

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЙ СЕПАРАТОР GRAND. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*А. В. Еремин^{a,б,1}, А. Г. Попеко^{a,б}, А. И. Свирихин^{a,б},
О. Н. Малышев^{a,б}, Ю. А. Попов^{a,б}, М. А. Бычков^a,
А. В. Исаев^{a,б}, Д. Е. Катрасев^a, А. А. Кузнецова^a,
Р. С. Мухин^a, Н. Ф. Осипов^a, Б. С. Сайлаубеков^{a,б,е},
Е. А. Сокол^a, М. С. Тезекбаева^{a,б}, М. Л. Челноков^a,
В. И. Чепигин^a*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

^е Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

^з Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана

В Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ создан и начал работу на эксперимент универсальный газонаполненный сепаратор GRAND, расположенный на фабрике сверхтяжелых элементов. Сепаратор может использоваться как в экспериментах по α -, β -, γ -спектроскопии изотопов тяжелых и сверхтяжелых элементов, так и в экспериментах по изучению химических свойств сверхтяжелых элементов в качестве пресепаратора. Приведены результаты первых экспериментальных тестов сепаратора GRAND. Показана возможность эффективного проведения экспериментов как на «физическую» детектирующую систему, так и на «химическую» установку.

At the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of JINR, the universal GRAND gas-filled separator located at the Factory of Superheavy Elements was created and began its work on the experiment. The separator can be used both in experiments on α -, β -, γ spectroscopy of the isotopes of heavy and superheavy elements and in experiments on chemical properties of superheavy elements as a “pre-separator”. The results of the first experimental tests of the GRAND separator are presented. The possibility of effective conducting of experiments both on “physical” detection system and on “chemical” installation is shown.

PACS: 23.60.+e; 25.70.Gh; 29.30.-h; 29.40.Gx

¹E-mail: eremin@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

За прошедшее время для исследования поперечных сечений образования и свойств радиоактивного распада изотопов трансурановых элементов использовались различные типы реакций и методы идентификации. В наиболее удачных методиках при синтезе сверхтяжелых элементов использовались экспериментальные установки с кинематическим отделением ядер отдачи от фоновых продуктов, а также корреляционная обработка экспериментальных данных для генетически связанных распадов материнское ядро – дочернее ядро [1]. Последовательные цепочки распадов имплантированных в детектор ядер отдачи (ЯО) приводят в область известных изотопов, что необходимо для достоверной идентификации материнского ядра. В будущем экспериментальная техника как для сепарации ядер отдачи, так и для регистрации различных видов излучений, испускаемых исследуемыми ядрами, может быть улучшена, что даст новые возможности для поиска и изучения новых изотопов и получения новых данных о распадах известных ядер.

В последние годы рентгеновская и γ -спектметрия все более широко применяется в экспериментах по изучению свойств радиоактивного распада трансфермиевых элементов [2]. Вследствие невысокой эффективности регистрации (несколько процентов) и наличия большого набора возможных энергий рентгеновских и γ -квантов, частично перекрывающихся для различных химических элементов, рентгеновские и γ -детекторы могут использоваться только как дополнительные методы идентификации. Гамма-детектирующие системы оказываются чрезвычайно продуктивными в экспериментах по синтезу и изучению свойств радиоактивного распада тяжелых ядер в комбинации с детекторами, регистрирующими α - и β -распад тяжелых ядер, и, будучи расположенными в фокальной плоскости сепаратора ядер отдачи, имеют фоновые загрузки на много порядков меньше, чем в экспериментах без использования сепараторов. Следует отметить, что в экспериментах по α -, β -, γ -спектроскопии изотопов тяжелых элементов необходима приемлемая статистика (от нескольких сотен до нескольких тысяч событий). Поэтому одним из основных направлений в синтезе и исследовании свойств радиоактивного распада изотопов тяжелых и сверхтяжелых элементов (СТЭ) является увеличение интенсивности пучков ускоренных ионов, совершенствование экспериментальных методик (повышение эффективности регистрации и снижение фоновых загрузок) и проведение экспериментальных исследований с использованием самых последних разработок в области детектирующих систем.

Исследование химических свойств трансфермиевых элементов, в том числе сверхтяжелых элементов, также является одной из важнейших задач научных исследований на пучках тяжелых ионов, проводимых в ЛЯР. Эти эксперименты позволяют подтвердить и уточнить результаты физических экспериментов. В современной постановке эксперименты подобного рода требуют использования кинематических сепараторов (пресепараторов) перед «химическими» установками для отделения исследуемых ЯО от мишенеподобных продуктов и продуктов передач. Вопрос необходимой статистики при исследовании химических свойств тяжелых элементов также стоит достаточно остро.

