

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова

На правах рукописи

Тезекбаева Мерейгуль Сайлаубаевна

**Изучение свойств радиоактивного распада изотопов нобелия
методом α -, β -, γ - спектроскопии**

Специальность 1.3.15 –

«Физика атомных ядер и элементарных части, физика высоких энергий»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2023

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель – **Еремин Александр Владимирович,**
кандидат физико-математических наук,
Лаборатория ядерных реакций
им. Г.Н. Флёрва ОИЯИ
заместитель директора по научной работе

Официальные оппоненты – **Ольга Викторовна Беспалова,**
доктор физико-математических наук,
ОЯР НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова
старший научный сотрудник

Хлебников Сергей Васильевич,
кандидат физико-математических наук,
АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»
ведущий научный сотрудник

Защита состоится «___» _____ 2023 г. в часов на заседании диссертационного совета
ОИЯИ.03.02.2022.П при Объединённом институте ядерных исследований по адресу: 141980, г.
Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, д. 6.

Электронная версия диссертации доступна на официальном сайте ОИЯИ по адресу:
<https://dissertations.jinr.ru>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке
ОИЯИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ОИЯИ.03.02.2022.П,
канд. физ.-мат. наук

Попеко Андрей Георгиевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Изучение свойств радиоактивного распада трансураниевых элементов является одним из актуальных направлений в современной ядерной физике. Большой интерес для понимания структуры тяжелых ядер представляет исследование изомерных состояний. Изучение деформированных ядер трансактинидов особенно интересно, так как в формировании их структуры участвуют одночастичные уровни, которые могут быть актуальны для следующих замкнутых оболочек сферических сверхтяжелых ядер с $Z = 114, 120$, или 126 и $N = 184$. Более того, инверсия стабильности (между основным и изомерным состояниями) демонстрирует значительную роль, которую может сыграть К-изомерия в описании свойств сверхтяжелых ядер. Теоретические предсказания вероятностей деления (и времен жизни) для мульти-квазичастичных состояний с высокими значениями К в сверхтяжелых ядрах все еще вызывают затруднения, что отчасти связано с недостатком экспериментальных данных.

Целью работы является исследование радиоактивных свойств распада изотопов нобелия, образующихся в результате испарения составным ядром от двух до четырех нейтронов в реакции с пучком ^{48}Ca и мишенью ^{204}Pb и асимметричной реакции ^{22}Ne с ^{238}U , с использованием метода α -, β -, γ - спектроскопии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Рассчитать эффективность регистрации γ -квантов германиевыми детекторами системы GABRIELA [1,2].
2. Написать программу анализа экспериментальных данных используя программный объектно-ориентированный пакет ROOT [3].
3. Провести эксперименты, в ходе которых образуются исследуемые изотопы нобелия, и обработать полученные данные.

Изотопы нобелия имеют высокие сечения образования, позволяющие набрать статистику, достаточную для изучения их свойств распада методом α -, β -, γ -спектроскопии. Изотопы нобелия интересны также тем, что позволяют

проследить изменения свойств радиоактивного распада при переходе через деформированную нейтронную подоболочку $N = 152$.

Научная новизна работы:

На защиту выносятся следующие результаты:

1. В экспериментах, проведенных на кинематическом сепараторе SHELS с использованием пучка тяжелых ионов ^{48}Ca и мишени ^{204}Pb , были изучены свойства распадов нейтронодефицитных изотопов ^{249}No , ^{250}No и ^{251}No .
2. Изотоп ^{249}No был синтезирован впервые и идентифицирован по характеристическому α -распаду в дочерние ядра ^{245}Fm и ^{241}Cf . Для изотопа ^{249}No были измерены: функция возбуждения при различных энергиях пучка, энергия α -частиц и период полураспада, дана оценка вероятности спонтанного деления.
3. Для ^{250}No методом корреляций ядер отдачи (ЯО) и осколков спонтанного деления (СД) измерена функция возбуждения. При этом наблюдались события распадов короткоживущего основного состояния и долгоживущего изомерного. Измерены изомерные отношения заселенностей основного и изомерного состояний в зависимости от энергии пучка.
4. Для изотопа ^{256}No , образующегося в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U}$, впервые на основе ЯО- β - α корреляций получены данные, свидетельствующие о наличии изомерного состояния, измерен его период полураспада и дана нижняя оценка энергии возбуждения изомерного состояния. Обсуждается природа данного изомерного состояния.
5. Изучен α -распад изотопа ^{253}Rf , образующегося в реакции $^{50}\text{Ti} + ^{204}\text{Pb}$, приводящий к дочернему ядру ^{249}No . Предложена возможная схема распада ^{253}Rf через ^{249}No в ^{245}Fm . Для ^{245}Fm на основе полученных экспериментальных данных была установлена новая мода распада (электронный захват или β^+) и приведена ее вероятность.
6. Выполнены расчеты эффективности регистрации γ -квантов в двух различных конфигурациях германиевых детекторов системы GABRIELA.

