

## КОНКУРС НАУЧНЫХ РАБОТ ОИЯИ

### **РАЗДЕЛ: "НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ"**

Цикл работ

#### **“ФАБРИКА СТЭ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ”**

Авторы

1. **Оганесян Ю. Ц.**
2. **Дмитриев С. Н.**
3. **Абдуллин Ф. Ш.**
4. **Ибадуллаев Д.**
5. **Коврижных Н. Д.**
6. **Поляков А. Н.**
7. **Сагайдак Р. Н.**
8. **Утенков В. К.**
9. **Цыганов Ю. С.**
10. **Шумейко М. В.**

Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова

Дубна 2022 г.

## Представление

### На цикл работ “ФАБРИКА СТЭ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ”

#### Раздел: НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

##### Авторы

1. Оганесян Ю. Ц. (ЛЯР, ОИЯИ)
2. Дмитриев С. Н. (ЛЯР, ОИЯИ)
3. Абдуллин Ф. Ш. (ЛЯР, ОИЯИ)
4. Ибадуллаев Д. (ЛЯР, ОИЯИ)
5. Коврижных Н. Д. (ЛЯР, ОИЯИ)
6. Поляков А. Н. (ЛЯР, ОИЯИ)
7. Сагайдак Р. Н. (ЛЯР, ОИЯИ)
8. Утенков В. К. (ЛЯР, ОИЯИ)
9. Цыганов Ю. С. (ЛЯР, ОИЯИ)
10. Шумейко М. В. (ЛЯР, ОИЯИ)

В цикле работе представлены результаты первых экспериментов, выполненных в 2020-2022 годах на новом газонаполненном сепараторе DGFRS-2 Фабрики Сверхтяжелых Элементов (СТЭ). Цель данных экспериментов заключалась в изучении возможностей Фабрики СТЭ для продолжения исследований наиболее тяжелых ядер. Высокая чувствительность нового экспериментального комплекса ЛЯР ОИЯИ позволила не только изучить его технические характеристики, но и заметно продвинуться в исследовании радиоактивных свойств изотопов СТЭ и их образования в реакциях полного слияния взаимодействующих ядер.

Эксперименты по изучению реакции  $^{243}\text{Am}+^{48}\text{Ca}$  были выполнены при шести энергиях  $^{48}\text{Ca}$ . Было зарегистрировано 125 цепочек распада изотопов Mc. Такое количество цепочек более чем в три раза превышает число распадов этих изотопов, зарегистрированных в наших предыдущих экспериментах, выполненных на сепараторе DGFRS в течение 2003-2012 годов.

Из сравнения с результатами первых экспериментов было показано, что эффективность сбора ядер на детекторах нового сепаратора в два раза превышает трансмиссию DGFRS, что крайне важно для постановки экспериментов по синтезу новых СТЭ тяжелее Og ( $Z=118$ ).

Впервые синтезирован новый, самый легкий изотоп  $^{286}\text{Mc}$ . Свойства его распада имеют большое значение для идентификации нового элемента 119, продукта реакции  $^{243}\text{Am}(^{54}\text{Cr},3n)^{294}119$ , методами корреляций с известными ядрами и перекрестных реакций. Определено сечение  $5n$  канала реакции  $^{243}\text{Am}+^{48}\text{Ca}$ , этот канал ранее наблюдался только в реакциях с четными по  $Z$  мишенными ядрами (по одной цепочке в реакциях с  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{242}\text{Pu}$ ).

Максимальное сечение реакции  $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca},3n)^{288}\text{Mc}$  составило 17 пб ( $1 \text{ пб} = 10^{-36} \text{ см}^2$ ), что в два раза выше ранее измеренных значений и является самым большим из всех известных сечений образования сверхтяжелых ядер.

Измерены и определены с большей точностью свойства распада 21 изотопа СТЭ от Mc до Db. В экспериментах, выполненных ранее в ЛЯР (DGFRS), а позже в GSI (TASCA) и LBNL (BGS), у изотопа  $^{268}\text{Db}$  (период полураспада около 1 д.) наблюдалось только спонтанное деление. Зарегистрировать его возможный альфа-распад не позволяли большое время жизни и высокий фон частиц, не отличимых от альфа-частиц. Благодаря высокому фактору подавления фоновых частиц на DGFRS-2 (на два порядка) удалось впервые зарегистрировать альфа-распад  $^{268}\text{Db}$ , вероятность которого составляет около 50%. Это привело к открытию нового спонтанно делящегося изотопа  $^{264}\text{Lr}$ . Поскольку все предыдущие оценки периода полураспада  $^{268}\text{Db}$  основывались на наблюдении спонтанного деления в конце цепочек распада  $^{288}\text{Mc}$ , которое может быть обусловлено как делением  $^{268}\text{Db}$ , так и  $^{264}\text{Lr}$ , можно утверждать, что радиоактивные свойства  $^{268}\text{Db}$  также определены впервые.

