

УДК 539.1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ НА ФАБРИКЕ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2023 г. Д. Ибадуллаев^{1, 2, 3, *}, В. К. Утенков¹, Ю. Ц. Оганесян¹, Ф. Ш. Абдуллин¹,
С. Н. Дмитриев¹, М. Г. Иткис¹, А. В. Карпов¹, Н. Д. Коврижных¹, Д. А. Кузнецов¹,
О. В. Петрушкин¹, А. В. Подшибякин¹, А. Н. Поляков¹, А. Г. Попеко¹, Р. Н. Сагайдак¹,
Л. Шлаттауэр^{1, 4}, В. Д. Шубин¹, М. В. Шумейко¹, Д. И. Соловьев¹, Ю. С. Цыганов,
А. А. Воинов¹, В. Г. Субботин¹, А. Ю. Бодров¹, А. В. Сабельников¹,
Ш. Г. Гиниятова³, К. А. Кутербеков³

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

²Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

⁴Университет Палацкого, Оломоуц, Чехия

*E-mail: Ibadullayev@jinr.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

На новом газонаполненном сепараторе DGFRS-2, установленном на пучке циклотрона ДЦ-280 Фабрики сверхтяжелых элементов в ЛЯР ОИЯИ, выполнены эксперименты по синтезу изотопов 114 элемента в реакции $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$. Уточнены свойства распада ^{286}Fl и ^{287}Fl , а также продуктов их α -распада. Обсуждается возможность существования изомерных состояний у ядер в цепочке последовательных α -распадов ^{287}Fl . Измерено максимальное сечение $10.4^{+3.5}_{-2.1}$ пб реакции $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{287}\text{Fl}$.

DOI: 10.31857/S0367676523701971, EDN: ZBIBVZ

ВВЕДЕНИЕ

Обсудим результаты экспериментов с мишенью из ^{242}Pu [1], проведенных на Фабрике сверхтяжелых элементов (Фабрика СТЭ) [2] в ЛЯР ОИЯИ (Дубна). Пучок ионов ^{48}Ca , ускоренных на новом циклотроне ДЦ-280, сталкивается с мишенью из обогащенного изотопа ^{242}Pu , нанесенного на титановую подложку. Выбитые из мишени продукты реакции попадают в газонаполненный сепаратор DGFRS-2 [3], который отделяет их от пучка ионов ^{48}Ca и фоновых частиц. Этот и предыдущий эксперимент $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ [4] были проведены с целью тестирования возможностей Фабрики СТЭ для получения и изучения новых изотопов известных сверхтяжелых элементов до Og ($Z = 118$), а также синтеза новых элементов с $Z > 118$.

Реакцию $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ планируется использовать для дальнейшего изучения химических свойств элемента Fl ($Z = 114$). Для подготовки и проведения таких экспериментов необходимо более точно измерить сечение в максимуме функции возбуждения реакции $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)$, а также

свойства распада ^{287}Fl ($T_{1/2} \approx 0.5$ с) и его дочерних ядер.

Сечение реакции и свойства ядер в цепочке распада ^{287}Fl были впервые измерены на DGFRS в 2003 году [5–8]. Всего было зарегистрировано 19 цепочек распада ^{287}Fl в реакциях с $^{242}, ^{244}\text{Pu}$ и ^{245}Cm . Те же изотопы наблюдались в экспериментах по изучению химических свойств элементов Cn [9] и Fl [10] (6 цепочек), а также на сепараторах SHIP (1 цепочка ^{291}Lv и 4 цепочки ^{283}Cn [11–13]), BGS (1 цепочка ^{287}Fl [14]) и GARIS-II (2 цепочки ^{283}Cn [15]).

В реакциях $^{242}\text{Pu}, ^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ на DGFRS также был синтезирован и наблюдался как дочерний продукт более легкий изотоп ^{286}Fl [6–8]. Две цепочки распада ^{286}Fl были получены на сепараторе BGS в реакции $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ [14, 16].

