

СПЕКТРОСКОПИЯ ИЗОТОПОВ ТРАНСФЕРМИЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДУБНЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2020 г. А. В. Еремин^{1),2)*}, А. Г. Попеко^{1),2)}, О. Н. Малышев^{1),2)},
А. В. Исаев¹⁾, А. А. Кузнецова¹⁾, Ю. А. Попов^{1),2)}, А. И. Свирихин^{1),2)},
Е. А. Сокол¹⁾, М. С. Тезекбаева^{1),3)}, М. Л. Челноков¹⁾, В. И. Чепигин¹⁾,
А. Лопез-Мартенс⁴⁾, К. Хошильд⁴⁾, О. Дорво⁵⁾, Б. Галл⁵⁾,
Ж. Пио⁶⁾, С. Анталиц⁷⁾, П. Мошат⁷⁾, Д. Тонев⁸⁾, Е. Стефанова⁸⁾

Поступила в редакцию 25.12.2019 г.; после доработки 25.12.2019 г.; принята к публикации 25.12.2019 г.

В течение последних 15 лет в ЛЯР ОИЯИ был проведен большой цикл работ по детальному исследованию свойств радиоактивного распада изотопов трансфермиевых элементов методами α -, β -, γ -спектроскопии. В экспериментах использовались высокоинтенсивные ускоренные пучки тяжелых ионов ^{22}Ne , ^{48}Ca , ^{50}Ti и ^{54}Cr циклотрона У-400 и кинематический сепаратор SHELS. В будущем планируется модернизация сепаратора и детектирующей системы для повышения коэффициента трансмиссии исследуемых ядер к детекторам и эффективности регистрации гамма-квантов.

DOI: 10.31857/S0044002720040108

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы рентгеновская и γ -спектроскопия все более широко применяются в экспериментах по изучению свойств радиоактивного распада трансфермиевых элементов. Вследствие невысокой эффективности регистрации (несколько процентов), 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 -распады тяжелых ядер, и, будучи расположены в фокальной плоскости сепаратора ядер отдачи, имеют фоновые загрузки

на много порядков меньше, чем в экспериментах без использования сепараторов. Поэтому одним из основных направлений является совершенствование экспериментальных методик и проведение экспериментальных исследований с использованием самых последних разработок в области детектирующих систем.

Для детального исследования свойств радиоактивного распада изотопов трансфермиевых элементов и поперечных сечений образования этих изотопов 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. Корреляционные цепочки имплантированных в детектор ядер отдачи 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 изучения и поиска новых изотопов и получения новых данных о распадах известных ядер.

В Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова (ОИЯИ, Дубна) кинематический сепаратор ядер отдачи ВАСИЛИСА (VASSILISSA) [1–3]

¹⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

²⁾Государственный университет “Дубна”, Дубна, Россия.

³⁾Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан.

⁴⁾Центр ядерной спектроскопии и материаловедения, ИН2ПЗ-Национальный центр научных исследований, Орсе, Франция.

⁵⁾Междисциплинарный институт Губерта Курьена, ИН2ПЗ-Национальный центр научных исследований, Страсбург, Франция.

⁶⁾ГАНИЛ, Кан, Франция.

⁷⁾Университет Коменского, Братислава, Словакия.

⁸⁾ИЯИЯЭ, София, Болгария.

*E-mail: eremin@jinr.ru

использовался для исследования поперечных сечений образования и свойств радиоактивного распада ядер — остатков испарения (ЯО), синтезируемых в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами, ускоренными на циклотроне У-400. В результате экспериментов, проведенных с использованием сепаратора ВАСИЛИСА, был синтезирован ряд новых изотопов трансактинидных элементов и измерены поперечные сечения их образования. В ходе экспериментальной работы был набран большой объем данных относительно поперечных сечений формирования ЯО, синтезируемых в асимметричных реакциях [4].

В 2004 г. на сепараторе ВАСИЛИСА были начаты эксперименты по детальному исследованию свойств радиоактивного распада и изучению структуры ядерных уровней изотопов трансфермиевых элементов. В сотрудничестве с группой физиков из институтов Франции (ЦЯНМН, Орсе и МИУК, Страсбург) на сепараторе ВАСИЛИСА была создана комбинированная детектирующая установка GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the ELeCtromagnetic Analyzer), состоящая из семи Ge детекторов для регистрации рентгеновских и γ -квантов, испускаемых исследуемыми ядрами, а также сборки из мультитриповых кремниевых детекторов, обеспечивающих регистрацию осколков спонтанного деления, α - и β -излучений в геометрии, близкой к 4π [5].

В этих экспериментах исследовались свойства распада и структура изотопов No и Lr, синтезируемых в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{207,208}\text{Pb} \rightarrow ^{255,256}\text{No}^*$, $^{48}\text{Ca} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{257}\text{Lr}^*$, а также их дочерних ядер [6–9]. Особый интерес для спектроскопических исследований представляют нейтроноизбыточные изотопы элементов в области, где существует переход от нейтронной подоболочки $N = 152$ к подоболочке с $N = 162$, поскольку сечения образования этих изотопов достаточно высоки. Попытка использовать асимметричную комбинацию $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{260}\text{No}^*$ для исследования свойств нейтроноизбыточных изотопов No–Fm показала, что, несмотря на высокую интенсивность пучков ускоренных ионов ^{22}Ne (до 10^{13} част./с) и достаточно большое сечение образования (порядка 100 нбн), для получения приемлемой статистики необходимо существенное (примерно в 3 раза, т.е. до величины 10–15%) повышение эффективности транспортировки медленных ЯО от мишени кинематического сепаратора до фокальных детекторов. В этом случае для исследования нейтроноизбыточных изотопов 104 и 105 элементов с использованием ЯО– α – γ - и ЯО– α – β -совпадений, достаточная статистика может быть получена в эксперименте продолжительностью около месяца.