Практическая значимость работы: результаты, лежащие в основе диссертации, включая ее выводы, могут быть использованы при планировании экспериментов по α , β , γ спектроскопии изотопов 112 – 116 элементов с использованием пучков ускоренных ионов ^{48}Ca циклотрона ДЦ-280 (Фабрика СТЭ) и мишенями ^{238}U , ^{242}Pu и ^{248}Cm . В этих экспериментах планируется использование хорошо изученной и зарекомендовавшей себя комбинированной детектирующей установки GABRIELA.

Личный вклад автора:

Автор принимал активное участие в проведении экспериментов, в обработке и обсуждении полученных экспериментальных данных.

Автором созданы вычислительные коды на языке программирования C++, реализуемые в программном пакете ROOT, используемые для обработки экспериментальных данных, поиска корреляционных событий и мониторинга характеристик пучка.

На основе моделирования методом Монте-Карло, выполненного с использованием программного пакета GEANT4, автор рассчитала эффективность регистрации германиевых γ -детекторов в действующей конфигурации (четыре однокристалльных детектора и один детектор клеверного типа) детектирующей системы GABRIELA, а также произвела расчеты для будущей конфигурации с участием пяти детекторов клеверного типа.

Достоверность и обоснованность изложенных в работе результатов и выводов подтверждается их согласованностью с существующими систематиками и с известными характеристиками радиоактивного распада изотопов тяжелых элементов.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены автором на 7 международных конференциях и совещаниях, на 55-ой сессии ПКК по ядерной физике, 131-ой сессии Ученого Совета ОИЯИ.

Часть материалов диссертации вошла в цикл научно-исследовательских экспериментальных работ « *α - γ -спектрометрия и свойства распада*

изотопов $^{249,252,254,256}\text{No}$ и $^{253,254,257}\text{Rf}$ », удостоенный второй премии ОИЯИ за 2021 год (в соавторстве).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 работах в рецензируемых изданиях.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 100 страниц, включая 56 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 121 наименование.

Содержание работы

Во **введении** сформулированы цель исследований, актуальность и научная новизна работы. Определена практическая значимость, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена применению кинематического сепаратора SHELS (модернизированный сепаратор ВАСИЛИСА) [4–7] и комбинированной детектирующей системе GABRIELA [1,2,A9] для изучения радиоактивных свойств распада тяжелых элементов.

В 2013 году сепаратор SHELS (Separator for Heavy Element Spectroscopy), образованный в результате проведения глубокой модернизации электростатического сепаратора ВАСИЛИСА [8] (рисунок 1а), прошел вакуумные и высоковольтные тесты [4–6]. Основная модернизация заключалась в замене участка сепарации продуктов реакций полного слияния по электрической жесткости на сепарирующую секцию по скоростям (фильтр скоростей).

Кинематический сепаратор SHELS (рисунок 1б) включает в себя: вращающуюся мишень, облучаемую пучком ускоренных ионов, выводимых ускорителем У-400; первый триплет квадрупольных линз, который фокусирует вылетевшие из мишени ЯО; следующая секция представляет собой последовательно чередующиеся электростатические и магнитные дефлекторы, сепарирующие ЯО от фоновых продуктов ядерных реакций в соответствии с разницей их скоростей (фильтр скоростей); второй триплет квадрупольных линз

фокусирует отсепарированные ЯО в фокальную плоскость сепаратора, где располагаются детекторы. Перед фокальной плоскостью располагается 8-градусный дипольный магнит, который позволяет дополнительно очистить ЯО от рассеянного пучка. Экспериментальный зал и детектирующая установка отделены бетонной стеной толщиной в 2 м, что создает благоприятные фоновые условия в области детектирующей системы. В фокальной плоскости сепаратора располагается времяпролетная система (ToF) и комплексная детектирующая система GABRIELA, в которую транспортируются изучаемые ядра. Расстояние между пластинами электростатических дефлекторов может изменяться от 10 до 20 см, что позволяет изменять апертуру установки, напряженность и максимальную напряженность электрического поля.