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент по синтезу изотопов флеровия был проведен с марта по июнь 2021 г. Основные параметры эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры эксперимента $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$: Приведены толщины мишени из ^{242}Pu , лабораторные энергии ^{48}Ca в центре мишени, соответствующие энергии возбуждения составного ядра ^{290}Fl , дозы пучка, количество зарегистрированных цепочек распада изотопов Fl и сечения их образования

Толщина мишени, мг/см ²	E_{lab} , МэВ	E^* , МэВ	Доза пучка ($\times 10^{18}$)	Кол-во цепочек $3n/4n$	σ_{3n} , пб	σ_{4n} , пб
^{242}Pu $10 \times 0.76, 0.56, 0.35$	242.5	37.1–40.7	11.2	65/11	$10.4^{+3.5}_{-2.1}$	$1.8^{+1.0}_{-0.6}$
	247.5	41.3–44.8	5.0	4/14	$1.2^{+1.2}_{-0.7}$	$4.8^{+2.1}_{-2.1}$

Мишень состояла из обогащенного изотопа ^{242}Pu (95.5%) и изготавливалась электроосаждением на подложке из Ti толщиной 0.62 мг/см². Мишень состояла из 12 секторов, которые устанавливались по периметру диска диаметром 24 см, и вращались со скоростью 980 об./мин.

Объем сепаратора DGFRS-2 [3] от системы дифференциальной откачки до детекторной камеры был заполнен водородом под давлением 0.9 мбар. Детекторная камера была отделена от объема DGFRS-2 майларовой фольгой толщиной 0.7 мкм и заполнена пентаном под давлением 1.6 мбар.

Фокальный детектор размером 48 мм по вертикали и 220 мм по горизонтали состоял из двух двухсторонних кремниевых стриповых детекторов размером 48×128 мм² (Micron Semiconductor Ltd.). Они были установлены один за другим так, что передний детектор закрывал часть заднего детектора. Эти детекторы были окружены восемью односторонними боковыми детекторами размером 60×120 мм², каждый с 8 стрипами, образующими коробку глубиной 120 мм. Все сигналы в детекторах с амплитудами выше порога (E_n) 0.55–0.6 МэВ регистрировались независимо цифровыми и аналоговыми системами сбора данных, аналогичными используемым на DGFRS [17].

Перед детекторами были установлены две многопроволочные пропорциональные камеры для регистрации ядер, прошедших через сепаратор [3]. Аналоговая электроника была создана для регистрации в режиме реального времени пространственных, энергетических и временных корреляций между сигналами от имплантации ядер (ER) в детекторы и их α -распадами, зарегистрированными с полной энергией, с параметрами, ожидаемыми для изотопов Fl или их дочерних ядер (а именно, энергии событий и временные интервалы $ER-\alpha$). Эта пара коррелированных событий приводила к отклонению пучка через 0.1 мс после регистрации первой α -частицы для наблюдения распадов дочерних ядер в условиях низкого фона [18–20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Энергии α -частиц или осколков деления и времени распада ядер в цепочках, относящихся к ^{287}Fl и ^{286}Fl , приведены в [1]. Энергетические спектры и

временные распределения α -частиц ^{287}Fl , ^{283}Sn , ^{279}Ds , ^{275}Hs , ^{271}Sg и ^{267}Rf (только временное распределение), обнаруженных в [5–15] и в данной работе, показаны на рис. 1. Для спектров α -частиц выбирались события с энергетическим разрешением лучше 40 кэВ. Для распределения времен распада были выбраны только распады после зарегистрированного ближайшего предшественника.

Количество новых зарегистрированных цепочек распада ^{287}Fl приблизительно в три раза превышает количество ядер, синтезированных во всех предыдущих экспериментах, что позволяет точнее определить их свойства распада. Периоды полураспада, измеренные в этой работе, составляют 0.33 ± 0.04 , $3.7^{+0.5}_{-0.4}$, 0.18 ± 0.02 , $0.78^{+0.38}_{-0.19}$, 28^{+14}_{-7} с и 40^{+23}_{-11} мин для изотопов ^{287}Fl , ^{283}Sn , ^{279}Ds , ^{275}Hs , ^{271}Sg и ^{267}Rf соответственно. Следует отметить, что в предыдущих экспериментах было обнаружено только 4 цепочки ^{287}Fl , в которых ^{279}Ds испытывает α -распад. Энергетические спектры, измеренные в данном эксперименте, хорошо согласуются с результатами предыдущих экспериментов. Однако период полураспада ^{287}Fl оказался ниже ранее измеренного значения (0.36 ± 0.04 с вместо $0.48^{+0.14}_{-0.09}$ с), что может снизить чувствительность эксперимента по изучению химических свойств Fl.