Накопленный опыт позволил сформулировать требования для модернизации сепаратора

ВАСИЛИСА, выполнить ионно-оптические расчеты и спроектировать необходимое оборудование [10–12]. В 2013 г. новый кинематический сепаратор SHELS (Separator for Heavy Element Spectroscopy) прошел вакуумные и высоковольтные тесты, в 2014 г. были проведены тестовые эксперименты. К настоящему времени на сепараторе SHELS проведены эксперименты по изучению структуры ядер $^{249-251}\text{Fm}$, ^{251}Md , $^{250-255}\text{No}$, $^{253,255}\text{Lr}$, $^{254-257}\text{Rf}$ и ^{257}Db , что позволило получить новые данные для конфигурации уровней ротационных полос ядер с числом нейтронов от 149 до 155, т.е. получить данные о влиянии деформированной нейтронной подоболочки $N = 152$ на ядерную структуру.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Модернизированный сепаратор ВАСИЛИСА–SHELS выполнен по схеме QQQ–E–D–D–E–QQQ–D (Q — квадрупольная линза, E — электростатический дефлектор, D — дипольный магнит). Схема сепаратора представлена на рис. 1. Вращающаяся мишень облучается ускоренным пучком тяжелых ионов. Триплеты квадрупольных линз предназначены для фокусировки ядер отдачи, пролетающих через сепаратор. Сепарирующая часть состоит из комбинации электростатических и магнитных полей, так называемый фильтр скоростей. Детектирующая система сепаратора отделена от экспериментального зала, в котором находится ускоренный пучок, двухметровой бетонной стеной. Перед детекторами располагается 8-градусный дипольный магнит, служащий для дополнительной очистки от ионов рассеянного пучка.

Детальное описание модернизированного сепаратора тестовых экспериментов и полученных результатов для эффективности транспортировки ядер отдачи приведены в [13, 14].

Важным моментом является совершенствование детектирующей системы GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with ELeCtromagnetic Analyzer) с целью увеличения эффективности детектирования γ -квантов и конверсионных электронов, испускаемых исследуемыми ядрами [5]. Повышение эффективности детектирования γ -квантов в три раза (от 10 до 30% в энергетическом диапазоне 100–200 кэВ) позволяет повысить вероятность определения α – γ -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 $100 \times 100 \text{ мм}^2$,

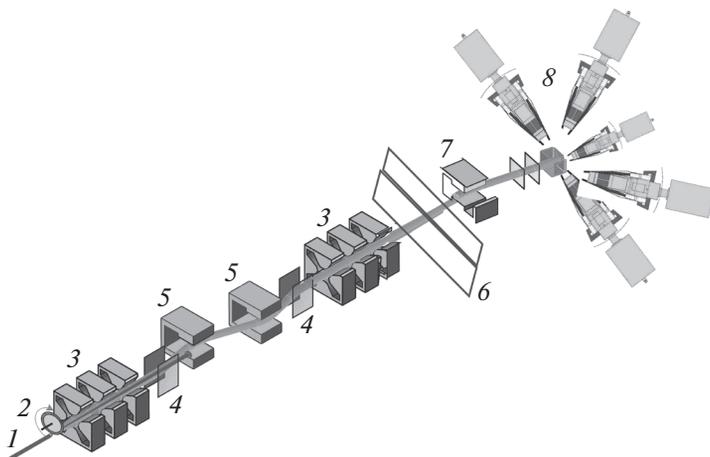


Рис. 1. Схема сепаратора SHELS: 1 — пучок ускоренных ионов, 2 — вращающаяся мишень, 3 — триплеты квадрупольных линз, 4 — электростатические дефлекторы, 5 — дипольные магниты, 6 — бетонная стена толщиной 2 м, 7 — дополнительный 8-градусный дипольный магнит, 8 — детектирующая система.

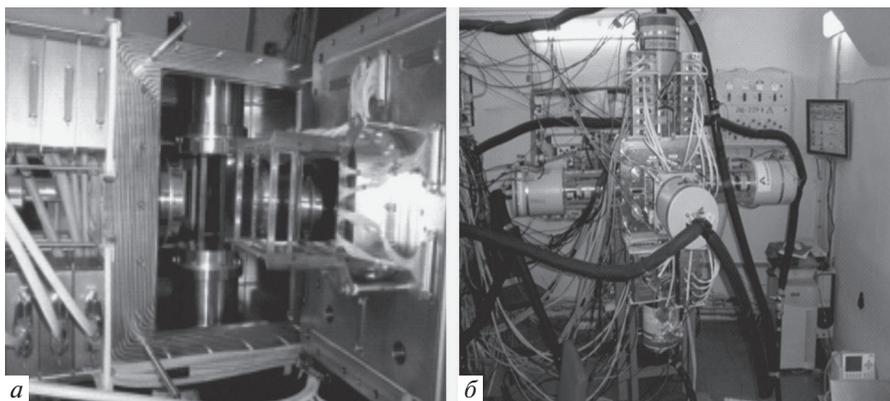


Рис. 2. *а* — Держатель с новыми фокальным и боковыми детекторами, расположенный на заднем фланце новой детекторной камеры; *б* — вид новой детекторной камеры, германиевые γ -детекторы окружают DSSD ($10 \times 10 \text{ см}^2$), с обратной стороны камеры располагается Клеверный германиевый детектор.

один германиевый детектор Клеверного типа (Clover), который размещен максимально близко к фокальному детектору и четыре германиевых однокристалльных детектора по бокам детекторной камеры (рис. 2). В результате получены рекордные значения эффективности детектирования γ -квантов (от 12 до 34%) в энергетическом диапазоне 100–300 кэВ. С использованием пучков тяжелых ионов ^{22}Ne , ^{40}Ar , ^{48}Ca и ^{50}Ti проводились тестовые 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), α -частиц (0–20 МэВ) и осколков спонтанного деления (0–200 МэВ).