Получение высокоинтенсивных ускоренных пучков ^{48}Ca , ^{50}Ti , ^{54}Cr на фабрике сверхтяжелых элементов ЛЯР ОИЯИ [3, 4], с использованием которых появилась возможность синтезировать с достаточно большой статистикой новые нейтроноизбы-

Таблица 1. Сравнительные параметры газонаполненных сепараторов, использующихся в экспериментах по синтезу и изучению свойств изотопов тяжелых элементов

Установка	Конфигурация	Угол захвата, мср	Угол поворота, °	Максимальное $V\rho$, Гл·м	Дисперсия, мм/% $V\rho$	Длина, м	Литература
DGFRS1	$D_v Q_h Q_v$	10	23	3,1	7,5	4,07	[5]
DGFRS2	$Q_v D_h Q_h Q_v D$	16	(32 + 10)	3,35	32,8	7,41	[6]
BGS	$Q_v D_h D$	45	(25 + 45)	2,5	20,0	4,6	[7]
GARIS1	$D_v Q_h Q_v D$	12,2	(45 + 10)	2,16	9,7	5,76	[8]
GARIS2	$Q_v D_h Q_h Q_v D$	18,5	(30 + 7)	2,43	19,3	5,06	[9]
TASCA	$D Q_h Q_v$	13,3	30	2,4	9,0	3,5	[10]
RITU	$Q_v D Q_h Q_v$	8,5	25	2,2	10,0	4,8	[11]
SHANS	$Q_v D Q_v Q_h$	25	52	2,88	7,3	6,5	[12]
SHANS2	$Q_v D Q_h Q_v D$	25	(30+10)	2,56	20,9	5,97	[13]
AGFA	$Q_v D_h$	44–22 ¹	38	2,5		3,7–4,3 ¹	[14]
GRAND	$Q_v D_h Q_v Q_h D$	16	(32 ± 15)	3,35	32,8	7,95 ² ; 6,84 ³	Настоящая работа

¹ Расстояние от мишени до Q 40 см или 84 см.

² Расстояние от мишени до «физического» фокального детектора.

³ Расстояние от мишени до «химической» стоп-камеры ядер отдачи.

точные ядра, близкие к предсказанной области повышенной стабильности ($Z = 114$, $N = 184$), потребовало дальнейшего развития методов сепарации и идентификации новых нуклидов. Во всем мире получили широкое применение газонаполненные кинематические сепараторы ядер отдачи (табл. 1). Основным преимуществом установок такого рода является возможность использовать пучки ускоренных ионов более высокой интенсивности, чем в случае вакуумных кинематических сепараторов. Этот эффект достигается за счет дополнительного охлаждения вращающейся мишени в рабочем газе сепаратора. Также следует отметить относительно простоту установок (меньшее число ионно-оптических элементов) и меньшие габаритные размеры.

На фабрике СТЭ создан и успешно применяется в экспериментах газонаполненный кинематический сепаратор DGFRS2 [6]. За последние годы с использованием высокоинтенсивных ускоренных пучков ^{48}Ca (до $4 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$) циклотрона ДЦ280 (фабрика СТЭ) и сепаратора DGFRS2 было проведено несколько циклов экспериментов по облучению мишеней ^{238}U , ^{242}Pu , ^{243}Am [15, 16]. Полученные экспериментальные результаты продемонстрировали уникальную возможность набора большой статистики (до 100 событий) распадов изотопов СТЭ за относительно короткое время (порядка 1 мес), что позволяет планировать эксперименты по α -, β -, γ -спектроскопии изотопов и исследованию химических свойств тяжелых и сверхтяжелых элементов.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Успешное применение газонаполненного кинематического сепаратора DGFRS2 на пучках циклотрона ДЦ280 подтолкнуло к идее создания универсального газонаполненного сепаратора с использованием такой же ионно-оптической схемы Q-D-QQ-D (Q — квадрупольная линза, D — дипольный магнит). Схема сепаратора GRAND (Gasfilled Recoil Analyzer and Nuclear Detector) представлена на рис. 1. Для уменьше-

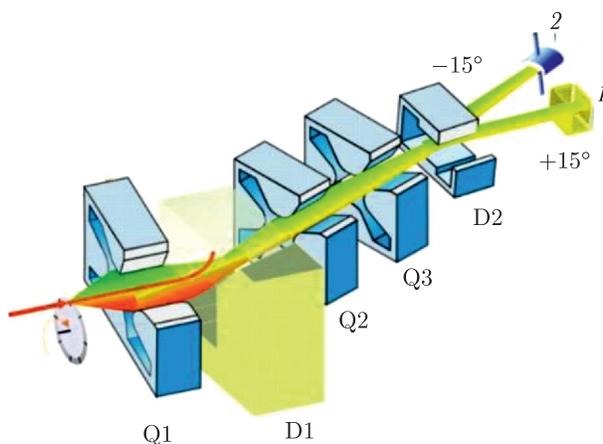


Рис. 1. Схема газонаполненного сепаратора GRAND. 1 — фокальная плоскость, где располагается детектирующая система GABRIELA; 2 — место расположения «химической» газовой ячейки для остановки ЯО