Если выделить из α -частиц ^{287}Fl и ^{283}Sn только те, которые сопровождаются α -распадом ^{279}Ds , то можно заметить небольшое отличие их энергетических спектров от суммарных α -спектров этих изотопов. Распределения энергий α -частиц и времен распада ядер в таких случаях показаны черными гистограммами на рис. 1. Представляется, что относительно большая часть энергий таких частиц приходится на более низкую энергетическую область спектра. Например, 11 из 66 событий (17%) всего спектра ^{287}Fl были зарегистрированы с $E_\alpha < 9.94$ МэВ, но большая часть, 2 из 8 событий (25%), приведших к α -распаду ^{279}Ds , наблюдались в этой низкоэнергетической области. Для α -частиц ^{283}Sn с $E_\alpha < 9.44$ МэВ эти отношения составляют 9/82 (11%) и 3/9 (33%) соответственно. Кроме того, периоды полураспада ^{287}Fl и ^{283}Sn в таких цепочках несколько меньше тех, которые определены по сумме событий, $T_{1/2} = 0.21^{+0.10}_{-0.05}$ и $2.8^{+1.1}_{-0.6}$ с соответственно (сравните

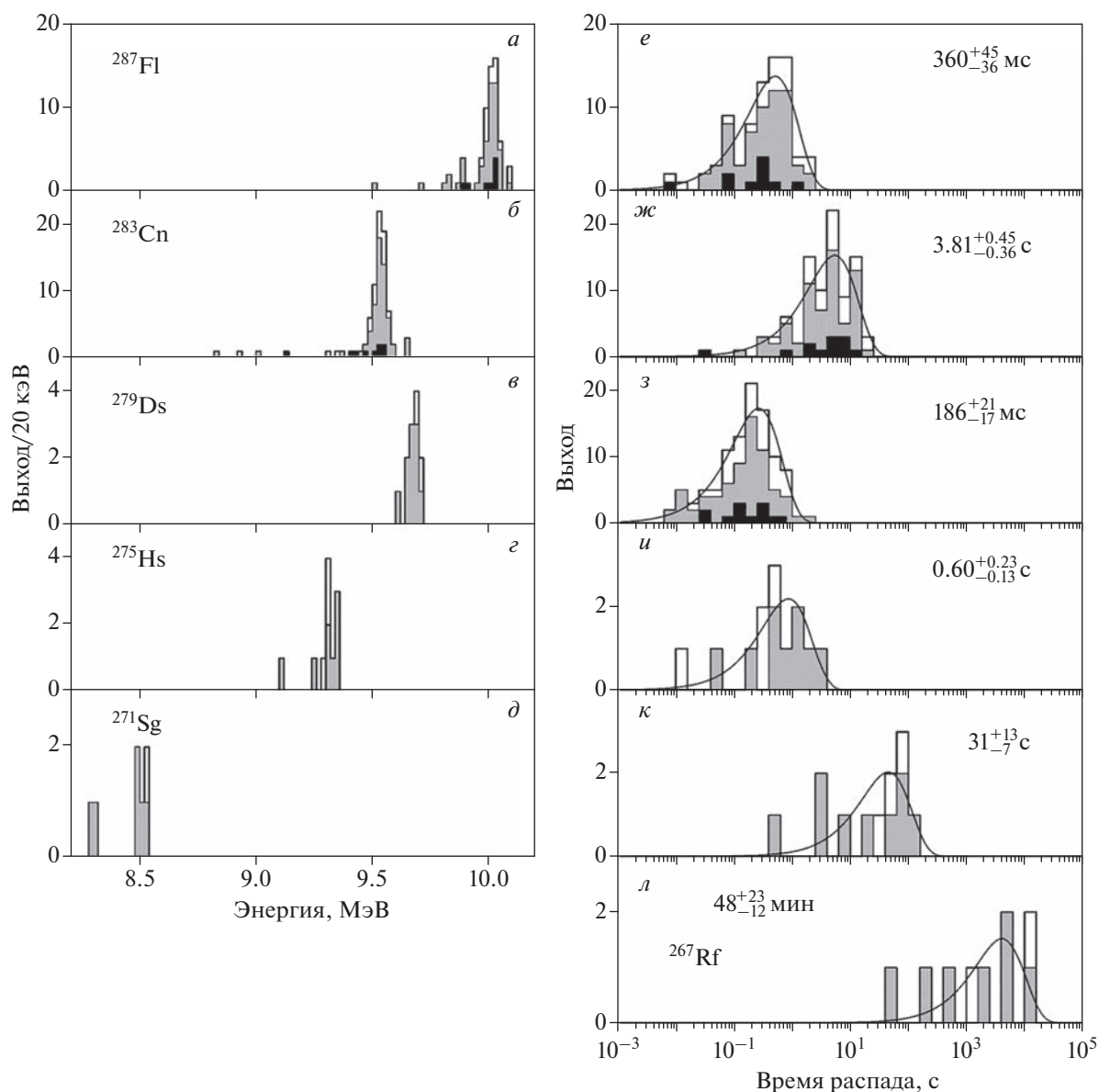


Рис. 1. Энергетические спектры α -частиц (слева) и распределения времен распада в логарифмическом масштабе (справа) для ^{287}Fl (а, е) и дочерних ядер ^{283}Cn (б, ж), ^{279}Ds (в, з), ^{275}Hs (г, и), ^{271}Sg (д, к) и ^{267}Rf (л). Данные этой работы и их совокупность с известными результатами показаны серой и открытой гистограммами соответственно. Энергии α -частиц и времена распада ^{287}Fl и ^{283}Cn с последующим α -распадом ^{279}Ds , а также времена α -распада ^{279}Ds показаны черным цветом.