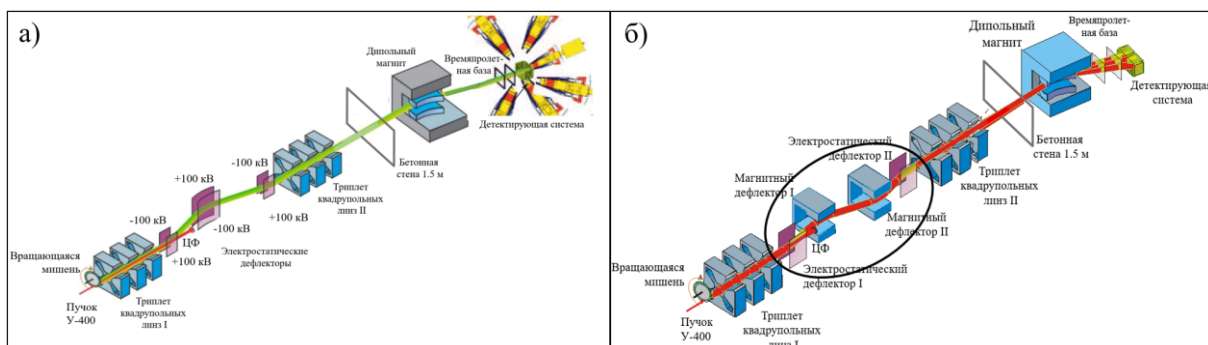


Рисунок 1. а) Схема электростатического сепаратора ВАСИЛИСА и детектирующей сборки в фокальной плоскости сепаратора, б) схема сепаратора SHELS, в фокальной плоскости которого располагается детектирующая система.

Черным цветом выделена сепарирующая секция (фильтр скоростей), подвергшаяся модернизации.

Детектирующая система GABRIELA представляет собой сборку из полупроводниковых детекторов [2]. Она состоит из кремниевых детекторов, представляющих собой прямоугольный колодец (рисунок 2б) в геометрии близкой к 4π , дном которого служит фокальный двухсторонний кремниевый многостриповый (128 горизонтальных и 128 вертикальных стрипа) детектор DSSD (Double side Silicon Strip Detector) большого размера $100 \times 100 \text{ мм}^2$ толщиной 500 мкм (рисунок 2а). Стены «колодца» представляют собой 8 боковых DSSD

детекторов размером 50×60 мм² и толщиной 700 мкм состоящие из 16 горизонтальных и 16 вертикальных стрипов.

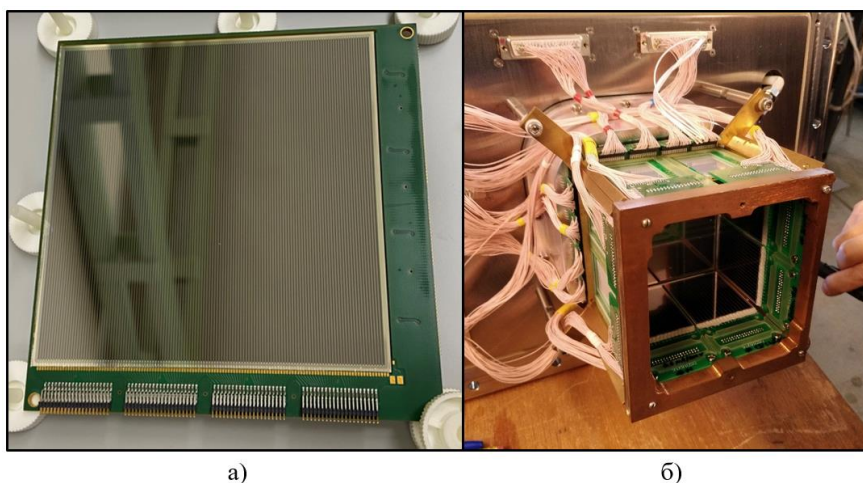


Рисунок 2. а) Фокальный DSSD детектор. Вид с лицевой стороны, видны 128 стрипов. б) «Колодец» из кремниевых полупроводниковых детекторов, дном которого служит фокальный DSSD детектор, стенками - боковые детекторы.

Вокруг кремниевой сборки располагаются однокристалльные германиевые детекторы и, как показано на рисунке 3, максимально близко к фокальному DSSD детектору располагается германиевый детектор клеверного типа (Clover-детектор).

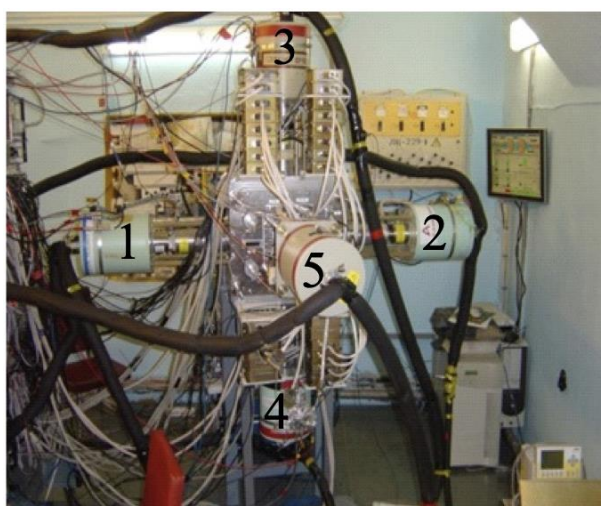


Рисунок 3. Полная сборка германиевых детекторов комбинированной детектирующей системы GABRIELA. Цифрами обозначены с 1–4 - коаксиальные однокристалльные γ -детекторы, расположенные вокруг кремниевого «колодца», 5 - Clover-детектор, расположенный сразу за фокальным DSSD детектором.