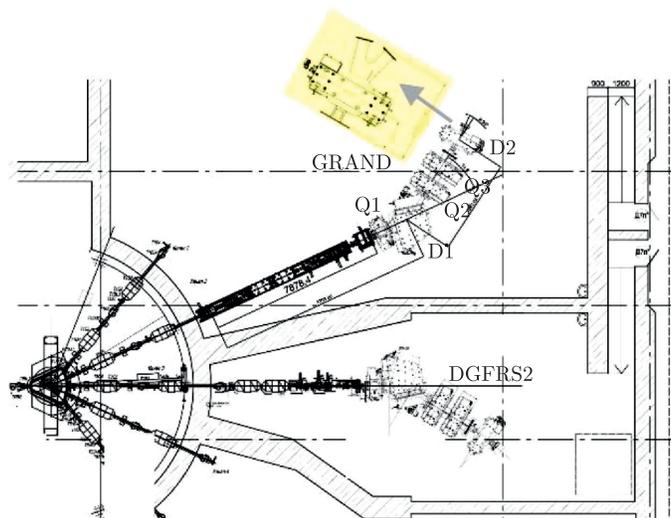


Рис. 2. Схема расположения сепараторов GRAND и DGFRS2 в экспериментальных кабинах комплекса ДЦ280

ния времени разработки и изготовления, а также для уменьшения стоимости физической установки было решено использовать аналогичные ионно-оптические элементы и ту же фирму-изготовителя (SIGMAPHI, Франция), что и для DGFRS2.

Существенным отличием от сепаратора DGFRS2 является возможность отклонения ЯО в дипольном магните D2 на величину $\pm 15^\circ$ (вместо $+10^\circ$ у DGFRS2). В основном дипольном магните D1 ЯО поворачиваются на тот же угол, что и в DGFRS2, но в другую сторону. Это обусловлено расположением физических установок на линиях пучков в экспериментальных кабинах комплекса ДЦ280 (рис. 2).

Таким образом, в фокальной плоскости сепаратора GRAND можно расположить две детектирующие системы (рис. 3):

- 1) «физическую» — детектирующую систему GABRIELA [17, 18] для проведения экспериментов по α -, β -, γ -спектроскопии изотопов трансфермиевых элементов;
- 2) «химическую» — систему для остановки ЯО в газовой ячейке (стоп-камере) и последующей транспортировки исследуемых ЯО газовой струей к детекторам [19].

Детектирующая система GABRIELA представляет собой сложную сборку из полупроводниковых детекторов. Она состоит из кремниевых детекторов, представляющих собой прямоугольный колодец в геометрии, близкой к 4π , дном которого служит фокальный двусторонний кремниевый многостриповый детектор DSSD (Double Sided silicon Strip Detector) большого размера (128×128 стрипов, 100×100 мм). Вокруг кремниевого «колодца» располагается 4 германиевых детектора клеверного типа (clover-детектор) и максимально близко к фокальному DSSD-детектору (сзади) располагается пятый германиевый детектор клеверного типа. На рис. 4 приведен спектр α -частиц, испускаемых при распаде изотопов, синтезируемых в реакции полного слияния $^{22}\text{Ne} + ^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{220}\text{Ra}^*$. Полученное в ходе экспериментов разрешение фокального детектора составило 20–25 кэВ (для одного стрипа) при комнатной температуре детектора.

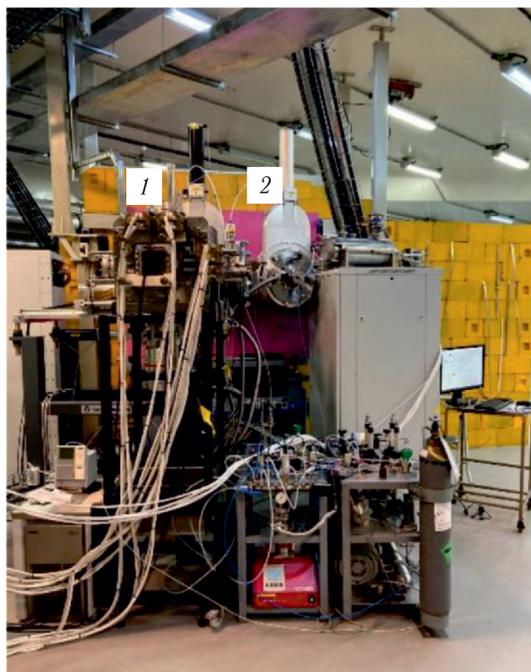


Рис. 3. Детектирующие устройства газонаполненного сепаратора GRAND. 1 — фокальная плоскость, где располагается детектирующая система GABRIELA; 2 — место расположения «химической» газовой ячейки для остановки ЯО

