

УДК 539.163:539.172

## ДЕТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА ИЗОТОПОВ No, Rf И Db

© 2020 г. А. А. Кузнецова<sup>1, \*</sup>, А. В. Ерёмин<sup>1, 2</sup>, А. Лопез-Мартенс<sup>3</sup>, К. Хошильд<sup>3</sup>, А. Г. Попеко<sup>1, 2</sup>,  
О. Н. Мальшев<sup>1, 2</sup>, В. И. Чепигин<sup>1</sup>, А. И. Свирихин<sup>1, 2</sup>, А. В. Исаев<sup>1</sup>, Ю. А. Попов<sup>1, 2</sup>,  
М. Л. Челноков<sup>1</sup>, О. Дорво<sup>4</sup>, Б. Галл<sup>4</sup>, М. С. Тезекбаева<sup>1, 5</sup>

<sup>1</sup>Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области  
“Университет “Дубна”, Дубна, Россия

<sup>3</sup>Центр ядерных наук и материаловедения, Национальный институт ядерной физики и физики частиц,  
Национальный центр научных исследований и Университет Париж-юг  
в ассоциации Университета Париж-Сакле, Орсе, Франция

<sup>4</sup>Многопрофильный институт Юбера Кюрьена, Национальный центр научных исследований  
и Университет Страсбурга, Страсбург, Франция

<sup>5</sup>Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

\*E-mail: aakuznetsova@jinr.ru

Поступила в редакцию 02.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

Исследованы свойства радиоактивного распада изотопов No, Rf, в реакции  $^{50}\text{Ti} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{259}\text{Db}^*$  измерены сечения образования изотопов Db и Rf, образующихся в  $xn$  и  $pxn$  каналах, соответственно. В экспериментах использовались высокоинтенсивные пучки ускоренных тяжелых ионов  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{50}\text{Ti}$  и  $^{54}\text{Cr}$  циклотрона У400 и кинематический сепаратор SHELS.

DOI: 10.31857/S0367676520080220

### ВВЕДЕНИЕ

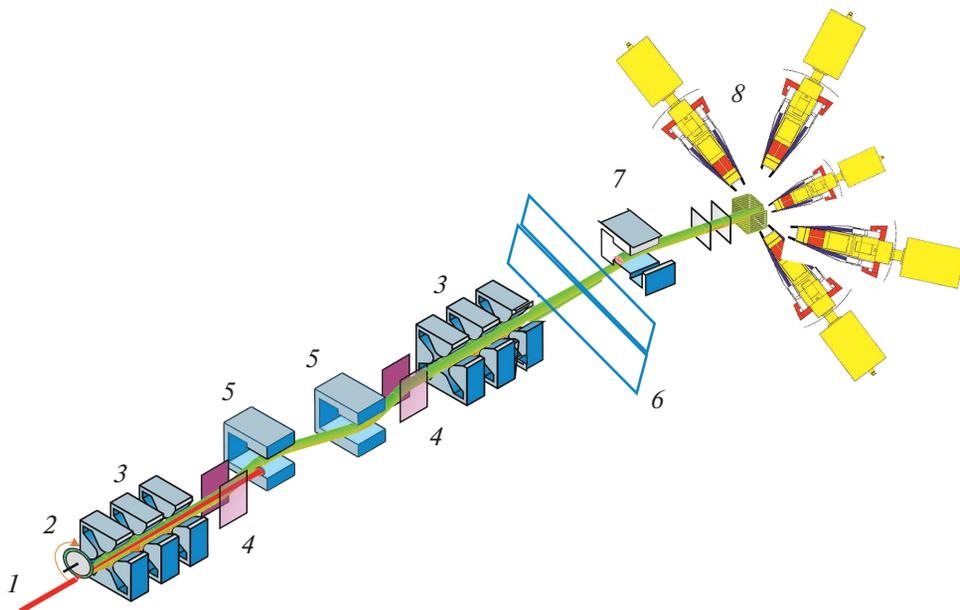
В последние годы рентгеновская и гамма-спектрометрия, так же как регистрация конверсионных электронов, все более широко применяются в экспериментах по изучению свойств радиоактивного распада изотопов трансфермиевых элементов. Гамма-детектирующие системы оказываются чрезвычайно продуктивными в экспериментах по синтезу и изучению свойств радиоактивного распада тяжелых ядер в комбинации с детекторами, регистрирующими альфа- и бета-распад тяжелых ядер, и, будучи расположены в фокальной плоскости сепаратора ядер отдачи, имеют фоновые загрузки на много порядков меньше, чем в экспериментах без использования сепараторов.

В Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова ОИЯИ кинематический сепаратор ядер отдачи SHELS (Separator for Heavy Element Spectroscopy) [1, 2] используется для исследования сечений образования и свойств радиоактивного распада ядер-остатков испарения (ЯО), синтезируемых в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами, ускоренными на циклотроне У400

ЛЯР ОИЯИ. В результате экспериментов, проведенных с использованием сепаратора, был синтезирован ряд новых изотопов трансактинидных элементов, детально измерены свойства радиоактивного распада ряда изотопов трансфермиевых элементов. В ходе экспериментальной работы был набран большой объем данных относительно поперечных сечений формирования ЯО, синтезируемых в асимметричных реакциях [3, 4].

Для сепаратора была создана комбинированная детектирующая установка GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the Electromagnetic Analyzer), состоящая из 7 Ge-детекторов для регистрации рентгеновских и гамма-квантов, испускаемых исследуемыми ядрами, а также сборки из мультитриповых кремниевых детекторов, обеспечивающих регистрацию осколков спонтанного деления, альфа- и бета-излучений в геометрии, близкой к  $4\pi$  [5, 6].

В экспериментах исследовались свойства распада и структура ядер изотопов No, Lr, Rf и Db, синтезируемых в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{204, 206, 207, 208}\text{Pb} \rightarrow ^{252, 254, 255, 256}\text{No}^*$ ,  $^{48}\text{Ca} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{257}\text{Lr}^*$ ,  $^{50}\text{Ti} +$



**Рис. 1.** Схема сепаратора SHELS: 1 – пучок ускоренных ионов, 2 – вращающаяся мишень, 3 – триплеты квадрупольных линз, 4 – электростатические дефлекторы, 5 – дипольные магниты, 6 – бетонная стена толщиной 2 метра, 7 – дополнительный 8-градусный дипольный магнит, 8 – детектирующая система сепаратора.

+  $^{206,208}\text{Pb} \rightarrow ^{256,258}\text{Rf}^*$ ,  $^{50}\text{Ti} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{259}\text{Db}^*$ , а также их дочерних ядер [7, 8].

Особый интерес для спектроскопических исследований представляют нейтроноизбыточные изотопы элементов в области No–Sg, где существует переход от нейтронной подоболочки  $N = 152$  к подоболочке с  $N = 162$ , а сечения образования этих изотопов достаточно велики. В этом случае необходимо использовать асимметричные комбинации налетающей ион–ядро мишени, такие как:  $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{260}\text{No}^*$ ,  $^{22}\text{Ne} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{264}\text{Rf}^*$ ,  $^{22}\text{Ne} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{270}\text{Sg}^*$ . Подготовке к проведению подобных экспериментов была посвящена значительная часть экспериментальной программы.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

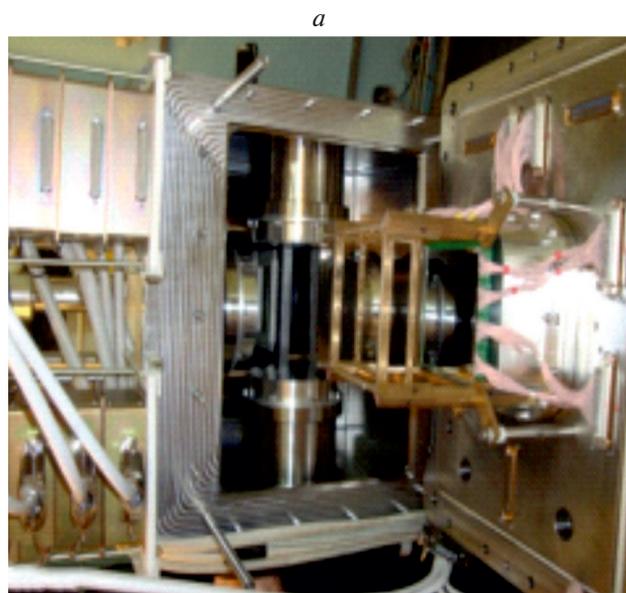
Схема сепаратора SHELS представлена на рис. 1. Вращающаяся мишень облучается пучком ускоренных тяжелых ионов. Триплеты квадрупольных линз предназначены для фокусировки ядер отдачи, пролетающих через сепаратор. Сепарирующая часть (так называемый, фильтр скоростей) состоит из комбинации электростатических и магнитных полей (электростатических дефлекторов и дипольных магнитов). Детектирующая система сепаратора отделена от экспериментального зала, в котором находится пучок ускоренных ионов, двухметровой бетонной стеной. Перед детекторами располагается 8-градусный дипольный магнит,

служащий для дополнительной очистки от пучка рассеянных ионов.