Кремниевые детекторы обеспечивают регистрацию ЯО, α -, β -частиц и осколков СД в геометрии близкой к 4π . Германиевые детекторы предназначены для регистрации рентгеновского излучения и γ -квантов. Энергетическое разрешение детекторов и пороги (минимальный уровень отсечки по энергиям в электронных трактах) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Разрешение и пороги детекторной системы GABRIELA [2].

Тип полупроводникового детектора		Энергетическое разрешение (ПШПВ), кэВ	Пороги, кэВ
Кремниевые	Фокальный DSSD детектор	11 для энергии 320 кэВ (КЭ) 23 для энергии 7,92 МэВ (α)	40–60
	Боковые детекторы	14 для 320 кэВ (КЭ) 120 для энергии 7,92 МэВ (α)	60–100
Германиевые детекторы		2,3 при 1332,5 кэВ (γ)	~15

Для сборки германиевых детекторов в конфигурации четырех однокристалльных и одного Clover-детектора был проведен расчет эффективности регистрации γ -квантов методом Монте-Карло с использованием программного пакета GEANT4. На рисунке 4 черным цветом показана расчетная полная эффективность германиевых γ -детекторов в текущей конфигурации, где для энергии γ -квантов 700 кэВ эффективность составляет порядка 10 %, а для 100 кэВ она составляет 28 %.

В 2022 году была проведена модернизация детектирующей системы GABRIELA с целью повышения эффективности регистрации и увеличения гранулярности (количество германиевых кристаллов увеличилось в 2,5 раза), необходимой для разделения многофотонных каскадов, которые сопровождают распад высокоспиновых К-изомеров. Увеличение эффективности регистрации γ -квантов позволит регистрировать рентгеновское L излучение более тяжелых ядер,

детальнее изучить внутреннюю структуру изомеров. Таким образом, в новой версии детектирующей системы произошла замена четырех однокристалльных германиевых детектора на четыре Clover-детектора, в той же геометрической конфигурации (см. рисунок 5).

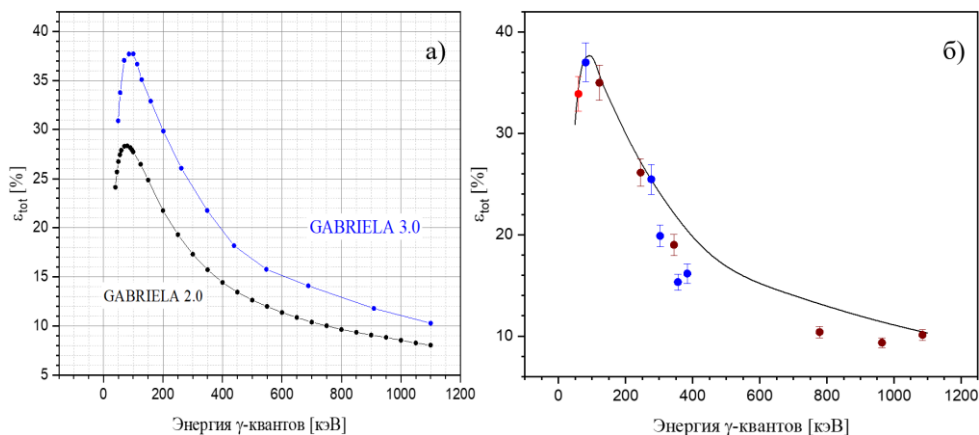


Рисунок 4. Расчет эффективности регистрации германиевых γ -детекторов методом Монте-Карло в GENAT4. а) GABRIELA 2.0 - смоделированные расчеты для детектирующей системы состоящей из четырех однокристалльных и одного Clover-детектор, GABRIELA 3.0 - расчеты для модернизированной детектирующей системы, состоящей из пяти германиевых Clover-детекторов. б) Экспериментальный расчет эффективности регистрации γ -детекторов модернизированной системы GABRIELA при помощи тестовых источников. Красная точка – данные по ^{241}Am , синие точки – ^{133}Ba и коричневые – ^{152}Eu .

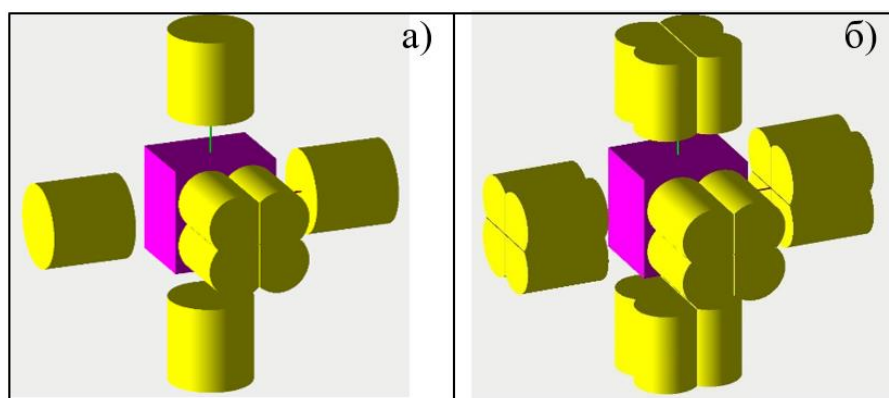


Рисунок 5. Схематическое расположение γ -детекторов регистрирующей системы GABRIELA: а) массив германиевых γ -детекторов (показан желтым цветом) представляет собой четыре однокристалльных и один четырех-кристалльный Clover-детектор, б) в новой модернизированной версии четыре однокристалльных детектора заменены на четыре Clover-детектора.