С целью повышения эффективности регистрации γ -квантов (определяющая величина при ис-

пользовании метода α – γ -корреляций) планируется совершенствование и использование модернизированной детектирующей системы GABRIELA в фокальной плоскости экспериментальной установки SHELS и проведение экспериментов по спектроскопии экзотических высоковозбужденных ядер нейтроноизбыточных изотопов трансфермиевых элементов. Для повышения эффективности регистрации ядер отдачи — остатков испарения, транспортируемых установкой от мишени в фокальную плоскость, увеличения эффективности детектирования и энергетического разрешения при регистрации последовательных α -распадов и спонтанного деления, а также γ -квантов и конверсионных электронов, испускаемых этими ядрами, планируется использовать принципиально новую детектирующую систему. В ее состав будет входить пять детекторов Клеверного типа (см. рис. 3). Расчеты показывают, что в такой конфигурации в зависимости от энергии эффективность реги-

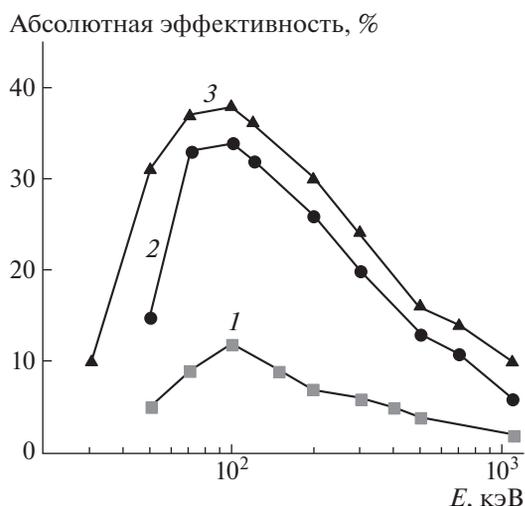


Рис. 3. Эффективность регистрации одиночных γ -квантов в зависимости от энергии для различных конфигураций γ -детекторов, рассчитанная по программе GEANT4: 1 — первоначальная конфигурация с семью германиевыми однокристалльными детекторами (2004 г.); 2 — конфигурация с одним детектором Клевверного типа вблизи фокального детектора и четырьмя германиевыми однокристалльными детекторами по бокам (используемая после 2015 г.); 3 — планируемая модернизация детектирующей системы с пятью детекторами Клевверного типа.

страции γ -квантов модернизированной системой GABRIELA будет составлять от 40% (100 кэВ) до 15–20% (более 500 кэВ). В этом случае при наборе в течение эксперимента статистики порядка 300 событий распадов изотопов СТЭ (СверхТяжелых Элементов) имеется реальная возможность измерения энергий γ -переходов из возбужденных уровней и определения положения уровней.

Планы использовать асимметричные комбинации типа $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{260}\text{No}^*$, $^{22}\text{Ne} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{264}\text{Rf}^*$, $^{22}\text{Ne} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{270}\text{Sg}^*$ для исследования свойств нейтроноизбыточных изотопов No–Sg требуют продолжения работ по повышению эффективности транспортировки медленных ЯО от мишени кинематического сепаратора до фокальных детекторов. Ионно-оптические расчеты показывают, что для увеличения захвата медленных ЯО необходимо увеличение апертуры линз первого триплета с существующих 200 до 300 мм. Линзы с необходимой апертурой изготовлены (компания СигмаФи, Франция, см. рис. 4), в 2020 г. планируется их монтаж на установке SHELS.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполнение цикла экспериментов по исследованию ограничений на слияние сложных ядер в

реакциях с тяжелыми ионами и процесса девозбуждения компаунд-ядер актинидных и трансактинидных элементов позволяет подготовить и провести эксперименты по синтезу химических элементов с атомными номерами $113 \leq Z \leq 118$ и получить информацию о свойствах новых актинидных и трансактинидных нуклидов. Актуальность этих экспериментов для решения задачи синтеза элементов с атомными номерами $110 \leq Z \leq 118$, изучения свойств нуклидов в области $Z \geq 100$ и новых ядер, удаленных от линии β -стабильности в области $Z \geq 82$, обусловлена тем, что кинематический сепаратор SHELS совместно с детектирующей системой GABRIELA обеспечивает идентификацию вновь синтезируемых ядер и наиболее полное изучение характеристик их радиоактивного распада. Полученная в предыдущих экспериментах на детектирующих системах “нейтронный детектор” и GABRIELA высокая эффективность детектирования как нейтронов спонтанного деления, так и γ - и электронных распадов исследуемых ядер в фокальной плоскости позволяет набирать достаточную статистику за более короткое время. В табл. 1 приведены данные некоторых экспериментов, выполненных на сепараторе SHELS.

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}Rf [15]. Было зарегистрировано девять событий типа ЯО– α – α -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 γ -квантами. Период полураспада для спонтанного деления ^{256}Rf составил 6.9 ± 0.23 мс. Вероятность α -распада b_α для изотопа ^{256}Rf составляет 0.29%, а вероятность спонтанного деления — 99.71%.

Предварительный анализ данных, полученных в наших экспериментах, подтверждает существование трех короткоживущих изомерных состояний изотопа ^{256}Rf [16]. Также зарегистрированы γ -линии с энергией 104 и 900 кэВ, соответствующие переходам с последнего возбужденного уровня.

На рис. 5 представлены спектры, полученные в экспериментах с детектирующей установкой GABRIELA с использованием метода α – α – γ -корреляций по изучению свойств распада изотопа ^{257}Rf и его дочерних продуктов, образующихся в реакции полного слияния $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{257}\text{Rf} + n$. В качестве фокального детектора модернизированного сепаратора использовался двусторонний многостриповый детектор (128×128 стрипов, размер 100×100 мм²). Фокальный

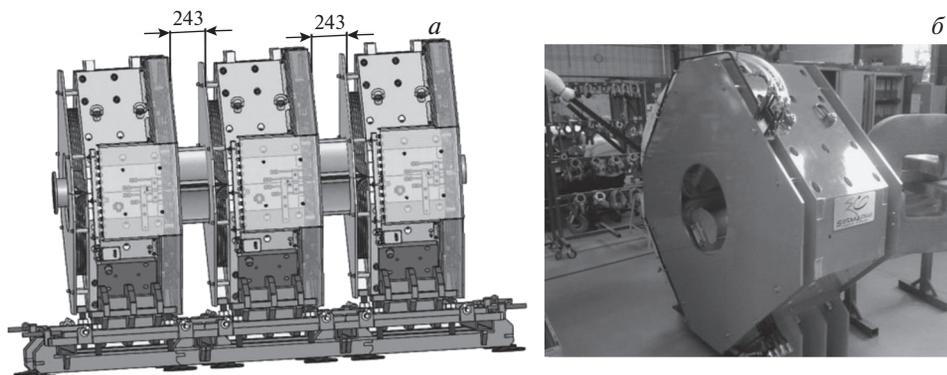


Рис. 4. Триплет квадрупольных линз с апертурой 300 мм: *а* — общий вид, *б* — вид спереди. Цифрами показано расстояние между линзами в мм.