Впервые зарегистрирована ветвь на спонтанное деление изотопа  $^{279}\text{Rg}$  в цепочке распада  $^{287}\text{Mc}$ , что позволило определить его стабильность относительно деления.

Также проведены серии экспериментов по изучению изотопов четных элементов в реакциях  $^{242}\text{Pu}+^{48}\text{Ca}$  и  $^{238}\text{U}+^{48}\text{Ca}$ .

В реакции  $^{238}\text{U}+^{48}\text{Ca}$  зарегистрировано 16 цепочек распада  $^{283}\text{Cn}$  ( $Z=112$ ) и его дочерних ядер вплоть до  $^{267}\text{Rf}$  ( $Z=104$ ) при двух энергиях  $^{48}\text{Ca}$  вблизи кулоновского барьера реакции. Интенсивность пучка  $^{48}\text{Ca}$  достигала 6.5 мкА частиц, что в 6 раз превысило возможности существующих в мире ускорителей.

Этот же изотоп наблюдался после распада его материнского изотопа  $^{287}\text{Fl}$  в реакции  $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},3n)^{287}\text{Fl}$ . Синтезировано 69 цепочек его распада. Отметим, что большинство цепочек обрывается спонтанным делением ядра  $^{279}\text{Ds}$  ( $Z=110$ ). Ранее наблюдались лишь 4 цепочки, в которых этот изотоп испытывал альфа-распад. В данных экспериментах на DGFRS-2 зарегистрировано 11 новых альфа-распадов  $^{279}\text{Ds}$ . Это позволило не только значительно точнее определить свойства дочерних ядер  $^{275}\text{Hs}$ ,  $^{271}\text{Sg}$  и  $^{267}\text{Rf}$ . Результаты указывают на существование распадов  $^{287}\text{Fl}$ ,  $^{283}\text{Cn}$  и  $^{279}\text{Ds}$  через разные уровни этих ядер, которые в одном случае ведут к альфа-распаду  $^{279}\text{Ds}$ , а в другом к его спонтанному делению, что не наблюдалось у ядер СТЭ. Ранее такая особенность была обнаружена только у двух легких ядер  $^{261}\text{Rf}$  и  $^{247}\text{Md}$ .

Значительное повышение числа зарегистрированных ядер привело к более точному определению сечения реакции  $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},3n)^{287}\text{Fl}$ , которое оказалось втрое выше ранее известной величины.

В другом канале реакции,  $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},4n)^{286}\text{Fl}$ , синтезировано 25 цепочек четно-четного изотопа  $^{286}\text{Fl}$ , который приблизительно с равными вероятностями испытывает альфа-распад или делится спонтанно. Новые данные позволили получить два существенных результата.

Во-первых, они ставят под сомнение результаты опытов, проведенных на сепараторе TASCA (GSI), в которых в одной из двух наблюдаемых цепочек распада  $^{286}\text{Fl}$  предположительно наблюдался распад четно-четного ядра на высокий энергетический уровень дочернего ядра, что может указывать на деформацию указанных ядер, которая не следует из традиционных теоретических расчетов. Число ядер  $^{286}\text{Fl}$ , в которых такой распад не наблюдался, на порядок превышает результат указанной работы.

С другой стороны, впервые для четно-четного сверхтяжелого ядра зарегистрирована дополнительная к основной линия, энергия которой ниже на 100-200 кэВ. Одним из возможных объяснений происхождения этой линии является распад из основного состояния  $^{286}\text{Fl}$  ( $0^+$ ) на первый ротационный уровень дочернего ядра  $^{282}\text{Cn}$ . Это предположение хорошо согласуется с расчетами энергии уровня  $2^+$ . Точное измерение энергии этого уровня позволит в будущем впервые определить деформацию сверхтяжелого ядра.

Не менее интересным представляется другое объяснение природы наблюдавшейся линии – распад ядер через их изомерные состояния. Согласно расчетам, такое отличие в энергии может быть обусловлено распадами через два теоретически предсказанных изомерных уровня  $5^+_{\pi}$  ядер  $^{286}\text{Fl}$  и  $^{282}\text{Cn}$ . Такие экзотические распады также никогда не наблюдались для сверхтяжелых ядер.

В ходе данных экспериментов более точно определены свойства распада 8 изотопов элементов от Rf до Fl.