с данными рис. 1). Период полураспада ^{279}Ds , определенный по его α -распаду, составляет $0.16^{+0.06}_{-0.04}$ с, что аналогично значению, рассчитанному по всем событиям. Очевидно, что эти наблюдения основаны на небольшом количестве событий, и для их подтверждения или опровержения требуются дальнейшие исследования. Если это действительно так, то это может означать, что структура уровней ядер, участвующих в α -распаде, влияет на вероятность деления. Аналогичная особенность наблюдается у ^{261}Rf , который имеет

два состояния с $T_{1/2} = 68$ с, $E_\alpha = 8.28$ МэВ, ветвь спонтанного деления (SF) $b_{SF} < 0.11$ и $T_{1/2} = 3$ с, $E_\alpha = 8.51$ МэВ, $b_{SF} = 0.91$ (см., например, [21]).

В реакции $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ также зарегистрировано 25 распадов соседнего изотопа ^{286}Fl [1]. Спонтанное деление ^{286}Fl зарегистрировано в 11 из 25 цепочек распадов. Такое количество α -распадов и событий SF хорошо согласуется с известной ветвью для α -распада этого изотопа, $b_\alpha = 60^{+10}_{-11}\%$ [5]. Энергетический спектр ^{286}Fl и распределения времен распада ^{286}Fl , наблюдавшихся в [6–8, 14,

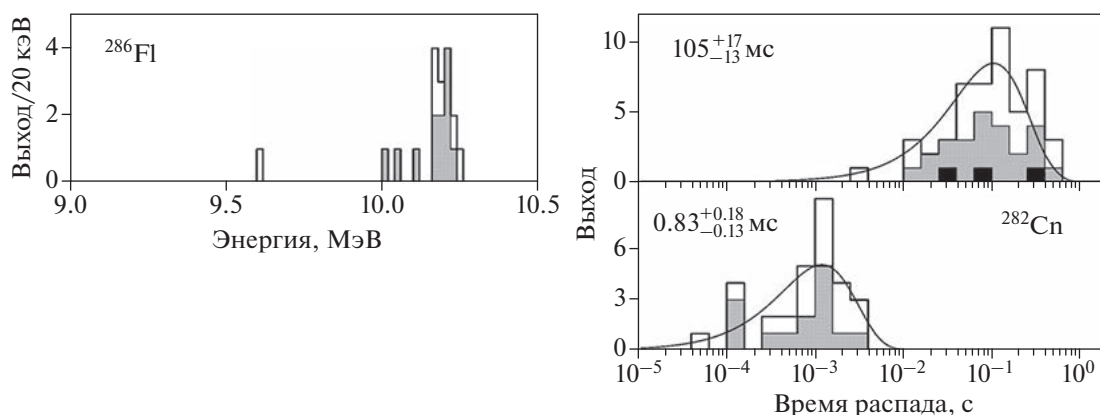


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для ^{286}Fl . Времена распада ^{286}Fl с низкими энергиями α -частиц показаны черным цветом.