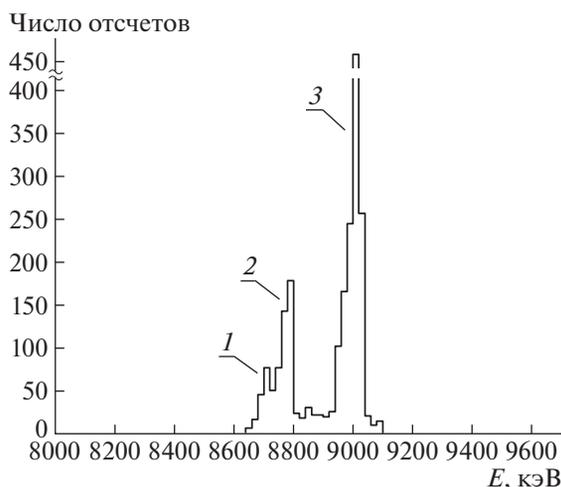


Рис. 5. α -спектр с максимумами: 1 — 8700 кэВ, 2 — 8780 кэВ, 3 — 8970 кэВ, зарегистрированный в фокальной плоскости сепаратора для реакции полного слияния $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{257}\text{Rf} + 1n$. Использовано условие корреляции α -распад (материнское ядро ^{257}Rf)— α -распад (дочернее ядро ^{253}No).

детектор сепаратора имел разрешение 18 кэВ (ПШПВ, для α -частиц с энергией 5.5 МэВ). В общей сложности было зарегистрировано порядка 2700 событий распада изотопа ^{257}Rf .

Установлено, что первый возбужденный уро-

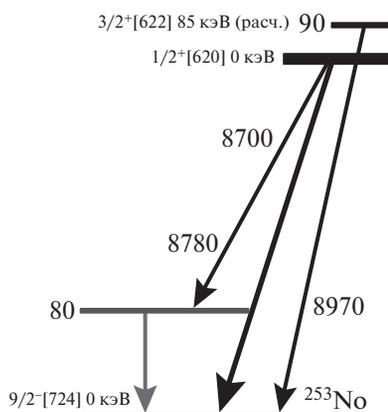


Рис. 6. Восстановленная из анализа α -спектров с использованием α - γ -совпадений схема уровней материнского ^{257}Rf и дочернего ядра ^{253}No .

вень ^{253}No $5/2^+$ имеет энергию 80 кэВ, т.е. метод α -спектрометрии с высоким разрешением совместно с регистрацией γ -квантов может быть успешно применен для измерения энергии низколежащих уровней сверхтяжелых ядер при достаточно небольшой статистике. Это особенно актуально для четно-четных изотопов трансфермиевых элементов. Так, например, для изотопа ^{254}No , имеющего достаточно сильную деформацию (параметр деформации $\beta_2 = 0.252$), первый возбужденный уровень 2^+ имеет энергию 44 кэВ, для изотопа ^{252}No ($\beta_2 = 0.249$), $E(2^+)$ имеет энергию 46 кэВ, для изотопа ^{256}Rf ($\beta_2 = 0.249$), $E(2^+)$ имеет энергию 45 кэВ. На рис. 6 представлены схемы уровней материнского ядра ^{257}Rf и дочернего ядра ^{253}No , синтезированных в реакциях полного слияния $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{257}\text{Rf} + 1n$, где изотоп ^{253}No образуется в результате α -распада ^{257}Rf .

Ряд экспериментов с использованием детектирующей установки GABRIELA был посвящен изучению свойств распада изотопов 256 – ^{258}Db и

Таблица 1. Данные экспериментов по спектроскопии изотопов No—Rf, выполненные на сепараторе SHELS

Ускоряемый ион	Исследуемые ядра	Суммарный интегральный поток ионов ($\times 10^{18}$)	Количество зарегистрированных распадов ядер
^{48}Ca	$^{253,254}\text{No}$	1.28	10400
^{48}Ca	$^{254,255}\text{No}$	1.46	15920
^{48}Ca	^{255}Lr , ^{255}No	3.54	8270 2900
^{48}Ca	^{255}Lr , ^{255}No	1.84	32000 7300
^{48}Ca	^{254}No	0.5	7000
^{48}Ca	$^{253,254}\text{No}$	3.85	90000
^{48}Ca	^{252}No	0.4	22000
^{48}Ca	^{254}No	0.3	15000
^{48}Ca	^{250}No	2.6	30000
^{50}Ti	^{257}Db	8.45	1580
^{50}Ti	^{255}Rf	9.08	4100
^{50}Ti	^{257}Rf	4.62	2700
	^{256}Rf		6270
^{22}Ne	^{256}No	9.7	5200

дочерних продуктов, образующихся в реакции полного слияния $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{259}\text{Db} + xn$. На рис. 7 представлены спектры, полученные в экспериментах с детектирующей установкой GABRIELA с использованием метода α - α -корреляций, по изучению свойств распада изотопов $^{256,258}\text{Db}$, образующихся в реакции полного слияния $^{50}\text{Ti} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{256,258}\text{Db} + 1n, 3n$. Хорошо видно, что α -спектры имеют достаточно сложную структуру, что указывает на наличие большого числа заселяемых при α -распаде уровней. Для построения схем уровней материнского ядра $^{256,258}\text{Db}$, полученных с использованием метода α - γ -совпадений, не хватает статистики по сравнению с экспериментами по исследованию структуры ядра ^{257}Db .

На рис. 8 представлены α -спектр, полученный с использованием метода α - α -корреляций для изотопа ^{257}Db и схема уровней материнского ядра ^{257}Db и дочернего ядра ^{253}Lr , полученная с использованием метода α - γ -совпадений.

Следует отметить, что эксперименты по изучению структуры уровней изотопов Db предоставляют существенную информацию для подготовки

исследований структуры изотопов Mc, в особенности для анализа α -спектров с использованием α - γ -совпадений и восстановления схем уровней материнских ядер Mc и дочерних ядер $\text{Nh} \rightarrow \text{Rg} \rightarrow \text{Mt} \rightarrow \text{Bh} \rightarrow \text{Db}$.

В реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{204,206,208}\text{Pb} \rightarrow ^{252,254,256}\text{No}^*$ после испарения составным ядром двух нейтронов образуются изотопы $^{250,252,254}\text{No}$, в основном испытывающие α -распад и спонтанное деление (СД). В экспериментах с использованием реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{254}\text{No} + 2n$ в фокальной плоскости было зарегистрировано порядка 600 корреляционных событий ЯО—осколок СД. Наблюдались две активности, которые можно отнести к СД изотопов ^{254}No и ^{252}No (образующегося на примеси изотопа ^{206}Pb в основной мишени). Следует учитывать, что вероятность спонтанного деления ^{254}No составляет величину 0.17%, тогда как для ^{252}No — 29.3%. Имея большую разницу между временами жизни, эти два изотопа хорошо разделяются по периодам полураспада. В результате к распаду ^{254}No было отнесено 310 событий СД. В ходе эксперимента была набрана статистика, сравнимая с предыдущим экспериментом, проведенным в GSI Darmstadt [17]. Наблюдалось два события СД с малыми временами жизни, которые могут быть предварительно отнесены к распаду изомерного состояния изотопа ^{254}No . Были зарегистрированы γ -кванты ($E_\gamma = 159$ кэВ), испускаемые ядром ^{254}No при переходе от уровня 6^+ к 4^+ .

В экспериментах по реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb} \rightarrow ^{254}\text{No} + 2n$ было зарегистрировано 22000 событий СД, отнесенных к распаду изотопа ^{252}No . Данной статистики было достаточно для проведения калибровки детекторов по полной кинетической энергии (ТКЕ). Наблюдалось γ -кванты ($E_\gamma = 167$ кэВ), испускаемые ядром ^{252}No при переходе от уровня 6^+ к 4^+ .

Ключевым этапом экспериментов с пучком ^{48}Ca являлось изучение свойств распада изотопа ^{250}No , синтезируемого в реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb} \rightarrow ^{250}\text{No} + 2n$. Всего в фокальном детекторе за 13 дней облучения было зарегистрировано 19000 корреляционных событий ЯО—осколок СД. На рис. 9 приведен спектр γ -квантов, видны линии в 914 и 1090 кэВ, разница между которыми составляет 176 кэВ. Пик с такой энергией также наблюдается в спектре. Линии 115 и 176 кэВ хорошо согласуются с тем, что ожидалось увидеть в ротационном спектре основного состояния на основе известных данных по спектрам основных состояний изотопов ^{254}No и ^{252}No (рис. 10а и 10б соответственно).

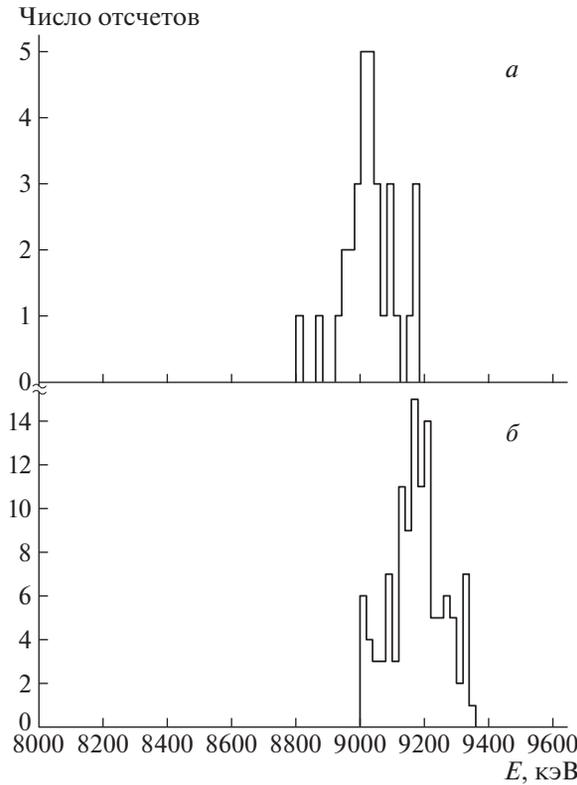


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, для реакции полного слияния $^{50}\text{Ti} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{256,258}\text{Db} + 1n$ (а) с максимумом α -спектра 9015 кэВ и $3n$ (б) с максимумом α -спектра 9179 кэВ. Использовано условие корреляции α -распад (материнское ядро $^{256,258}\text{Db}$)— α -распад (дочернее ядро ^{253}No , ^{252}Lr , ^{254}Lr).

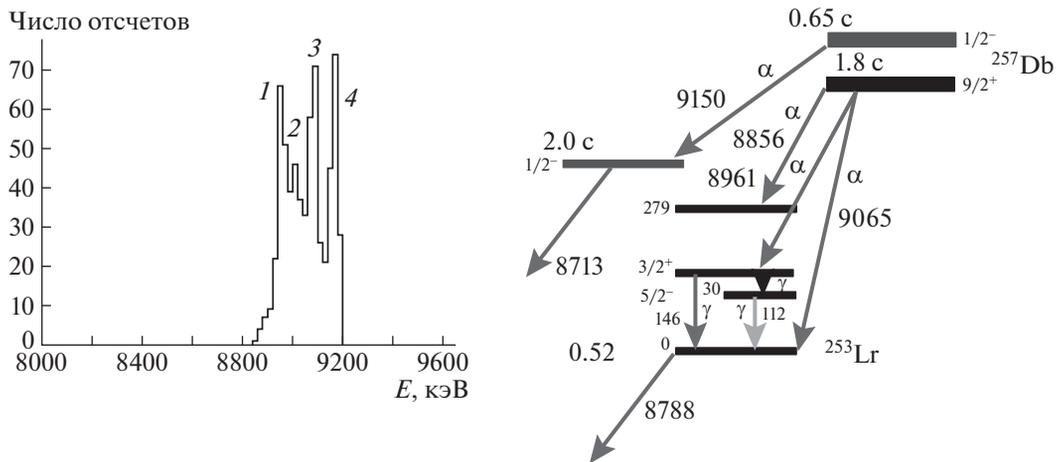


Рис. 8. а — То же, что и на рис. 5, для реакции полного слияния $^{50}\text{Ti} + ^{298}\text{Bi} \rightarrow ^{257}\text{Db} + 2n$ с максимумами α -спектра: 1 — 8961 кэВ, 2 — 8856 кэВ, 3 — 9065 кэВ, 4 — 9150 кэВ. Использовано условие корреляции α -распад (материнское ядро ^{257}Db)— α -распад (дочернее ядро ^{253}Lr). б — То же, что и на рис. 6, для материнского ядра ^{257}Db и дочернего ядра ^{253}Lr .