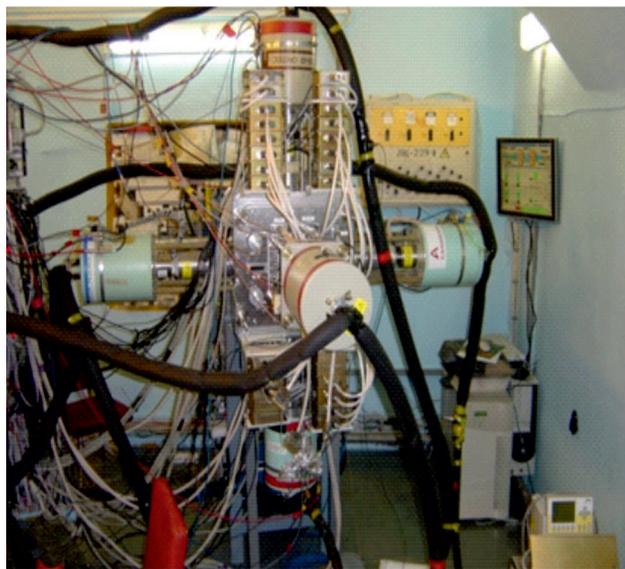
Детальное описание сепаратора, тестовых экспериментов и полученных результатов, позволивших оптимизировать эффективность транспортировки ядер отдачи, приведено в [1, 2].

Важным моментом является совершенствование детектирующей системы GABRIELA с целью увеличения эффективности детектирования  $\gamma$ -квантов и конверсионных электронов, испускаемых исследуемыми ядрами [5, 6]. Повышение эффективности детектирования  $\gamma$ -квантов в три раза позволяет повысить вероятность определения  $\alpha$ - $\gamma$ -корреляций и, соответственно, изучать структуру уровней и наличие изомерных состояний для изотопов более тяжелых элементов, имеющих сечения образования в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами вплоть до нескольких пикобарн.

В 2015 г. детектирующая система GABRIELA была модернизирована (новая детектирующая камера, фокальный детектор размером  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ , один германиевый детектор клеверного типа (Clover), который размещен максимально близко к фокальному детектору, и 4 германиевых однокристалльных детектора по бокам детекторной камеры (рис. 2)). В результате получены рекордные значения эффективности детектирования гамма квантов (до 34% в энергетическом диапазоне 100–300 кэВ). С использованием пучков тяжелых ионов  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{50}\text{Ti}$  проводились тестовые



а

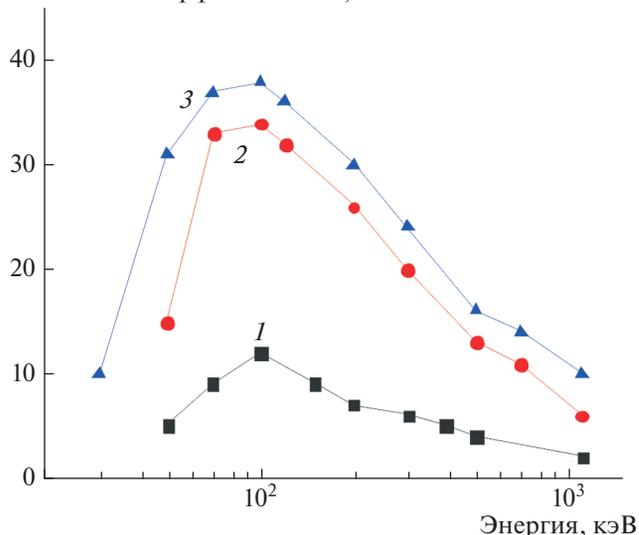


б

**Рис. 2.** Детектирующая система GABRIELA: *а* – держатель с новыми фокальным и боковыми детекторами, расположенный на заднем фланце новой детекторной камеры; *б* – вид новой детекторной камеры, германиевые  $\gamma$ -детекторы окружают DSSD (Double Sided Strip Detector) ( $10 \times 10 \text{ см}^2$ ), с обратной стороны камеры располагается германиевый детектор клеверного типа.

испытания нового фокального кремниевого детектора и электронной спектрометрической аппаратуры. С обратной стороны детектора с каждого стрипа сигналы снимались с использованием трех разных предусилителей, что позволило с хорошей чувствительностью регистрировать сигналы от низкоэнергетичных конверсионных электронов (0–2 МэВ),  $\alpha$ -частиц (0–20 МэВ) и осколков спонтанного деления (0–200 МэВ).

Абсолютная эффективность, %



**Рис. 3.** Эффективность регистрации одиночных  $\gamma$ -квантов в зависимости от энергии для различных конфигураций  $\gamma$ -детекторов, рассчитанная по программе GEANT4 [9]: 1 – первоначальная конфигурация с 7-ю германиевыми однокристалльными детекторами (2004 г.); 2 – конфигурация с одним детектором клеверного типа вблизи фокального детектора и 4-мя германиевыми однокристалльными детекторами по бокам (используемая после 2015 г.); 3 – планируемая модернизация детектирующей системы с 5-ю детекторами клеверного типа.