Были проведены первые эксперименты с модернизированной детектирующей системой GABRIELA по проверке расчетов эффективности регистрации германиевых Clover-детекторов при помощи γ -источников ^{133}Ba , ^{152}Eu и ^{241}Am . На рисунке 4б показаны результаты расчетов эффективности регистрации, проведенных в GEANT4, и – экспериментальные данные с использованием γ -источников. Расчеты хорошо совпадают с экспериментальными данными в области энергий ниже 200 кэВ, а в области энергий выше 200 кэВ расхождение расчетов с экспериментом составляет не больше 25 %.

На рисунке 4а синим цветом показан расчет эффективности регистрации γ -квантов для пяти Clover-детекторов, эффективность значительно возросла, для энергии 700 кэВ она составляет 14 % и порядка 38 % для энергии γ -квантов 100 кэВ.

Вторая глава посвящена описанию методики изучения радиоактивных свойств тяжелых ядер при помощи α -, β -, γ -спектроскопии.

Ядра - остатки испарения реакций полного слияния тяжелых ускоренных ионов с ядрами мишеней, отделяются сепаратором от частиц пучка, продуктов фоновых реакций и, после пролета ТоF детектора, имплантируются в фокальный позиционно-чувствительный детектор. Цепочки последовательных распадов происходят и регистрируются в тех же позициях, куда имплантируются исследуемые ЯО. В результате, регистрируя генетически связанные цепочки распадов, можно определять энергии и типы распадов (α , β , γ), а также временные интервалы между распадами. На рисунке 6 показан корреляционный спектр ЯО- α для реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb}$. На спектре по оси абсцисс хорошо идентифицируется энергия α -линий, а по оси ординат – время жизни.

Следует отметить, что для состояний с периодом полураспада менее 500 мксек сигнал от радиоактивного распада в фокальном DSSD детекторе может возникнуть на “хвосте” сигнала от имплантации ЯО. Это может привести к искажению в измерении реальной величины энергии (пример выделен красным

прямоугольником на рисунке б). Существует зависимость измеренной величины энергии от разницы во времени между имплантированными ЯО и самим распадом. Данный эффект наложения описывается в работе [9], где авторами была выполнена энергетическая поправка для быстрых распадов, зависящая от временного интервала между измеренной амплитудой от сигналов распадов после сигнала ЯО.

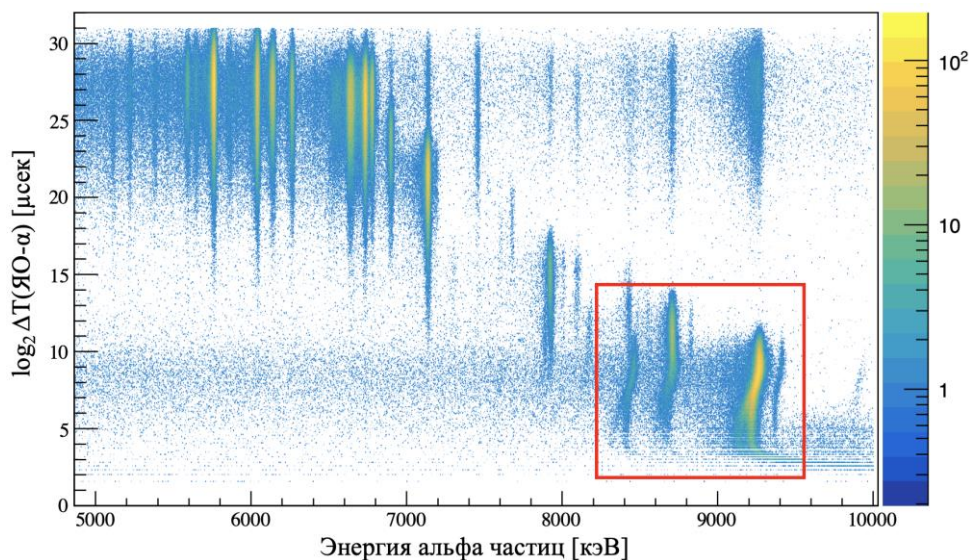


Рисунок 6. Коррелированный спектр α -частиц реакции $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb}$ в зависимости от разницы времен между зарегистрированными ЯО и последующими α -распадами в одном и том же пикселе.