Для данных изотопов переход от уровня 6^+ к 4^+ происходит от 159 кэВ в ^{254}No к 167 кэВ в ^{252}No , переход $4^+ \rightarrow 2^+$ происходит с испусканием фотонов с энергией 44 и 46 кэВ соответственно [18]. Исходя из этих данных, можно представить

схему распада ^{250}No , показанную на рис. 10в. Распад из изомерного состояния 6^+ сопровождается переходами 914 кэВ с мультипольностью $M1$ и 1090 кэВ с мультипольностью $E2$ в состояние 4^+ , затем в 2^+ и в основное состояние 0^+ . Энергия

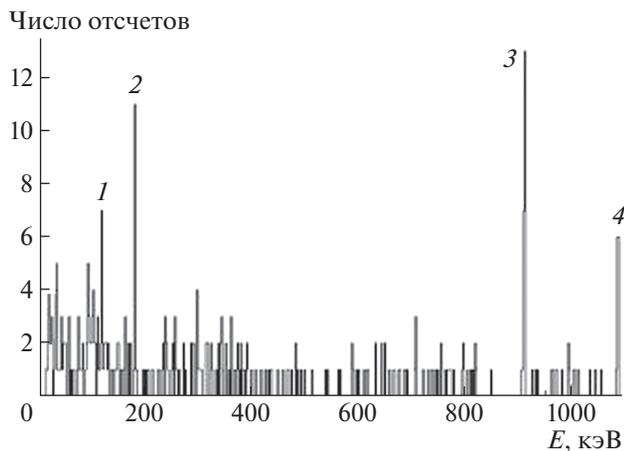


Рис. 9. Спектр γ -квантов, регистрируемых при распаде изотопа ^{250}No с максимумами: 1 — 115 кэВ, 2 — 176 кэВ, 3 — 914 кэВ, 4 — 1090 кэВ.

перехода $6^+ \rightarrow 4^+$ составляет 176 кэВ, $4^+ \rightarrow 2^+$ — 115 кэВ и $2^+ \rightarrow 0^+ \sim 49$ кэВ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные экспериментов по синтезу изотопов элементов с Z от 110 до 118 [19, 20] показывают, что периоды полураспада этих изотопов увеличиваются с ростом числа нейтронов в ядре, что может служить косвенным подтверждением существования области относительно долгоживущих сверхтяжелых ядер вблизи сферических оболочек нейтронов и протонов. 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}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{64}Ni), нейтроноизбыточных мишеней из изотопов трансактинидных элементов, сложных детектирующих систем.

Эксперименты по изучению структуры уровней изотопов Rf и Db являются хорошей методической базой при подготовке исследований структуры изотопов Fl, Lv и Mc. Расчеты показывают, что для четно-четного изотопа ^{286}Fl ($\beta_2 = 0.15-0.16$) уровень $E(2^+)$ может иметь энергию порядка 112 кэВ. Если эффективность регистрации α -частиц составляет величину порядка 70%, эффективность регистрации γ -квантов с энергией от 100 до 500 кэВ — 34–14%, вероятность α - γ -корреляций составит величину 10–20%. Если вероятность заселения низколежащего уровня 2^+ может составить величину порядка 5% в зависимости от предполагаемой энергии уровня, то при наборе в течение эксперимента статистики порядка

300 событий распадов изотопов СТЭ имеется реальная возможность измерения энергии перехода из первого возбужденного уровня и определения положения уровня. Эти данные позволят сделать вывод о степени деформации исследуемых ядер.

Весной 2019 г. на новом ускорителе DC-280 (фабрика СТЭ ЛЯР ОИЯИ) начались первые тестовые эксперименты. В планах до 2023 г. создать на ускорителе DC-280 новую экспериментальную установку (ГНСЗ), которая будет использовать модернизированную детектирующую систему GABRIELA для изучения структуры изотопов тяжелых и сверхтяжелых элементов. На фабрике СТЭ ЛЯР ОИЯИ планируется получение пучков тяжелых ионов ^{48}Ca , ^{50}Ti , ^{54}Cr с интенсивностью до 10 мкА част. [21]. Использование таких высокоинтенсивных пучков в сочетании с эффективными экспериментальными установками должно открыть доступ к изучению ядер, более близких к центру “острова стабильности”.

В настоящее время циклотрон У-400 обеспечивает интенсивность ускоренного пучка ионов ^{48}Ca на уровне 1.0–1.5 мкА част. После запуска экспериментальной установки ГНСЗ и модернизированной детектирующей системы GABRIELA в экспериментальном зале циклотрона DC280, появится возможность проведения поисковых экспериментов по изучению структуры изотопов СТЭ, синтезируемых в реакциях полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{288}\text{Mc} + 3n$, $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{287}\text{Fl} + 3n$, $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{286}\text{Fl} + 4n$, $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{292}\text{Lv} + 4n$.

Если величина сечения образования изотопов СТЭ находится на уровне нескольких (2–8) пбарн, то при длительности эксперимента порядка 100 дней возможно набрать интегральный поток ионов 10^{20} , что позволит зарегистрировать около 300 событий распадов изотопов СТЭ. В этом случае имеется реальная возможность измерения энергий γ -переходов из возбужденных уровней и точного определения положения низколежащих уровней.