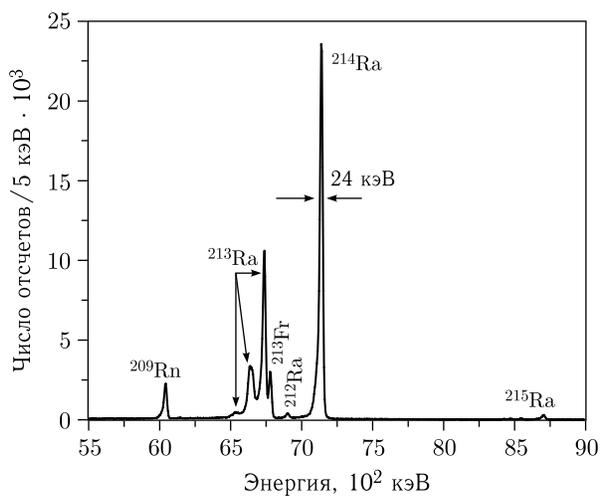


Рис. 4. Спектр α -частиц, испускаемых при распаде изотопов, синтезируемых в реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{170}\text{Er} \rightarrow ^{218}\text{Ra}^*$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Возможность применения сепаратора GRAND в качестве пресепаратора для «химических» экспериментов накладывает достаточно жесткие условия на размер изображения пучка ЯО в фокальной плоскости. Внутренний диаметр газовой ячейки для торможения ЯО (стоп-камеры) составляет 50 мм. В «физической» фокальной плоскости располагается детектирующая система GABRIELA, детектор которой имеет размер 100×100 мм. Из этого следует вывод, что изображение ЯО в фокальных плоскостях сепаратора должно быть симметричным по горизонтали и вертикали и иметь минимальный размер, чтобы максимум ЯО попал в круг диаметром 50 мм. Для выполнения этих требований, после детальных расчетов с использованием методов, описанных в работах [20, 21], для сепаратора GRAND была применена ионно-оптическая схема $Q_v D_h Q_v Q_h D$ (в отличие от DGFRS2, имеющего схему $Q_v D_h Q_h Q_v D$). Изображение «пятна» ЯО ^{214}Ra , синтезируемых в тестовой реакции $^{48}\text{Ca} + ^{170}\text{Er} \rightarrow ^{214}\text{Ra} + 4n$, для различных ионно-оптических конфигураций приведено на рис. 5.

Распределение ЯО ^{214}Ra , синтезируемых в тестовой реакции $^{48}\text{Ca} + ^{170}\text{Er} \rightarrow ^{214}\text{Ra} + 4n$, для ионно-оптической конфигурации $Q_v D_h Q_v Q_h D$ приведено на рис. 6.

Расчетная величина эффективности транспортировки ЯО от мишени до фокального детектора для этой конфигурации составила величину порядка 50%. При этом измерения показали, что в круг диаметром 50 мм (размер входного окна стоп-камеры в «химических» экспериментах) попадает примерно 60% ЯО от общего числа попавших в детектор.

Транспортный газ в «химических» экспериментах представляет собой смесь He и Ar (в пропорции 70/30% или 60/40%). Поэтому для уменьшения вероятности «отравления» (изменения состава газа, влекущего за собой изменение ионного зарядового состояния ЯО) в качестве газа, наполняющего сепаратор, был выбран He. Рабочее давление газа в сепараторе составляет величину 0,5–1,5 Торр. В тестовой реакции $^{174}\text{Yb} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{217}\text{Th} + 5n$ была измерена зависимость счета α -частиц ^{217}Th ($E_\alpha = 9261$ кэВ) в фокальном детекторе от давления He в объеме сепара-

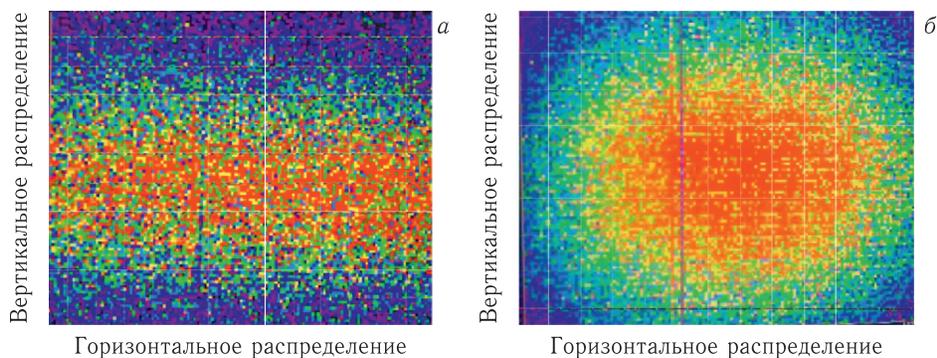


Рис. 5. Изображение «пятна» ЯО ^{214}Ra в фокальной плоскости сепаратора GRAND. Детектор размера 128×128 стрипов, 100×100 мм. а) Ионно-оптическая схема $Q_v D_h Q_v Q_h D$; б) ионно-оптическая схема $Q_v D_h Q_h Q_v D$

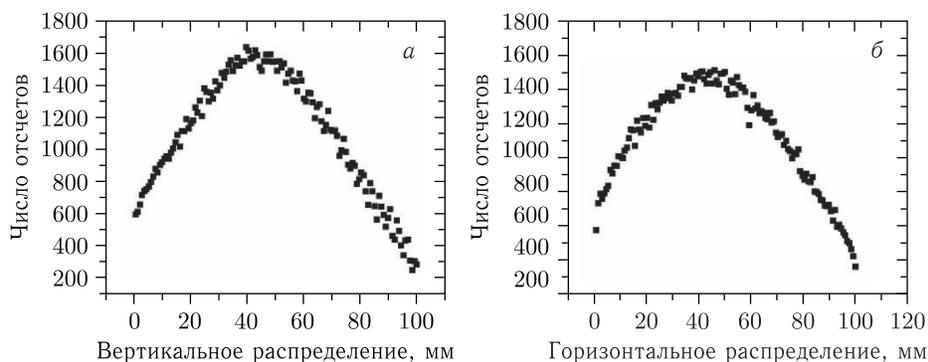


Рис. 6. Распределение ЯО ^{214}Ra в фокальной плоскости сепаратора GRAND. Детектор размером 128×128 стрипов, 100×100 мм

тора (рис. 7). На основании измерений было выбрано рабочее давление гелия в сепараторе — 0,7 Торр.