Третья глава посвящена анализу и обсуждению полученных экспериментальных данных по изучению радиоактивных свойств распада изотопов нобелия. В ЛЯР ОИЯИ была проведена серия экспериментов по изучению свойств распада нейтронодефицитных изотопов нобелия в реакции полного слияния $^{204}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, xn)^{252-x}\text{No}$ [A1–A4]. Эксперимент проводился с использованием вращающейся мишени ^{204}PbS , толщиной $0,47 \pm 0,10 \text{ мг/см}^2$, изготовленной методом электроосаждения на 1,5 мкм титановой подложке. Обогащение мишени по изотопу ^{204}Pb составило 99,94 %, примеси: ^{206}Pb - 0,04 %, ^{207}Pb - 0,01 %, ^{208}Pb - 0,01 %. Использовался пучок тяжелых ионов ^{48}Ca ускоренный циклотроном У-400 ЛЯР со средней интенсивностью 0,5 мкА · ч. ЯО, образовавшиеся в реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb}$ и выбитые из мишени, выделялись и

транспортировались при помощи сепаратора SHELS, затем регистрировались в детектирующей системе GABRIELA. Эффективность транспортировки ЯО для вышеуказанной реакции составляет порядка 30–40 % в зависимости от ионно-оптических настроек сепаратора [5–7]. Облучение проводилось при различных энергиях пучка от 213 до 235 МэВ, с целью измерения функций возбуждения испарительных каналов реакции. Были измерены функция возбуждения для $1n$, $2n$ и $3n$ каналов (рисунок 7).

В ходе эксперимента в $3n$ испарительном канале реакции впервые был синтезирован изотоп ^{249}No , который был идентифицирован на основе генетического корреляционного анализа с дочерними изотопами известных ядер ^{245}Fm и ^{241}Cf . Для нового изотопа был измерен период полураспада $T_{1/2} = 38,3 \pm 2,8$ мсек и энергия α -частиц 9129 ± 22 кэВ. Сечение образования $\sigma(3n) = 0,47 \pm 0,04$ нб было измерено при энергии пучка 225,4 МэВ в середине мишени, что соответствует рассчитанному максимуму функции возбуждения. Дан верхний предел вероятности спонтанного деления для изотопа ^{249}No (по одному событию), который составил $b_{\text{сд}} < 6,9 \cdot 10^{-3}$. В ходе анализа энергетических спектров α -частиц ^{249}No и его дочернего ядра ^{245}Fm наблюдается уширение пика материнского ядра, в следствие чего, предполагается наличие тонкой структуры в α -распаде ^{249}No . Это может быть объяснено тем, что α -распад ^{249}No заселяет низколежащие возбужденные состояния в дочернем ядре.

На основе полученных экспериментальных данных и проведенного моделирования сценариев распада ^{249}No в ^{245}Fm [A1] и ^{253}Rf в ^{249}No [A5], а также систематики основных и возбужденных состояний для изотонов с нейтронным числом $N = 147$, была предложена возможная схема распада ^{253}Rf через ^{249}No в ^{245}Fm (рисунок 8). Для ^{245}Fm на основе полученных экспериментальных данных была установлена новая мода распада (электронный захват или β^+) с вероятностью $b_{\text{эз}/\beta^+} = 11,5_{-5,0}^{+6,8}$ %.