Помимо спектроскопической информации о структуре ядер в области СТЭ, при наборе достаточной статистики (несколько сотен событий) появляется возможность детального изучения свойств радиоактивного распада изотопов, находящихся в цепочках распада материнских ядер СТЭ. К примеру, до сих пор остается открытым вопрос о свойствах распада изотопа ^{268}Db , конечного ядра в цепочке распада изотопа ^{288}Mc . В настоящее время предполагается, что изотоп ^{268}Db испытывает спонтанное деление с периодом полураспада 27 ч. Но теоретические расчеты показывают, что ^{268}Db с высокой степенью вероятности может испытывать β -распад (электронный захват), а спонтанное

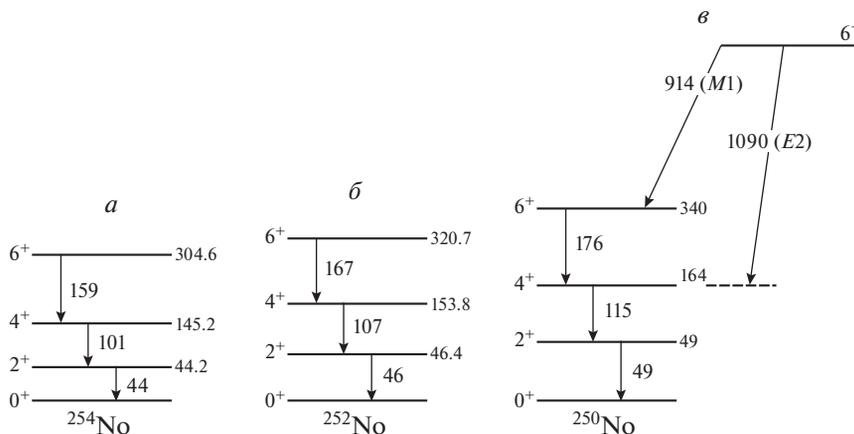


Рис. 10. *a* — Ротационный спектр основного состояния ^{254}No ; *б* — ротационный спектр основного состояния ^{252}No ; *в* — предполагаемая схема распада ^{250}No , основанная на полученных данных из эксперимента и существующих данных по ^{254}No и ^{252}No .

деление испытывает изотоп ^{268}Rf с периодом полураспада несколько секунд. В этом случае необходима регистрация рентгеновского кванта с энергией 120–140 кэВ в корреляции со спонтанным делением. Основываясь на результатах экспериментов, выполненных в ГСИ (Дармштадт, Германия) на сепараторе TASCА [22], можно предположить, что при регистрации 300 цепочек распада изотопов СТЭ возможна регистрация более 200 коррелированных γ -квантов. В этом случае при β -распаде изотопа ^{268}Db будет зарегистрировано несколько десятков рентгеновских квантов в корреляции со спонтанным делением изотопа ^{268}Rf .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты: № 17-02-00867 и № 18-52-15004; Французского национального агентства исследований, гранты ANR-06-BLAN-0034-01 и ANR-12-BS05-0013; ОМУС ОИЯИ (грант для молодых научных сотрудников ОИЯИ, № 19-502-06, А. А. Кузнецова; № 19-502-10, М. С. Тезекбаева).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. V. Yeremin, A. N. Andreyev, D. D. Bogdanov, V. I. Chepigin, V. A. Gorshkov, A. I. Ivanenko, A. P. Kabachenko, L. A. Rubinskaya, E. M. Smirnova, S. V. Stepantsov, E. V. Voronkov, and G. M. Ter-Akopian, Nucl. Instrum. Methods A **274**, 528 (1989).
2. A. V. Yeremin, A. N. Andreyev, D. D. Bogdanov, G. M. Ter-Akopian, V. I. Chepigin, V. A. Gorshkov, A. P. Kabachenko, O. N. Malyshev, A. G. Popeko, R. N. Sagaidak, S. Sharo, E. N. Voronkov, A. V. Taranenko, and A. Yu. Lavrentjev, Nucl. Instrum. Methods A **350**, 608 (1994).
3. A. V. Yeremin, D. D. Bogdanov, V. I. Chepigin, V. A. Gorshkov, A. P. Kabachenko, O. N. Malyshev, A. G. Popeko, R. N. Sagaidak, G. M. Ter-Akopian, and A. Yu. Lavrentjev, Nucl. Instrum. Methods B **126**, 329 (1997).
4. A. V. Yeremin, A. V. Belozero, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, V. A. Gorshkov, A. P. Kabachenko, O. N. Malyshev, Yu. Ts. Oganessian, A. G. Popeko, R. N. Sagaidak, A. I. Svirikhin, S. Hofmann, G. Berek, I. Brida, and S. Saro, Yad. Fiz. **66**, 1078 (2003) [Phys. At. Nucl. **66**, 1042 (2003)].
5. K. Hauschild, A. V. Yeremin, O. Dorvaux, A. Lopez-Martens, A. V. Belozero, Ch. Briancon, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, S. A. Garcia-Santamaria, V. A. Gorshkov, F. Hanappe, A. P. Kabachenko, A. Korichi, O. N. Malyshev, Yu. Ts. Oganessian, A. G. Popeko, N. Rowley, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **560**, 388 (2006).
6. A. Lopez-Martens, K. Hauschild, A. V. Yeremin, A. V. Belozero, Ch. Briancon, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, D. Curien, O. Dorvaux, B. Gall, V. A. Gorshkov, M. Guttormsen, F. Hanappe, A. P. Kabachenko, F. Khalfallah, A. Korichi, O. N. Malyshev, *et al.*, Phys. Rev. C **74**, 044303 (2006).
7. A. Lopez-Martens, K. Hauschild, A. V. Yeremin, O. Dorvaux, A. V. Belozero, Ch. Briancon, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, D. Curien, P. Desesquelles, B. Gall, V. A. Gorshkov, M. Guttormsen, F. Hanappe, A. P. Kabachenko, F. Khalfallah, A. Korichi, *et al.*, Eur. Phys. J. A **32**, 245 (2007).
8. K. Hauschild, A. Lopez-Martens, A. V. Yeremin, O. Dorvaux, S. Antalic, A. V. Belozero, Ch. Briancon, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, D. Curien, B. Gall, A. Goergen, V. A. Gorshkov, M. Guttormsen, F. Hanappe, A. P. Kabachenko, F. Khalfallah, *et al.*, Phys. Rev. C **78**, 021302 (2008).
9. A. Lopez-Martens, T. Wiborg-Hagen, K. Hauschild, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, D. Curien, O. Dorvaux, G. Drafta, B. Gall, A. Gorgen, M. Guttormsen, A. V. Isaev, I. N. Izosimov, A. P. Kabachenko,