Как уже упоминалось выше, в основном параметры ионно-оптических элементов аналогичны параметрам сепаратора DGFRS2 (см. табл. 2 и 3 в [6]). Вакуумный объем ионопровода (10^{-7} Торр) отделяется от объема сепаратора системой дифференциальной откачки, которая включает в себя насос Рутца, три турбомолекулярных насоса, набор коллиматоров и диафрагм переменного диаметра. Мишенный модуль аналогичен модулю DGFRS2 и обеспечивает полную взаимозаменяемость мишенных дисков.

В 2022 г. на ускорителе ДЦ280 ЛЯР ОИЯИ были проведены тестовые эксперименты с использованием сепаратора GRAND по контролю работы всех систем сепаратора, определению эффективности транспортировки ядер отдачи и размера изображения ЯО в фокальной плоскости.

В качестве тестовых, кроме реакций полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{170}\text{Er} \rightarrow ^{218}\text{Ra}^*$, $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb} \rightarrow ^{222}\text{Th}^*$, также использовались реакции $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{256}\text{No}^*$ и $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{290}\text{Fl}^*$. Вращающиеся мишени ^{208}PbS (толщина 0,46 мг/см²,

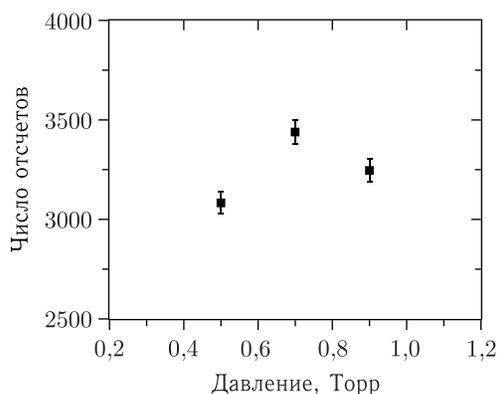


Рис. 7. Зависимость счета α -частиц ^{217}Th от давления He в объеме сепаратора

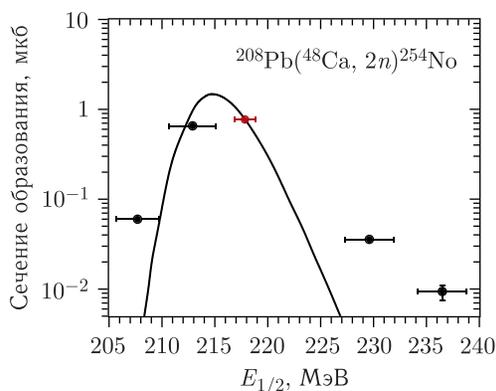


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Расчетная (сплошная линия) функция возбуждения для реакции $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{254}\text{No} + 2n$ [22]. Черные символы — экспериментальные точки из работы [22]; красный символ — настоящая работа

изготовлена методом химического осаждения) и ^{242}Pu (толщина 0,73 мг/см², изготовлена методом электроосаждения) имели диаметр 240 мм. Толщина Ti-подложки составляла 1,5 мкм.

В экспериментах использовался двусторонний многостриповый кремниевый детектор размером 100 × 100 мм, 128 × 128 стрипов [17, 18]. Реакция $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{256}\text{No}^*$ использовалась для определения эффективности транспортировки тяжелых ЯО сепаратором GRAND. Энергия ионов ^{48}Ca , выведенных из ускорителя ДЦ280, составляла $E_{\text{lab}} = (229 \pm 1)$ МэВ. Измерение энергии осуществлялось с помощью «pick up» электродов (пролетная база 3 м). Из сравнения с экспериментальными данными (рис. 8), взятыми из работы [22], было определено значение сечения образования при энергии пучка в середине мишени 218 МэВ $\sigma = 0,77$ мкб, получена величина эффективности транспортировки ЯО ^{254}No — 54%.

В рамках подготовки к экспериментам по определению химических свойств элемента Fl на сепараторе GRAND исследовалась реакция полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{290}\text{Fl}^*$. В каналах с испарением 4 и 3 нейтронов образовывались изотопы $^{286,287}\text{Fl}$, имеющие периоды полураспада 105^{+17}_{-13} и 360^{+45}_{-36} мс [15] соответственно. В экспериментах по определению химических свойств сверхтяжелых элементов существенное значение имеют периоды полураспада исследуемых изотопов, так как время переноса изучаемых ядер от фокальной плоскости сепаратора до «химического» детектора составляет величину порядка 1 с. Полученные в результате тестового эксперимента результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты эксперимента $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{290}\text{Fl}^*$ на сепараторе GRAND