Циклотрон У400 способен ускорять пучки тяжелых ионов с интенсивностью до  $0.5\text{--}1.5 \text{ мкА} \cdot \text{частиц}$ . Благодаря сложной ионно-оптической конфигурации эффективность транспортировки ядер отдачи через установку SHELS варьируется, в зависимости от масс-асимметрии реакции, от 5% (реакции с  $^{22}\text{Ne}$ ) до 45% (реакции с  $^{54}\text{Cr}$ ).

С целью повышения эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов (определяющая величина при использовании метода  $\alpha$ - $\gamma$ -корреляций) планируется дальнейшее совершенствование детектирующей системы GABRIELA. В ее состав будет входить 5 детекторов клеверного типа. Расчеты показывают (см. рис. 3), что в такой конфигурации в зависимости от энергии эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов модернизированной системой GABRIELA будет составлять от 40% (100 кэВ) до 15–20% (более 500 кэВ).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В 2016–2019 гг. на ускорителе У400 ЛЯР ОИЯИ проводились эксперименты по детальному изучению свойств радиоактивного распада ядер No, Rf и Db, образующихся в реакциях полного слияния ускоренных ионов  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{50}\text{Ti}$  с ядрами мишеней  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  и  $^{209}\text{Bi}$ .

**Таблица 1.** Статистика по  $\alpha$ – $\alpha$  (материнское–дочернее ядро) и ядро отдачи – быстрое деление корреляциям

Энергия пучка, МэВ	Интегральный поток ионов	$^{256}\text{Db}$ – $^{252}\text{Lr}$ (3n)	$^{257}\text{Db}$ – $^{253}\text{Lr}$ (2n)	$^{258}\text{Db}$ – $^{254}\text{Lr}$ (1n)	Быстрое деление (Ге/бок. дет.)	$T_{1/2}$ мс	$\sigma$ , пб $p0n$ канал
255	$6.8 \cdot 10^{17}$	0	142	5	0		Менее 6.6
265	$2.1 \cdot 10^{18}$	28	18	2	3 (2/1)	$12_{-4}^{+16}$	$5.7_{-3}^{+17}$
275	$7.1 \cdot 10^{17}$	1	2	0	0		Менее 4.9

В экспериментах на сепараторе SHELS при исследовании реакции полного слияния  $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{258}\text{Rf}^*$  были уточнены свойства распада изотопа  $^{256}\text{Rf}$  [7]. Было зарегистрировано 9 событий типа ЯО– $\alpha$ – $\alpha$ -корреляций и определен период полураспада полученных коррелированных событий  $T_{1/2} = 5.7 \pm 1.2$  мс. Также был проведен корреляционный анализ ЯО–осколок спонтанного деления. Всего было найдено 6270 таких событий в совпадении с  $\gamma$ -квантами. Период полураспада для спонтанного деления  $^{256}\text{Rf}$  составил  $6.9 \pm 0.23$  мс. Для изотопа  $^{256}\text{Rf}$  вероятность  $\alpha$ -распада составляет  $0.29_{-0.1}^{+0.13}\%$ . В работе [10] для изотопа  $^{256}\text{Rf}$  приведена вероятность  $\alpha$ -распада  $0.32 \pm 0.17\%$  (3 события  $\alpha$  распада), период полураспада для спонтанного деления  $^{256}\text{Rf}$  составил  $6.2 \pm 0.2$  мс (около 1900 событий спонтанного деления).

Целью эксперимента с реакцией  $^{50}\text{Ti} + ^{209}\text{Bi}$  [7, 8] было изучение характеристик радиоактивного распада изотопов дубния и поиск редких каналов реакций с испусканием протона и нескольких нейтронов – так называемых *pnn* каналов. Эксперимент проводился при различных энергиях пучка 255, 265 и 275 МэВ, данные приведены в табл. 1.

В экспериментах использовались мишени, которые изготавливались путем напыления металлического Bi (слоем  $0.4$ – $0.5$  мг  $\cdot$  см $^{-2}$ ) на Al подложку толщиной 3 мкм. Для исключения реакций ускоренных ионов  $^{50}\text{Ti}$  с возможными примесями  $^{208}\text{Pb}$  в веществе мишеней в экспериментах использовался очищенный висмут  $^{209}\text{Bi}$  (содержание примесей Pb менее  $10^{-6}\%$ ). Для снижения тепловой нагрузки мишени в форме сегментов устанавливались на вращающийся диск в мишенном блоке сепаратора SHELS. Эффективность транспортировки ядер отдачи (ЯО) от мишени до фокальной плоскости сепаратора составляла величину 30–40% в зависимости от настроек ионно-оптической системы сепаратора. В фокальной плоскости сепаратора располагалась комбинированная детектирующая система GABRIELA, позволяющая регистрировать альфа частицы, гамма кванты, бета частицы и осколки спонтанного деления, испускаемые исследуемыми ядрами.

