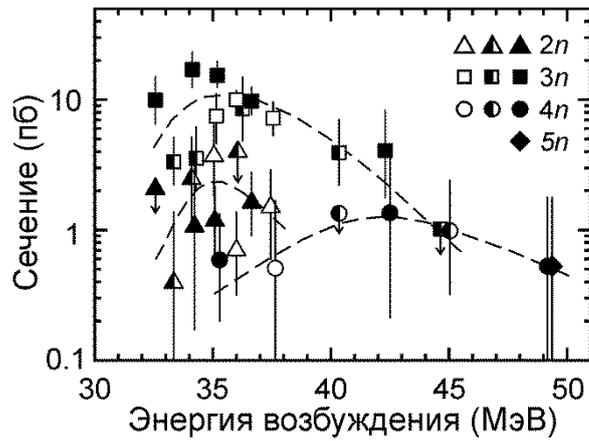


Рисунок 3

ТАБЛИЦЫ

ТАБЛИЦА I: 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	$9,9^{+5,1}_{-3,4}$	$<2,1$

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

E_{lab} (MeV)	E^* (MeV)	Beam dose $\times 10^{18}$	No. of chains 2n/3n/4n/5n	σ_{2n} (pb)	σ_{3n} (pb)	σ_{4n} (pb)	σ_{5n} (pb)
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			$0.5^{+1.3}_{-0.4}$	$0.5^{+1.3}_{-0.4}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. C **69**, 021601(R) (2004).
2. Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. C **87**, 014302 (2013).
3. Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. C **87**, 054621 (2013).
4. D. Rudolph et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 112502 (2013).

5. J. M. Gates et al., Phys. Rev. C **92**, 021301(R) (2015).
6. U. Forsberg et al., Nucl. Phys. A **953**, 117 (2016).
7. J. Khuyagbaatar et al., Phys. Rev. C **99**, 054306 (2019).
8. J. M. Gates et al., Phys. Rev. Lett. **121**, 222501 (2018).
9. S. N. Dmitriev et al., Mendeleev Commun. **24**, 253 (2014).
10. G. G. Gulbekian et al., Phys. Part. Nucl. Lett. **16**, 866 (2019).
11. Yu. Ts. Oganessian et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1033**, 166640 (2022).
12. Yu. Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. C (to be published).
13. A. G. Popeko, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **376**, 144 (2016).
14. D. I. Solovyev and N. D. Kovrizhnykh, J. Instrum. **17**, P07033 (2022).
15. M. Wang, G. Audi, F. G. Kondev, W. J. Huang, S. Naimi, and X. Xu, Chin. Phys. C **41**, 030003 (2017).
16. I. Muntian, S. Hofmann, Z. Patyk, and A. Sobiczewski, Acta Phys. Polonica B **34**, 2073 (2003).
17. N. Wang, M. Liu, X. Wu, and J. Meng, Phys. Lett. B **734**, 215 (2014).
18. Yu. Ts. Oganessian et. al. (unpublished).
19. Yu. Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. C **76**, 011601(R) (2007).
20. Yu. Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. C **69**, 054607 (2004).
21. P. A. Ellison *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 182701 (2010).
22. Yu. Ts. Oganessian and V. K. Utyonkov, Nucl. Phys. A **944**, 62 (2015).
23. A. V. Karpov, V. I. Zagrebaev, Y. Martinez Palenzuela, L. Felipe Ruiz, and Walter Greiner, International Journal of Modern Physics E **21**, 1250013 (2012).

24. P. Sarriguren, Phys. Rev. C **100**, 014309 (2019).

25. P. Möller, J. R. Nix, and K.-L. Kratz, At. Data Nucl. Data Tables **66**, 131 (1997).

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

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 $E_\alpha = 7.6 - 8.0$ МэВ (б) и распределение энергии событий, зарегистрированных за 10 часов до SF (в). Большая часть событий с $E_\alpha \geq 9$ МэВ возникает в результате α -распадов $^{272}\text{Bh} - ^{284}\text{Nh}$. На рис. 1(г) показана кривая распада ^{268}Db , см. текст. На рис. 1(д) представлен спектр α -подобных событий, зарегистрированных во время всех трех опытов.

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.

РИС. 3: Сечения $2n$ -, $3n$ -, $4n$ - и $5n$ -испарительных каналов реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$. Ошибки в величине сечения соответствуют полным неопределённостям. 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.

FIRST EXPERIMENT AT THE SUPER HEAVY ELEMENT FACTORY:

NEW DATA FROM THE $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ REACTION

© 2022 г. N.D. Kovrizhnykh ^{1,*}, Yu.Ts. Oganessian ¹, V.K. Utyonkov ¹, F.Sh.

Abdullin ¹, S.N. Dmitriev ¹, A.A. Dzhioev ¹, D. Ibadullayev ^{1,2}, M.G. Itkis ¹, A.V.

Karpov ¹, D.A. Kuznetsov ¹, O.V. Petrushkin ¹, A.V. Podshibiakin ¹, A.N.

Polyakov ¹, A.G. Popeko ¹, I.S. Rogov ¹, R.N. Sagaidak ¹, L. Schlattauer ^{1,3}, I.V.

Shirokovski ¹, V.D. Shubin ¹, M.V. Shumeiko ¹, D.I. Solovyev ¹, Yu.S.

**Tsyganov¹, A.A. Voinov¹, V.G. Subbotin¹, A.Yu. Bodrov^{1,4}, A.V. Sabel'nikov¹,
A.V. Khalkin¹, V.B. Zlokazov¹, K.P. Rykaczewski⁵, T.T. King⁵, J.B. Roberto⁵,
N.T. Brewer⁵, R.K. Grzywacz^{5,6}, Z.G. Gan⁷, Z.Y. Zhang⁷, M.H. Huang⁷, H.B.
Yang^{1,7}**

¹*Joint Institute for Nuclear Research, RU-141980 Dubna, Russian Federation*

²*L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010000 Nur-Sultan, Kazakhstan*

³*Palacky University Olomouc, Department of Experimental Physics, Faculty of
Science, 771 46 Olomouc, Czech Republic*

⁴*Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry, Radiochemistry
division, RU-119991 Moscow, Russian Federation*

⁵*Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA*

⁶*Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, Knoxville,
Tennessee 37996, USA*

⁷*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

*Электронный адрес: kovrizhnyx@jinr.ru

Received by the editorial office 23.09.2022

After completion 25.09.2022

Accepted for publication 30.10.2022

We present 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^{+6}_{-4} h and α -branch $51^{+14}_{-12}\%$ was registered for the first time

together with a new spontaneously fissioning isotope ^{264}Lr with a half-life of $4.8^{+2.2}_{-1.3}$ h. The measured cross section of the $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca},3\text{n})^{288}\text{Mc}$ reaction was $17.1^{+6.3}_{-4.7}$ pb, which is the largest for known superheavy nuclei. A new isotope ^{286}Mc was synthesized with a half-life of 20^{+98}_{-9} 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 $0.5^{+1.3}_{-0.4}$ pb. The decay properties of 20 previously known isotopes have been determined with higher accuracy.