- D. E. Katrsev, T. Kutsarova, A. N. Kuznetsov, *et al.*, Nucl. Phys. A **852**, 15 (2011).
10. A. Yeremin, O. Malyshev, A. Popeko, A. Lopez-Martens, K. Hauschild, and O. Dorvaux, Nucl. Instrum. Methods B **266**, 4137 (2008).
 11. A. Yeremin *et al.*, in *Proceedings of the International Symposium on Exotic Nuclei "EXON-2009", Sochi, Russia, 2009*, Ed. by Yu. E. Penionzhkevich (AIP, Melville, New York, 2010), p. 525.
 12. A. Yeremin, O. Malyshev, A. Popeko, A. Lopez-Martens, K. Hauschild, O. Dorvaux, S. Saro, D. Pantelica, and S. Mullins, Pramana J. Phys. **75**, 3 (2010).
 13. A. V. Yeremin, A. G. Popeko, O. N. Malyshev, A. Lopez-Martens, K. Hauschild, O. Dorvaux, B. Gall, V. I. Chepigin, A. I. Svirikhin, A. V. Isaev, E. A. Sokol, M. L. Chelnokov, A. N. Kuznetsov, A. A. Kuznetsova, A. V. Belozero, K. Rezyunkina, F. Dechery, *et al.*, Письма в ЭЧАЯ **12**, 63 (2015) [Phys. Part. Nucl. Lett. **12**, 35 (2015)].
 14. A. V. Yeremin, A. G. Popeko, O. N. Malyshev, B. Gall, Z. Asfari, A. Lopez-Martens, K. Hauschild, O. Dorvaux, B. N. Gikal, S. L. Bogomolov, V. N. Loginov, V. I. Chepigin, A. I. Svirikhin, A. V. Isaev, E. A. Sokol, M. L. Chelnokov, A. N. Kuznetsov, *et al.*, Письма в ЭЧАЯ **12**, 74 (2015) [Phys. Part. Nucl. Lett. **12**, 43 (2015)].
 15. A. Yeremin, M. S. Tezekbayeva, A. G. Popeko, O. N. Malyshev, A. Lopez-Martens, K. Hauschild, O. Dorvaux, B. Gall, A. V. Isaev, A. V. Karpov, A. N. Kuznetsov, A. A. Kuznetsova, Yu. A. Popov, A. I. Svirikhin, E. A. Sokol, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, *et al.*, Письма в ЭЧАЯ **16**, 207 (2019) [Phys. Part. Nucl. Lett. **16**, 224 (2019)].
 16. H. B. Jeppesen, I. Dragojevic, R. M. Clark, K. E. Gregorich, M. N. Ali, J. M. Allmond, C. W. Beausang, D. L. Bleuel, M. Cromaz, M. A. Deleplanque, P. A. Ellison, P. Fallon, M. A. Garcia, J. M. Gates, J. P. Greene, S. Gros, I. Y. Lee, *et al.*, Phys. Rev. C **79**, 031303(R) (2009).
 17. F. P. Heßberger, S. Antalic, B. Sulignano, D. Ackermann, S. Heinz, S. Hofmann, B. Kindler, J. Khuyagbaatar, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, M. Leino, B. Lommel, R. Mann, K. Nishio, A. G. Popeko, S. Saro, B. Streicher, *et al.*, Eur. Phys. J. A **43**, 55 (2010).
 18. National Nuclear Data Center of Brookhaven National Laboratory. <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
 19. S. Hofmann, EPJ Web Conf. **131**, 06001 (2016).
 20. Yu. Ts. Oganessian and V. K. Utyonkov, Nucl. Phys. A **944**, 62 (2015).
 21. S. Dmitriev, M. Itkis, and Y. Oganessian, EPJ Web Conf. **131**, 08001 (2016).
 22. D. Rudolph, U. Forsberg, P. Golubev, L. G. Sarmiento, A. Yakushev, L.-L. Andersson, A. Di Nitto, Ch. E. Düllmann, J. M. Gates, K. E. Gregorich, C. J. Gross, F. P. Heßberger, R.-D. Herzberg, J. Khuyagbaatar, J. V. Kratz, K. Rykaczewski, M. Schädel, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 112502 (2013).

SPECTROSCOPY OF THE ISOTOPES OF TRANSFERMIUM ELEMENTS IN DUBNA: PRESENT STATUS AND PERSPECTIVES

**A. V. Yeremin^{1),2)}, A. G. Popeko^{1),2)}, O. N. Malyshev^{1),2)}, A. V. Isaev¹⁾, A. A. Kuznetsova¹⁾,
Yu. A. Popov^{1),2)}, A. I. Svirikhin^{1),2)}, E. A. Sokol¹⁾, M. S. Tezekbayeva^{1),3)}, M. L. Chelnokov¹⁾,
V. I. Chepigin¹⁾, A. Lopez-Martens⁴⁾, K. Hauschild⁴⁾, O. Dorvaux⁵⁾, B. Gall⁵⁾, J. Piot⁶⁾,
S. Antalic⁷⁾, P. Mosat⁷⁾, D. Tonev⁸⁾, E. Stefanova⁸⁾**

¹⁾Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²⁾State University "Dubna", Dubna, Russia

³⁾Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

⁴⁾Center for Nuclear and Materials Science, IN2P3-CNRS, Orse, France

⁵⁾Hubert Curien Multi-Disciplinary Institute, IN2P3-CNRS, Strasbourg, France

⁶⁾GANIL, Caen, France

⁷⁾Comenius University, Bratislava, Slovakia

⁸⁾INSNE, Sofia, Bulgaria

Big number of experimental works aimed to the detailed study of radioactive decay properties of the isotopes of transfermium elements using α , β , γ spectroscopy were performed at the FLNR JINR during last 15 years. High intensity accelerated heavy ion beams of ^{22}Ne , ^{48}Ca , ^{50}Ti , and ^{54}Cr from the cyclotron U-400 were used in the experiments with SHELS kinematic separator. For increase of transmission efficiency of the investigated nuclei and registration efficiency for gamma quanta in the future the modernization of the separator and detector system is planned.