Путем поиска корреляций материнское ядро (ЯО)–альфа распад ( $\alpha$ ) были найдены следующие цепочки:  $^{256}\text{Db}$ – $^{252}\text{Lr}$ ,  $^{257}\text{Db}$ – $^{253}\text{Lr}$ ,  $^{258}\text{Db}$ – $^{254}\text{Lr}$  в испарительных каналах 1n, 2n, 3n. Событий соответствующих 4n-каналу  $^{255}\text{Db}$ – $^{251}\text{Lr}$  обнаружено не было. Изотопы  $^{256}$ – $^{258}\text{Db}$ , в основном испытывающие альфа-распад, имеют периоды полураспада около одной секунды [11]. Изотопы  $^{256}$ ,  $^{258}\text{Rf}$ , образующиеся в  $p2n$  и  $p0n$  каналах реакции, в основном испытывают спонтанное деление (SF) и имеют очень короткие периоды полураспада. Для изотопа  $^{256}\text{Rf}$  измеренный период полураспада составляет величину  $6.2 \pm 0.2$  мс [10] и  $5.75 \pm 0.17$  мс [12], для изотопа  $^{258}\text{Rf}$  эта величина составляет  $13.0 \pm 3$  мс [13] и  $14.7_{-1.0}^{+1.2}$  мс [14], соответственно. В случае, если эти изотопы образуются в результате электронного захвата (ЕС) ядрами изотопов  $^{256}$ ,  $^{258}\text{Db}$ , то время корреляции ЯО–SF, будет составлять величину порядка одной секунды. Сложнее с идентификацией распадов изотопа  $^{257}\text{Rf}$  по  $p1n$ -каналу, т.к. энергии альфа-распада и периоды полураспада близки к величинам, характерным для изотопов  $^{256}$ ,  $^{257}$ ,  $^{258}\text{Db}$ .

В табл. 1 представлены данные для различного вида  $\alpha$ – $\alpha$  корреляций (материнское–дочернее ядро), соответствующих образованию ядер отдачи после испарения нейтронов, а также для событий быстрого деления (временной интервал ЯО–SF не более 100 мс). Для всех событий спонтанного деления в совпадении были зарегистрированы от одного до нескольких гамма квантов и/или событие в боковом детекторе (одновременная регистрация двух осколков спонтанного деления). Всего было найдено 3 события быстрого деления при энергии пучка  $^{50}\text{Ti}$  265 МэВ. Период полураспада для этих событий составил величину  $12_{-4}^{+16}$  мс. Наиболее вероятно, что найденные события соответствуют изотопу  $^{258}\text{Rf}$  ( $p0n$  канал). Вероятность альфа-распада для изотопа  $^{258}\text{Rf}$  составляет величину  $0.31 \pm 0.11$  [15]. Учитывая существенную разницу в эффективности регистрации для корреляций типа ЯО–SF (близко к 100%) и ЯО– $\alpha$ – $\alpha$  (около 25%), отсутствие корреляций

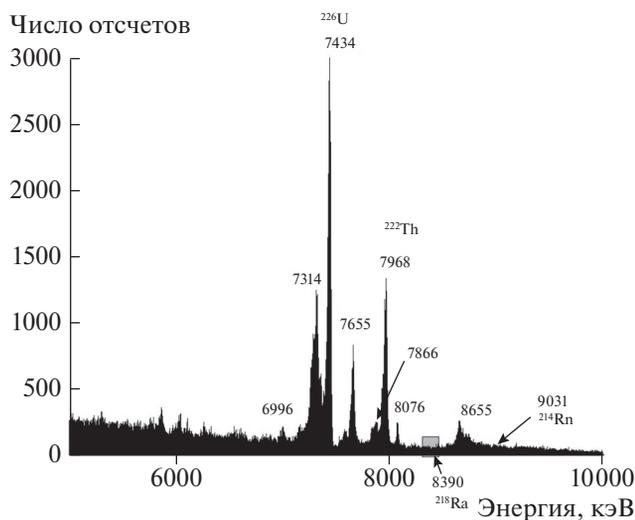


Рис. 4. Спектр альфа частиц, испускаемых при распаде изотопов, синтезируемых в реакции полного слияния  $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{230}\text{U}^*$ .

типа ЯО  $\rightarrow ^{258}\text{Rf} \rightarrow ^{254}\text{No}$  не противоречит полученным результатам — 3 корреляции ЯО—SF.