16, 17, 22] и этой работе, показаны на рис. 2. Новые данные хорошо согласуются с ранее известными результатами. Период полураспада, измеренный в этой работе, составляет 91_{-15}^{+22} мс для ^{286}Fl . Энергетический спектр вновь измеренных α -частиц также согласуется со спектром, представленным в [5] для ^{286}Fl .

Для четно-четного ^{286}Fl впервые обнаружены три α -частицы с $E_\alpha = 10.003 \pm 0.036$, 10.050 ± 0.027 и 10.109 ± 0.016 МэВ, отличающиеся, с учетом энергетических неопределенностей, от энергии основной линии 10.19 МэВ. Времена их распада выделены черным на рис. 2. Энергия второго пика $E_\alpha = 10.054 \pm 0.053$ МэВ ниже энергии основной линии примерно на 100–200 кэВ.

Возможной причиной таких α -переходов является распад на первый ротационный уровень $2+^{282}\text{Cn}$. Ветвь α -распада в основное состояние

($0+$) и на ротационный уровень $2+$ оценивается согласно [23] как 67 и 33% соответственно. Экспериментальные значения составляют около 82 и 18%. Наблюдаемое различие между расчетными и измеренными значениями ветви распада может быть связано с двумя факторами: недостаточной статистикой распадов на возбужденный уровень и/или завышенным значением деформации β_2 , использованной в расчетах.

Другое объяснение основано на предсказанных изомерных состояниях. Схема двухквaziчастичных уровней ^{286}Fl и его дочернего ядра ^{282}Cn была предложена в [24]. Согласно расчетам, энергия 10.05 МэВ может быть обусловлена заселением в прямой реакции $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ двухквaziпротонного изомерного состояния 5_π^+ у ^{286}Fl и последующим распадом на тот же уровень 5_π^+ у ^{282}Cn . Имеется хорошее согласие между экспериментальными и теоретическими результатами.

В эксперименте с ^{242}Pu энергии ^{48}Ca выбирались близкими к ожидаемым максимумам сечений $3n$ - и $4n$ -каналов. Для $4n$ -канала измеренные сечения не противоречат известным ранее значениям [6, 16] (см. рис. 3). Максимальное сечение $3n$ -канала превышает значение, измеренное в [6], примерно в 3 раза. Такие различия могут быть связаны с небольшим количеством ядер, зарегистрированных в предыдущих экспериментах. Кроме того, повышенное значение сечения можно объяснить тем, что энергия ^{48}Ca в текущих экспериментах была ближе к максимуму функции возбуждения, чем в [6]. Также на расчетное значение сечения влияла настройка магнитных элементов DGFRS, определяющая его трансмиссию, а также точность оценки толщины мишени и дозы пучка. Для расчета сечений реакций с мишенью толщиной 0.76 мг/см^2 использовалась трансмиссия 50% [25, 26].

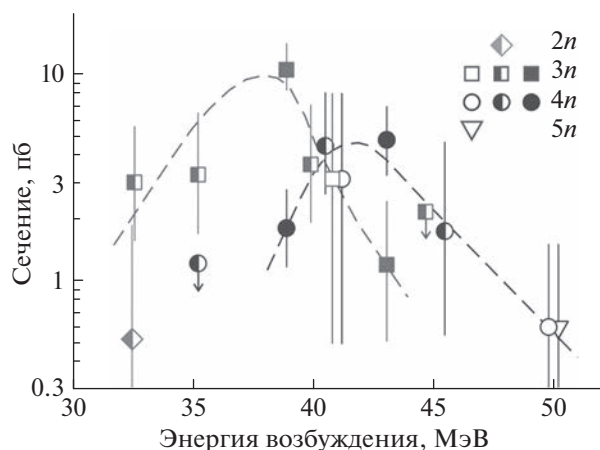


Рис. 3. Сечения реакции $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ с испарением от 2 до 5 нейтронов. Данные, показанные открытыми, полузакрытыми и закрытыми символами, взяты из [6, 11, 15, 16] и этой работы соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реакция $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ изучена при двух энергиях пучка на новом сепараторе DGFRS-2. Свойства распада ^{286}Fl и ^{287}Fl , а также их дочерних ядер были уточнены благодаря 25 и 69 новым цепочкам распада соответственно.

Максимальное сечение $3n$ -канала, ведущего к ^{287}Fl , оказалось примерно в три раза больше, чем было измерено в предыдущих экспериментах.