E_{lab} , МэВ	$E_{1/2}$, МэВ	E^* , МэВ	$N(3n)$	$N(4n)$	Интегральный поток	$\sigma(3n)$, пб	$\sigma(4n)$, пб
252	240,4	38,4	9	2	$4,82 \cdot 10^{18}$	$8,5^{+3,6}_{-2,7}$	$0,85^{+1,0}_{-0,6}$
256	243	40,6	3	2	$2,35 \cdot 10^{18}$	$5,2^{+4,8}_{-3,0}$	$1,7^{+2,1}_{-1,2}$

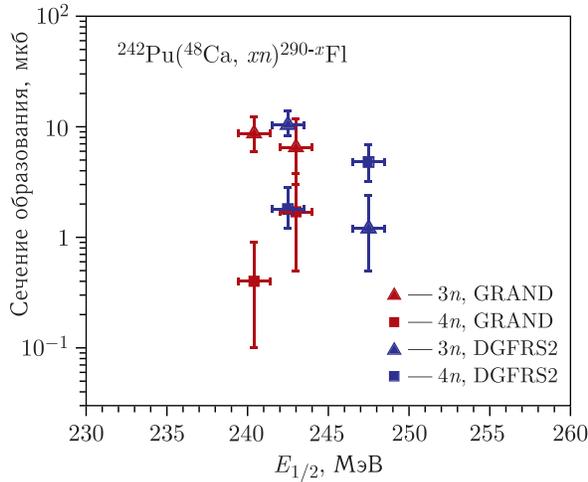


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Сравнение полученных ранее данных [15] для сечений образования изотопов $^{286,287}\text{F1}$ (синие квадраты — $4n$ -канал, синие треугольники — $3n$ -канал) и измеренных на сепараторе GRAND сечений образования для этих изотопов $^{286,287}\text{F1}$ (красные квадраты — $4n$ -канал, красные треугольники — $3n$ -канал) в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{290}\text{F1}^*$

При расчете сечений образования изотопов $^{286,287}\text{F1}$, синтезируемых в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{290}\text{F1}^*$, величина эффективности транспортировки ЯО принималась за 54%, учитывалось процентное соотношение вилок для α -распада и спонтанного деления. На рис. 9 приведено сравнение полученных на сепараторе GRAND экспериментальных результатов с данными, полученными в ЛЯР ранее на сепараторе DGFRS2 [15].

Как видно из рис. 9, данные, полученные на сепараторе GRAND, находятся в хорошем согласии с данными, полученными в ЛЯР ранее [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первые тестовые эксперименты с использованием сепаратора GRAND и пучка ускоренных частиц ^{48}Ca показали, что параметры сепаратора в полной мере соответствуют проектным.

Обеспечиваемая сепаратором эффективность трансмиссии ЯО позволяет набирать достаточную статистику за относительно короткое время, что позволит приступить к изучению структуры ядер как вблизи подболочки $N = 162$, так и более тяжелых ядер. Эти данные представляют исключительный интерес для оценок структуры изотопов сверхтяжелых элементов.

Следует отметить, что создание современных многопараметрических детектирующих систем в фокальной плоскости сепаратора в настоящее время позволяет проводить детальное изучение свойств радиоактивного распада ядер, имеющих сечения образования несколько пикобарн, с использованием методов спектрометрии нейтронов, α -частиц, γ -квантов и электронов.

В планах экспериментов с использованием сепаратора GRAND и детектирующей системы GABRIELA стоит продолжение исследований К-изомерных состояний четно-

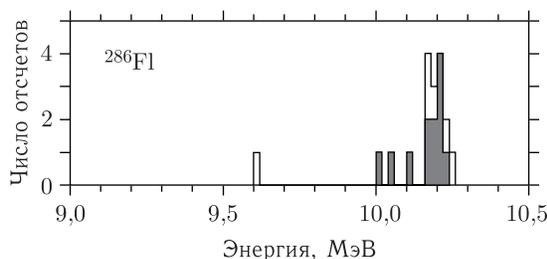


Рис. 10. Спектр α -частиц, испускаемых при распаде изотопа ^{286}Fl , образующегося в реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{286}\text{Fl} + 4n$ (см. рис. 2 в работе [15])

четных изотопов No, Rf и Sg, для которых можно набрать приемлемую статистику при длительности экспериментов не более 1 мес. При длительности эксперимента порядка 1 мес будет набираться достаточная статистика для использования ЯО-гамма и ЯО-электрон совпадений для изучения схем уровней изотопов элементов 102–106.

В работе [15] детально описан эксперимент по синтезу изотопов $^{286,287}\text{Fl}$ в реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{290}\text{Fl}^*$. В частности, впервые зарегистрированы три α -распада с энергиями $E_\alpha = (10,003 \pm 0,036)$, $(10,050 \pm 0,027)$ и $(10,109 \pm \pm 0,016)$ МэВ (рис. 10), которые отличаются, с учетом неопределенностей в измерении энергий, от основной линии 10,19 МэВ. В работе высказывается предположение, что это могут быть распады из основного 0^+ -состояния ^{286}Fl в первое ротационное 2^+ -состояние дочернего изотопа ^{282}Cn . Принимая во внимание, что сечение образования изотопа ^{286}Fl в максимуме функции возбуждения составляет величину порядка 5 пб, средняя интенсивность ускоренного пучка ^{48}Ca , выводимого из циклотрона ДЦ280, $1,5 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$, в сутки можно ожидать регистрацию 2–3 распадов исследуемого изотопа.