В первой половине 2018 г. был проведен тестовый эксперимент по ускорению на циклотроне У400 ионов  $^{54}\text{Cr}$ , интенсивность пучка составила  $0.5 \text{ мкА} \cdot \text{частиц}$ , а энергия пучка 260 МэВ. Полученный результат позволит в будущем проводить эксперименты по детальному изучению свойств радиоактивного распада изотопов Sg в реакциях  $^{54}\text{Cr} + ^{204, 206, 208}\text{Pb} \rightarrow ^{258, 260, 262}\text{Sg}^*$  с использованием сепаратора SHELS.

Одним из приоритетных направлений исследований на сепараторе SHELS является исследование свойств радиоактивного распада нейтроноизбыточных изотопов No и Rf, которые образуются в асимметричных комбинациях налетающий ион—ядро мишени. В основном это реакции с ускоренными ионами  $^{22}\text{Ne}$ .

В конце 2018 года был проведен тестовый эксперимент по измерению сечений образования ядер-остатков испарения в реакции полного слияния  $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{230}\text{U}^*$ . Интегральный поток ионов  $3.3 \cdot 10^{17}$  был набран при энергии пучка 122.5 МэВ. Толщина мишени составляла  $450 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$ .

Спектр альфа частиц, испускаемых при распаде изотопов, синтезируемых в реакции полного слияния  $^{22}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{230}\text{U}^*$ , представлен на рис. 4. На спектре отчетливо выделяется пик, принадлежащий распаду изотопа  $^{226}\text{U}$ , который образуется в  $4n$  канале.

Из сравнения с полученными ранее данными [16] для сечений образования изотопов  $^{226}\text{U}$  и измеренными выходами для этого изотопа в

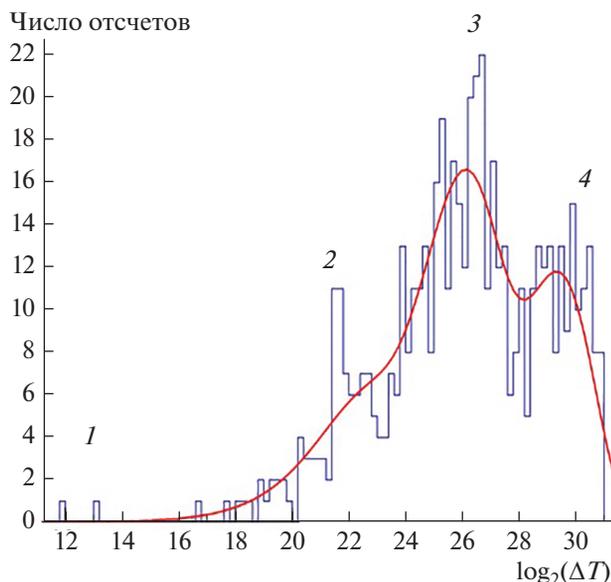
экспериментах 2018 г. было получено значение величины эффективности транспортировки ЯО равное  $10 \pm 1\%$ . Эта величина примерно в 3 раза превышает значение эффективности транспортировки ЯО сепаратора до модернизации. Обеспечиваемая сепаратором эффективность транспортировки ЯО, синтезируемых в асимметричных комбинациях позволяет набирать достаточную статистику за относительно короткое время, что позволит приступить к изучению структуры ядер вблизи подболочки  $N = 162$ , в частности изотопов, синтезируемых в реакциях  $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{260}\text{No}^*$  и  $^{22}\text{Ne} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{264}\text{Rf}^*$ .

В 2019 г. был проведен ряд экспериментов, нацеленных на изучение свойств распада изотопов  $^{250}\text{No}$ ,  $^{252}\text{No}$ ,  $^{254}\text{No}$ . В реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{254}\text{No} + 2n$ , с сечением образования в максимуме 2 мкб, набран интегральный поток ионов  $8 \cdot 10^{17}$ . Использовались две мишени  $^{208}\text{Pb}$ , с толщинами  $360 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$  и  $430 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$ . С использованием метода поиска корреляций типа ЯО—спонтанное деление (SF) было зафиксировано порядка 600 событий спонтанного деления. В эксперименте наблюдались две активности, которые можно отнести к SF изотопов  $^{254}\text{No}$  и  $^{252}\text{No}$ . Это связано с достаточно большой вероятностью деления  $^{252}\text{No}$ , образующегося на примеси изотопа  $^{206}\text{Pb}$  в основной мишени. Кроме того, вероятность  $B_{\text{SF}}$  спонтанного деления  $^{254}\text{No}$  составляет величину  $B_{\text{SF}} = 0.17\%$ , тогда как для  $^{252}\text{No}$   $B_{\text{SF}} = 29.3\%$ . Благодаря большой разнице между временами жизни данные два изотопа хорошо разделяются по периодам полураспада. В результате к распаду  $^{254}\text{No}$  было отнесено порядка 310 событий SF.