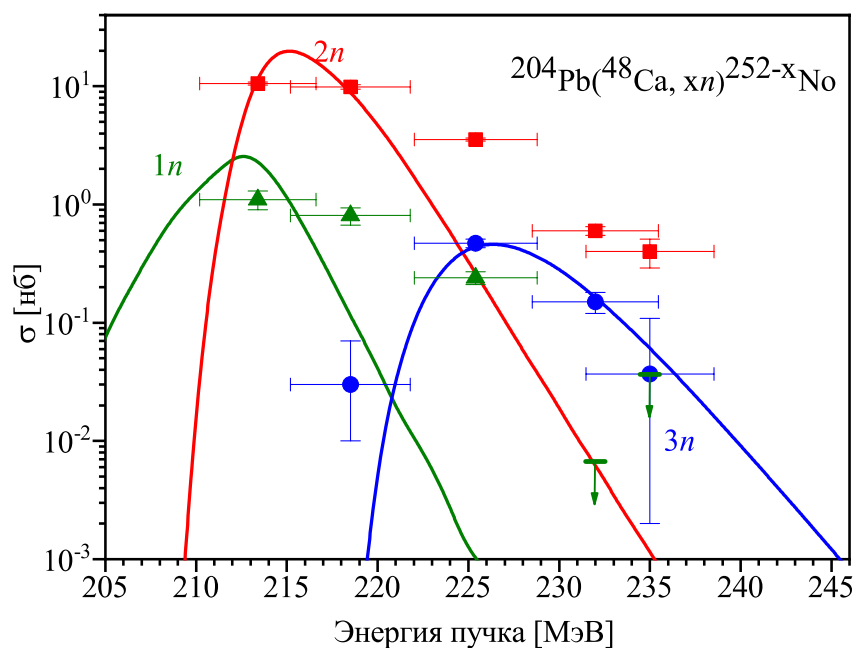


Рисунок 7. Сечение образования для реакции полного слияния изотопов нобелия образованных в $1n$ каналах реакции $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb} \rightarrow ^{252}\text{No}^*$ в зависимости от энергии пучка в середине мишени. Теоретические расчеты NRV представлены сплошными кривыми [10,11]. Измеренные сечения образования для $1n$ канала (^{251}No) обозначены сплошными зелеными треугольниками, для двух последних точек по энергии (231 и 235 МэВ) установлены пределы по сечениям. Красными квадратами представлены сечения образования $2n$ канала (^{250}No). Измеренные сечения образования $3n$ канала (новый изотоп ^{249}No) обозначены синими кружками.

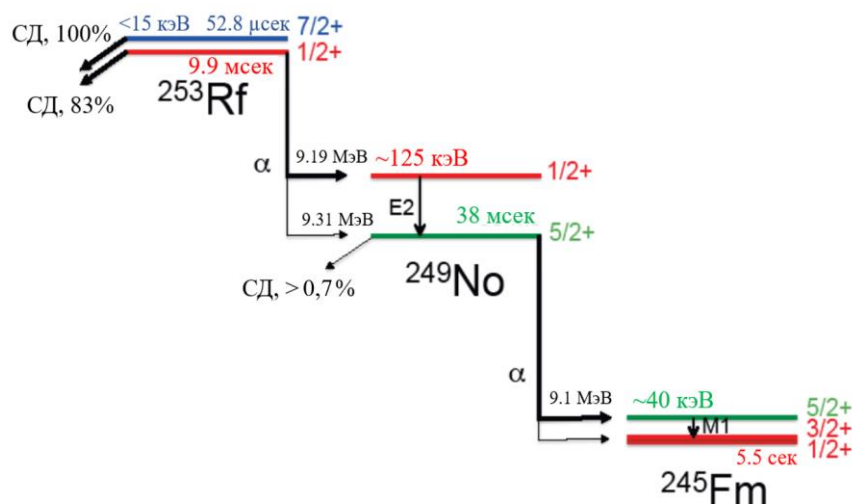


Рисунок 8. Предполагаемая схема распада ^{253}Rf через ^{249}No в ^{245}Fm полученная по данным из описываемого эксперимента и по данным из работы [A5].

Изотоп ^{250}No был синтезирован в $2n$ испарительном канале реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb}$. Полное сечение образования для $2n$ канала реакции определялось с учетом общего числа зарегистрированных ЯО с последующим событием СД в том же пикселе DSSD детектора. Корреляции ЯО-СД для ^{250}No представляют собой события короткоживущего основного состояния с периодом полураспада $4,7 \pm 0,1$ мксек и долгоживущего высокоспинового К-изомерного состояния с периодом полураспада $37,2 \pm 0,9$ мксек, спин которого, вероятнее всего, имеет значение $I = K = 6^+ \hbar$ [12].

В ходе анализа экспериментальных данных, была обнаружена разница в относительной заселенности основного и изомерного состояний в зависимости от энергии пучка. На рисунке 9 показано изменение отношения изомерного состояния к общему числу всех событий СД для ^{250}No в зависимости от энергии пучка. Причиной такого поведения может быть повышенный вклад высокоспиновых состояний в образование ЯО при высоких энергиях пучка (более высокая энергия возбуждения составного ядра), поскольку парциальные волны с более высокими угловыми моментами могут способствовать повышению вероятности слияния.

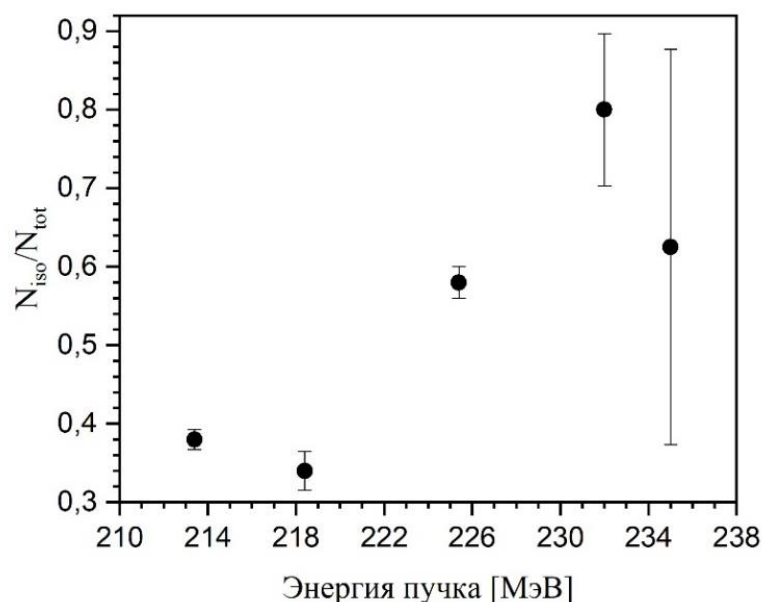


Рисунок 9. Изменение отношения заселенности уровней N_{iso}/N_{tot} в зависимости от энергии пучка в середине мишени в ^{250}No . N_{iso} -события долгоживущего изомерного состояния, N_{tot} -общее число всех событий СД изотопа ^{250}No , образованных в ходе всего облучения.