Полученные экспериментальные результаты демонстрируют возможность набора большой статистики (до 100 событий) распадов изотопа ^{286}Fl за относительно короткое время, что позволяет планировать эксперименты по α -, β -, γ -спектроскопии изотопов и исследованию химических свойств тяжелых и сверхтяжелых элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yeremin A. V., Popoko A. G.* Separation and Identification of the Products of Complete-Fusion Reactions: Further Development of Methods (Determination of Heavy-Nuclei Mass) // Phys. Part. Nucl. 2004. V. 35, No. 4. P. 480–497.
2. *Ackermann D., Theisen Ch.* Nuclear Structure Features of Very Heavy and Superheavy Nuclei — Tracing Quantum Mechanics towards the “Island of Stability” // Phys. Scripta. 2017. V. 92. P. 083002.
3. *Dmitriev S., Itkis M., Oganessian Yu.* Status and Perspectives of the Dubna Superheavy Element Factory // Eur. Phys. J. Web Conf. 2016. V. 131. P. 08001.
4. *Gulbekian G. G., Dmitriev S. N., Itkis M. G., Oganessyan Yu. Ts., Gikal B. N., Kalagin I. V., Semin V. A., Bogomolov S. L., Buzmakov V. A., Ivanenko I. A., Kazarinov N. Yu., Osipov N. F., Pashenko S. V., Sokolov V. A., Pchelkin N. N., Prokhorov S. V., Khabarov M. V., Gikal K. B.* // Start-Up of the DC-280 Cyclotron, the Basic Facility of the Factory of

- Superheavy Elements of the Laboratory of Nuclear Reactions at the Joint Institute for Nuclear Research // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2019. V. 16, No. 6. P. 866–875.
5. *Subotic K., Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Lobanov Yu. V., Abdullin F. Sh., Polyakov A. N., Tsyganov Yu. S., Ivanov O. V.* Evaporation Residue Collection Efficiencies and Position Spectra of the Dubna Gas-Filled Recoil Separator // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2002. V. 481. P. 71–80.
 6. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Popeko A. G., Solovyev D. I., Abdullin F. Sh., Dmitriev S. N., Ibadullayev D., Itkis M. G., Kovrizhnykh N. D., Kuznetsov D. A., Petrushkin O. V., Podshibiakin A. V., Polyakov A. N., Sagaidak R. N., Schlattauer L., Shirokovsky I. V., Shubin V. D., Shumeiko M. V., Tsyganov Yu. S., Voinov A. A., Subbotin V. G., Bekhterev V. V., Belykh N. A., Chernyshev O. A., Gikal K. B., Ivanov G. N., Khalkin A. V., Konstantinov V. V., Osipov N. F., Paschenko S. V., Protasov A. A., Semin V. A., Sorokoumov V. V., Sychev K. P., Verevochkin V. A., Yakovlev B. I., Antoine S., Beeckman W., Jehanno P., Yavor M. I., Shcherbakov A. P., Rykaczewski K. P., King T. T., Roberto J. B., Brewer N. T., Grzywacz R. K., Gan Z. G., Zhang Z. Y., Huang M. H., Yang H. B.* DGFRS 2 — A Gas-Filled Recoil Separator for the Dubna Super Heavy Element Factory // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2022. V. 1033. P. 166640.
 7. *Ninov V., Gregorich K. E., McGrath C. A.* The Berkeley Gas-Filled Separator // *AIP Conf. Proc.* 1998. V. 455, No. 1. P. 704–707.
 8. *Kaji D., Morita K., Morimoto K., Zhao Y. L., Yoneda A., Suda T., Yoshida A., Kudo H., Katori K., Tanihata I.* Status of Heavy Element Synthesis in RIKEN // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2003. V. 255, No. 1. P. 77–80.
 9. *Kaji D., Morimoto K., Sato N., Yoneda A., Morita K.* Gas-Filled Recoil Ion Separator GARIS-II // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2013. V. 317. P. 311–314.
 10. *Semchenkov A., Brüchle W., Jäger E., Schimpf E., Schädel M., Mühle C., Klos F., Türler A., Yakushev A., Belov A., Belyakova T., Kaparkova M., Kukhtin V., Lamzin E., Sytchevsky S.* The TransActinide Separator and Chemistry Apparatus (TASCA) at GSI — Optimization of Ion-Optical Structures and Magnet Designs // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2008. V. 266, No. 19–20. P. 4153–4161.
 11. *Sare'n J., Uusitalo J., Leino M., Sorri J.* Absolute Transmission and Separation Properties of the Gas-Filled Recoil Separator RITU // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 654. P. 508–521.
 12. *Zhang Z. Y., Ma L., Gan Z. G., Huang M. H., Huang T. H., Li G. S., Wu X. L., Jia G. B., Yu L., Yang H. B., Sun Z. Y., Zhou X. H., Xu H. S., Zhan W. L.* A Gas-Filled Recoil Separator, SHANS // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2013. V. 317. P. 315–318.
 13. *Sheng L. N., Hu Q., Jia H., Zhang Z. Y., Chai Z., Zhao B., Zhang Y., Gan Z. G., He Y., Yang J. C.* Ion-Optical Design and Multiparticle Tracking in 3D Magnetic Field of the Gas-Filled Recoil Separator SHANS2 at CAFE2 // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2021. V. 1004. P. 165348.
 14. *Back B. B.* The AGFA and AIRIS Separators at ATLAS // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2017. V. 163. P. 00003.
 15. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Ibadullayev D., Abdullin F. Sh., Dmitriev S. N., Itkis M. G., Karpov A. V., Kovrizhnykh N. D., Kuznetsov D. A., Petrushkin O. V., Podshibiakin A. V., Polyakov A. N., Popeko A. G., Sagaidak R. N., Schlattauer L., Shubin V. D., Shumeiko M. V., Solovyev D. I., Tsyganov Yu. S., Voinov A. A., Subbotin V. G., Bodrov A. Yu., Sabel'nikov A. V., Lindner A., Rykaczewski K. P., King T. T., Roberto J. B., Brewer N. T., Grzywacz R. K., Gan Z. G., Zhang Z. Y., Huang M. H., Yang H. B.* Investigation of ^{48}Ca -Induced Reactions with ^{242}Pu and ^{238}U Targets at the JINR Superheavy Element Factory // *Phys. Rev. C.* 2022. V. 106. P. 024612.
 16. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Kovrizhnykh N. D., Abdullin F. Sh., Dmitriev S. N., Ibadullayev D., Itkis M. G., Kuznetsov D. A., Petrushkin O. V., Podshibiakin A. V., Poly-*