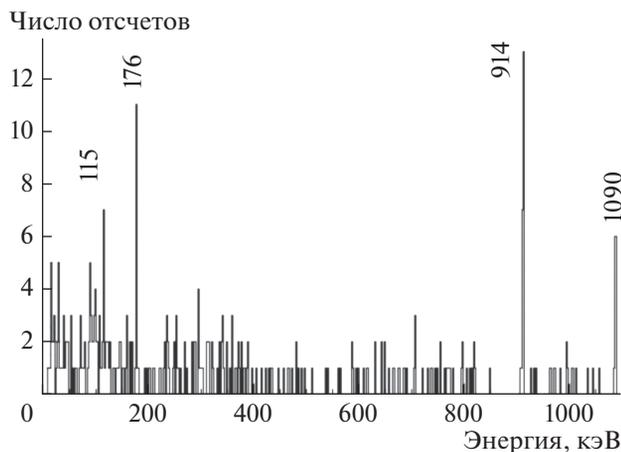
На рис. 5 представлен результат предварительной обработки данных для распределения событий SF по разнице времени  $\Delta T$  (мкс) в корреляции ЯО—SF. По периодам полураспада разделяются  $^{254}\text{No}$  и  $^{252}\text{No}$ . Также видны 2 события с периодами полураспада несколько мс, которые могут быть отнесены к распаду изомера  $^{254m}\text{No}$ .

Следующий эксперимент был посвящен набору статистики для SF изотопа  $^{252}\text{No}$ . В реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb} \rightarrow ^{252}\text{No} + 2n$ , с сечением образования 500 нб, был набран интегральный поток ионов  $4.6 \cdot 10^{17}$ . Число зарегистрированных событий SF  $^{252}\text{No}$  составило порядка 22000, что вполне достаточно для калибровки детекторов по ТКЕ. Использовалась мишень толщиной  $400 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$ .

Третий эксперимент был направлен на набор статистики для событий SF изотопа  $^{250}\text{No}$ . В реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb} \rightarrow ^{250}\text{No} + 2n$ , с сечением образования в 13 нб, был набран интегральный поток



**Рис. 5.** Распределение событий SF по разнице времени  $\Delta T$  в корреляции ЯО–SF, 1 – два изомера  $^{254m}\text{No}$ , 2 – изотоп  $^{252}\text{No}$ , 3 – изотоп  $^{254}\text{No}$ , 4 – область со случайными событиями.



**Рис. 6.** Спектр  $\gamma$ -квантов, регистрируемых при распаде изотопа  $^{250}\text{No}$ .  $E_\gamma$  – Энергия  $\gamma$ -квантов,  $N$  – число отсчетов.

ионов  $2.6 \cdot 10^{18}$ . Число зарегистрированных событий SF  $^{250}\text{No}$  составило порядка 18000. Использовалась мишень толщиной  $350 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$ . Благодаря набранной статистике, впервые удалось получить коррелированный гамма спектр распадов изомерных состояний.

На рис. 6 приведен спектр гамма квантов, видны линии в 914 и 1090 кэВ, разница между которыми составляет 176 кэВ. Пик с такой энергией также наблюдается на спектре. Линии 115 и 176 кэВ хорошо согласуются с тем, что ожидается увидеть в ротационном спектре основного состояния на основе известных данных по спектрам основных состояний изотопов  $^{254}\text{No}$  и  $^{252}\text{No}$ .

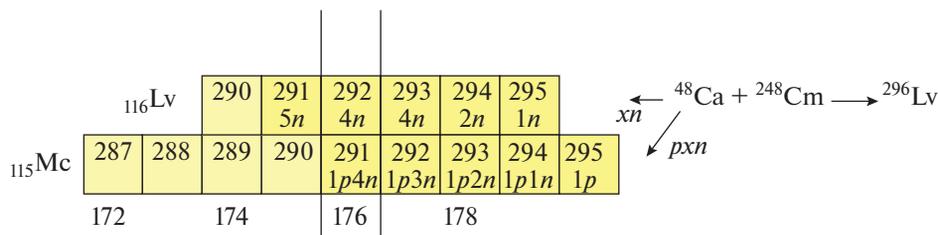
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продвижение к “острову стабильности” (предположительно  $N = 184$ ) сверхтяжелых элементов требует развития экспериментальных методов, в том числе совершенствования ускорителей, сепараторов ядер отдачи, создания высокоинтенсивных пучков ионов нейтроноизбыточных изотопов (например,  $^{50}\text{Ti}$ ,  $^{54}\text{Cr}$ ,  $^{58}\text{Fe}$ ,  $^{64}\text{Ni}$ ), нейтроноизбыточных мишеней из изотопов трансактинидных элементов, сложных детектирующих систем.