Основные результаты работы:

Благодаря высокой чувствительности нового экспериментального комплекса ЛЯР ОИЯИ, в описанных экспериментах было синтезировано 125 цепочек распадов изотопов Mc и 110 цепочек, начинающихся с распадов изотопов Fl и Cn, впервые синтезированы изотопы  $^{286}\text{Mc}$  и  $^{264}\text{Lr}$ , установлены свойства  $^{268}\text{Db}$ , измерены функции возбуждения трех реакций при 11 энергиях ионов  $^{48}\text{Ca}$ . Вследствие большого числа синтезированных ядер более точно измерены максимумы сечений реакций с ядрами мишеней из  $^{243}\text{Am}$  и  $^{242}\text{Pu}$ , которые оказались существенно выше ранее известных значений. Получена новая информация о радиоактивных свойствах 30 изотопов элементов от Lr и Rf до Fl и Mc.

Полученные результаты продемонстрировали высокую чувствительность Фабрики СТЭ, которая необходима для продолжения исследований области сверхтяжелых элементов и синтеза новых элементов 119 и 120.

#### Список публикаций

1. Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, D. Ibadullayev, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, M.G. Itkis, A.V. Karpov, N.D. Kovrizhnykh, D.A. Kuznetsov, O.V. Petrushkin, A.V. Podshibiakin, A.N. Polyakov, A.G. Popeko, R.N. Sagaidak, L. Schlattauer, V.D. Shubin, M.V. Shumeiko, D.I. Solovyev, Yu.S. Tsyganov, A.A. Voinov, V.G. Subbotin, A.Yu. Bodrov, A.V. Sabel'nikov, A. Lindner, K.P. Rykaczewski, T.T. King, J.B. Roberto, N.T. Brewer, R.K. Grzywacz, Z.G. Gan, Z.Y. Zhang, M.H. Huang, and H.B. Yang.

**Investigation of  $^{48}\text{Ca}$ -induced reactions with  $^{242}\text{Pu}$  and  $^{238}\text{U}$  targets at the JINR Superheavy Element Factory.**

Phys. Rev. C **106**, 026412 (2022).

2. Yu. Ts. Oganessian, V. K. Utyonkov, N. D. Kovrizhnykh, F. Sh. Abdullin, S. N. Dmitriev, D. Ibadullayev, M. G. Itkis, D. A. Kuznetsov, O. V. Petrushkin, A. V. Podshibiakin, A. N. Polyakov, A. G. Popeko, R. N. Sagaidak, L. Schlattauer, I. V. Shirokovski, V. D. Shubin, M. V. Shumeiko, D. I. Solovyev, Yu. S. Tsyganov, A. A. Voinov, V. G. Subbotin, A. Yu. Bodrov, A. V. Sabel'nikov, A. V. Khalkin, V. B. Zloказov, K. P. Rykaczewski, T. T. King, J. B. Roberto, N. T. Brewer, R. K. Grzywacz, Z. G. Gan, Z. Y. Zhang, M. H. Huang, and H. B. Yang.

**First experiment at the Super Heavy Element Factory: High cross section of  $^{288}\text{Mc}$  in the  $^{243}\text{Am}+^{48}\text{Ca}$  reaction and identification of the new isotope  $^{264}\text{Lr}$ .**

Phys. Rev. C **106**, L031301 (2022).

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

**Первый эксперимент на Фабрике Сверхтяжелых Элементов: новые данные в реакции  $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$**

Доклад на LXXII Международной конференции «Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения».

Вестник РАН. Серия Физическая (принято в печать).

4. Д. Ибадуллаев, В. К. Утенков, Ю. Ц. Оганесян, Ф.Ш. Абдуллин С.Н. Дмитриев, М.Г. Иткис, А.В. Карпов, Н.Д. Коврижных, Д.А. Кузнецов, О.В. Петрушкин, А.В. Подшибякин, А.Н. Поляков, А.Г. Попеко, Р.Н. Сагайдак, Л. Шлаттауэр, В.Д. Шубин, М.В. Шумейко, Д.И. Соловьев, Ю.С. Цыганов, А.А. Воинов, В.Г. Субботин, А.Ю. Бодров, А.В. Сабельников, А. Линднер, К.П. Рикашевски, Т.Т. Кинг, Дж.Б. Роберто, Н.Т. Брюэр, Р.К. Гживатч, З.Г. Ган, З.И. Жан, М.Х. Хуан, Х.Б. Ян, Ш.Г. Гиниятова.

**Исследование реакции  $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$  на Фабрике Сверхтяжелых Элементов**

Доклад на LXXII Международной конференции «Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения».

Вестник РАН. Серия Физическая (принято в печать).