- kov A. N., Popeko A. G., Sagaidak R. N., Schlattauer L., Shirokovski I. V., Shubin V. D., Shumeiko M. V., Solovyeu D. I., Tsyganov Yu. S., Voinov A. A., Subbotin V. G., Bodrov A. Yu., Sabel'nikov A. V., Khalkin A. V., Zlokazov V. B., Rykaczewski K. P., King T. T., Roberto J. B., Brewer N. T., Grzywacz R. K., Gan Z. G., Zhang Z. Y., Huang M. H., Yang H. B.* First Experiment at the Super Heavy Element Factory: High Cross Section of ^{288}Mc in the $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ Reaction and Identification of the New Isotope ^{264}Lr // *Phys. Rev. C.* 2022. V. 106. P. L031301.
17. *Hauschild K., Yeremin A. V., Dorvaux O., Lopez-Martens A., Belozеров A. V., Briançon Ch., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Garcia-Santamaria S. A., Gorshkov V. A., Hanappe F., Kabachenko A. P., Korichi A., Malyshev O. N., Oganessian Yu. Ts., Popeko A. G., Rowley N., Shutov A. V., Stuttge' L., Svirikhin A. I.* GABRIELA: A New Detector Array for γ -Ray and Conversion Electron Spectroscopy of Transfermium Elements // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2006. V. 560. P. 388–394.
18. *Lopez-Martens A., Hauschild K.* Spectroscopy of Super Heavy Elements with GABRIELA // *Eur. Phys. J. A.* 2022. V. 58. P. 134.
19. *Dmitriev S. N., Aksenov N. V., Albin Y. V., Bozhikov G. A., Chelnokov M. L., Chepygin V. I., Eichler R., Isaev A. V., Katrasev D. E., Lebedev V. Ya., Malyshev O. N., Petrushkin O. V., Porobanuk L. S., Ryabinin M. A., Sabel'nikov A. V., Sokol E. A., Svirikhin A. V., Starodub G. Ya., Usoltsev I., Vostokin G. K., Yeremin A. V.* Pioneering Experiments on the Chemical Properties of Element 113 // *Mendeleev Commun.* 2014. V. 24. P. 253–256.
20. *Popeko A. G., Malyshev O. N., Sagaidak R. N., Yeremin A. V.* Monte Carlo Simulation of Ion Trajectories in the Kinematic Recoil Separator VASSILISSA // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1997. V. 126, No. 1–4. P. 294–296.
21. *Popeko A. G., Malyshev O. N., Yeremin A. V., Hofmann S.* Monte-Carlo Optimization of the Transmission of Recoil Separators // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1999. V. 427, No. 1–2. P. 166–169.
22. *Belozеров A. V., Chelnokov M. L., Chepigin V. I., Drobina T. P., Gorshkov V. A., Kabachenko A. P., Malyshev O. N., Merkin I. M., Oganessian Yu. Ts., Popeko A. G., Sagaidak R. N., Svirikhin A. I., Yeremin A. V., Berek G., Brida I., Saro S.* Spontaneous-Fission Decay Properties and Production Cross-Sections for the Neutron-Deficient Nobelium Isotopes Formed in the $^{44,48}\text{Ca} + ^{204,206,208}\text{Pb}$ Reactions // *Eur. Phys. J. A.* 2003. V. 16, No. 4. P. 447.

Получено 7 декабря 2023 г.