Эксперименты по изучению структуры уровней изотопов No, Rf и Db являются хорошей методической базой при подготовке исследований структуры изотопов Fl, Lv и Mc.

Стоит отметить, что возможность получать сверхтяжелые элементы с помощью *pxn* каналов достаточно интересна. К примеру, в реакции полного слияния  $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$  образуется компаунд ядро  $^{296}\text{Lv}^*$ , после испускания 2–4 нейтронов образуются изотопы  $^{292-294}\text{Lv}$ , после испускания протона и 2–4 нейтронов образуются изотопы  $^{291-293}\text{Mc}$ . В реакции полного слияния  $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{291}\text{Mc}^*$  после испускания 2–4 нейтронов возможно образование изотопов  $^{287-289}\text{Mc}$ , см. рис. 7.

Полученные результаты дают основание планировать эксперименты по синтезу новых нейтроноизбыточных изотопов сверхтяжелых элементов, поскольку недавние расчеты сечений об-



**Рис. 7.** Изотопы 115 и 116 элементов, которые можно синтезировать с использованием испарительных *xn* и *pxn* каналов.

разования для каналов с испусканием протонов, приводящих к изотопам элементов с  $Z = 111-117$ , дают сечения каналов  $p2n$  в 30–100 раз меньше, чем для  $3n$  испарительного канала [17]. В этом случае возможно проведение исследований экзотических каналов образования изотопов в области СТЭ на новом ускорителе DC-280 (фабрика СТЭ ЛЯР ОИЯИ), ток пучка которого будет примерно в 10 раз больше, чем на работающем циклотроне У400 [18].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-02-00867 и № 18-52-15004), ОМУС ОИЯИ (гранты 19-502-06, А.А. Кузнецова, 19-502-10, М.С. Тезекбаева).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин А.В., Попеко А.Г., Мальшев О.Н. и др. // Письма ЭЧАЯ. 2015. Т. 12. № 1(192). С. 63; Yere-min A.V., Popoko A.G., Malyshev O.N. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. № 1. P. 35.
2. Еремин А.В., Попеко А.Г., Мальшев О.Н. и др. // Письма ЭЧАЯ. 2015. Т. 12. № 1(192). С. 74; Yere-min A.V., Popoko A.G., Malyshev O.N. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. № 1. P. 43.
3. Еремин А.В., Белозеров А.В., Челноков М.Л. и др. // ЯФ. 2003. Т. 66. С. 1078; Yere-min A.V., Belozеров A.V., Chelnokov M.L. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2003. V. 66. P. 1042.
4. Еремин А.В. // ЭЧАЯ. 2007. Т. 38. № 4. С. 939; Yere-min A.V. // Phys. Part. Nucl. 2007. V. 38. № 4. P. 492.
5. Hauschild K., Yere-min A.V., Dorvaux O. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 560. P. 388.
6. Попеко А.Г., Белозеров А.В., Бриансон Ш. и др. // ЯФ. 2006. Т. 69. С. 1183; Popoko A.G., Belozеров A.V., Brianson Ch. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2006. V. 69. P. 1183.
7. Еремин А.В., Тезекбаева М.С., Попеко А. Г. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2019, Т. 16. С. 207; Yere-min A.V., Tezekbayeva M.S., Popoko A.G. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16. P. 224.
8. Yere-min A.V., Popoko A.G., Malyshev O.N. et al. // In Proc. VIII Int. Symp. Exotic Nuclei EXON 2016. Singa-pore: World Scientific, 2017. P. 397.
9. <http://geant4.web.cern.ch/>.
10. Hessberger F.P., Hofmann S., Ninov V. et al. // Z. Phys. A. 1997. V. 359. P. 415.
11. Hessberger F.P., Hofmann S., Ackermann D. et al. // Eur. Phys. J. A. 2001. V. 12. P. 57.
12. Svirikhin A.I., Yere-min A.V., Izosimov I.N. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13. № 4. P. 480.
13. Somerville L.P., Nurmia M.J., Nitschke J.M. et al. // Phys. Rev. C. 1985. V. 31. P. 1801.
14. Gates J.M., Garcia M.A., Gregorich K.E. et al. // Phys. Rev. C. 2008. V. 77. Art. № 034603.
15. Heßberger F.P., Antalic S., Sulignano B. et al. // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 43. P. 55.
16. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Еремин А.В. и др. // ЯФ. 1989. Т. 50. С. 619; Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Yere-min A.V. et al. // Sov. J. Nucl. Phys. 1989. V. 50. P. 381.
17. Hong J., Adamian G.G., Antonenko N.V. // Phys. Lett. B. 2017. V. 764. P. 42.
18. Dmitriev S., Itkis M., Oganessian Y. // EPJ Web Conf. 2016. V. 131. Art. № 08001.