Два разных α -перехода в основное состояние и на возбужденный уровень в цепочках распадов ^{287}Fl , приводящих к α -распаду ^{279}Ds в одном случае и его SF в другом, могут следовать из несколько разных энергий α -частиц и периодов полураспада ^{287}Fl и ^{283}Cn .

Для четно-четного ^{286}Fl впервые наблюдалась новая α -линия с энергией на 100–200 кэВ ниже основного пика. Обсуждается возможное происхождение этой линии, а именно, заселение ротационного уровня $2+$ у ^{282}Cn или переход, соединяющий изомерные состояния у ^{286}Fl и ^{282}Cn .

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., Ibadullayev D. et al. // Phys. Rev. C. 2022. V. 106. No. 2. Art. No. 024612.
2. Gulbekian G.G., Dmitriev S.N., Itkis M.G. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16. P. 866.
3. Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V.K., Solovyev D.I. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2022. V. 1033. Art. No. 166640.
4. Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V.K., Kovrizhnykh N.D. et al. // Phys. Rev. C. 2022. V. 106. Art. No. 064306.
5. Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V.K. // Nucl. Phys. A. 2015. V. 944. P. 62.
6. Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu. V. et al. // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. Art. No. 064609.
7. Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu. V. et al. // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. Art. No. 054607.
8. Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu. V. et al. // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. Art. No. 044602.
9. Eichler R., Aksenov N.V., Belozеров A.V. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2008. V. 47. P. 3262.
10. Eichler R., Aksenov N.V., Albin Yu. V. et al. // Radiochim. Acta. 2010. V. 98. P. 133.
11. Hofmann S., Ackermann D., Antalic S. et al. // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 32. P. 251.
12. Hofmann S., Heinz S., Mann R. et al. // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 180.
13. Hofmann S., Heinz S., Mann R. et al. // Eur. Phys. J. A. 2012. V. 48. P. 62.
14. Stavsetra L., Gregorich K.E., Dvorak J. et al. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. P. 132502.
15. Daiya Kaji, Kouji Morimoto, Hiromitsu Haba et al. // J. Phys. Soc. Japan. 2017. V. 86. Art. No. 085001.
16. Ellison P.A., Gregorich K.E., Berryman J.S. et al. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. No. 18. P. 182701.
17. Brewer N.T., Utyonkov V.K., Rykaczewski K.P. et al. // Phys. Rev. C. 2018. V. 98. Art. No. 024317.
18. Ibadullayev D., Tsyganov Yu.S., Polyakov A.N. et al. // Euras. J. Phys. Funct. Mater. 2022. V. 6. No. 1. P. 18.
19. Tsyganov Yu.S., Ibadullayev D., Polyakov A.N. et al. // Acta Phys. Polon. B. Proc. Suppl. 2021. V. 14. No. 4. P. 767.
20. Ibadullayev D., Tsyganov Yu. S., Solovyov D. I. et al. // Acta Phys. Polon. B. Proc. Suppl. 2021. V. 14. No. 4. P. 873.
21. Haba H., Kaji D., Kikunaga H. et al. // Phys. Rev. C. 2011. V. 83. Art. No. 034602.
22. Sămark-Roth A., Cox D.M., Rudolph D. et al. // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126. Art. No. 032503.
23. Kuklin S.N., Shneidman T.M., Adamian G.G., Antonenko N.V. // Eur. Phys. J. A. 2012. V. 48. P. 112.
24. Kuzmina A.N., Adamian G.G., Antonenko N.V. // Phys. Rev. C. 2012. V. 85. Art. No. 027308.
25. Popeko A.G. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2016. V. 376. P. 144.
26. Solovyev D.I., Kovrizhnykh N.D. // J. Instrum. 2022. V. 17. Art. No. 07033.

Study of the $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction at Super Heavy Element Factory

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

^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-mail: Ibadullayev@jinr.ru

Experiments on the synthesis of isotopes of element 114 in the $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction were carried out at a new gas-filled separator DGFRS-2 online to the DC-280 cyclotron of the Superheavy Element Factory at FLNR JINR. The decay properties of ^{286}Fl and ^{287}Fl , as well as their α -decay products, were refined. The possibility of the existence of isomeric states in successive α -decays of ^{287}Fl is discussed. The maximum cross section of $10.4_{-2.1}^{+3.5}$ pb was measured for the $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{287}\text{Fl}$ reaction.