Для ^{250}No при энергии пучка в середине мишени 213 МэВ была набрана высокая статистика (13680 ядер) и получена новая спектроскопическая информация. Были получены спектры зарегистрированных γ -квантов и конверсионных электронов (КЭ), которым предшествовали имплантированные ЯО с последовательным делением основного состояния ^{250}No . На спектре γ -квантов отчетливо наблюдаются четыре пика с энергией 114, 176, 912 и 1088 кэВ, и на спектре КЭ видны линии переходов 114 и 176 кэВ. Разница в энергиях между переходами 912 кэВ и 1088 кэВ соответствует линии с энергией 176 кэВ, в связи с чем, предполагается, что два фотона заселяют состояния различающихся на данное значение энергии. Полученная новая спектроскопическая информация для ^{250}No , а именно γ -переходы 114 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}No и ^{252}No [13]. Следовательно, по мере удаления от деформированной нейтронной подоболочки $N = 152$, для полосы основного состояния переход с энергией 176 кэВ, вероятнее всего, является переходом $6^+ \rightarrow 4^+$ в ядре ^{250}No , а переход 114 кэВ - переходом $4^+ \rightarrow 2^+$. Из линейной экстрополяции значение 49 кэВ было получено для перехода $2^+ \rightarrow 0^+$ [14].

Изотоп ^{251}No был синтезирован в $1n$ канале реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb}$. При обработке данных было найдено порядка 420 событий ЯО- α корреляций для данного изотопа в фокальном DSSD детекторе, при поиске учитывалось основное и изомерное состояния данного изотопа, две α -линии которых видны в совпадении с дочерним ядром ^{247}Fm с энергиями $E_\alpha(^{251}\text{No}) = 8616 \pm 13$ кэВ и $E_\alpha(^{251m}\text{No}) = 8668 \pm 11$ кэВ, что согласуется с ранее опубликованными данными работы [15].

Для изотопа ^{256}No , синтезированного в асимметричной реакции полного слияния $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U}$, приводится первое свидетельство о наличии по крайней мере, одного высокоспинового К-изомера, по 15 обнаруженным событиям ЯО- α корреляций. Предполагая наличие только одного изомера, измеренный период полураспада составил $7,8_{-2,6}^{+8,3}$ мксек. Для обнаруженных 15 событий изомерного

распада производился поиск γ -квантов, и было найдено 13 γ -квантов, которые могут быть отнесены к распаду ^{256m}No . Полученные данные позволяют установить нижний предел для энергии возбуждения нового изомерного состояния (-ий) ^{256m}No в 1089 кэВ. Обсуждается возможная конфигурация двухквaziчастичного состояния, где подчеркивается возможная роль состояний $\nu_2 7^-$ и $\nu_2 5^-$.

При анализе данных экспериментов по изучению радиоактивных свойств распада изотопа ^{253}No на кинематическом сепараторе ВАСИЛИСА [16,17], были получены новые спектроскопические данные по распаду долгоживущего изомера (возможно изомеров) в ^{253}No . Величины интенсивностей γ -линий и наличие γ -е совпадений были использованы для составления приблизительной схемы распада и установления ограничения по спину и энергии возбуждения изомера(-ов). В частности, самый интенсивный переход 801,8 кэВ, как выяснилось по совпадениям между рентгеновским излучением и КЭ, является M1 переходом. Распад изомера(-ов) с периодом полураспада 0,7 мсек проходит через, по крайней мере одну, промежуточную быстрораспадающуюся структуру, которая в свою очередь, распадается (в основном через переход 801,8 кэВ, но также и через 714,3 кэВ) на полосу основного состояния ^{253}No . Необходимы дополнительные данные (в частности по γ - γ совпадениям) для того чтобы установить полную схему распада и решить вопрос о возможности существования более чем одного изомерного состояния.

В **заклyчении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Для выполнения поставленных задач по исследованию радиоактивных свойств распада изотопов нобелия, образующихся в результате испарения составным ядром от двух до четырех нейтронов в реакции с пучком ^{48}Ca и мишенью ^{204}Pb и асимметричной реакции ^{22}Ne с ^{238}U , с использованием метода α -, β -, γ - спектроскопии, были проведены обработка и анализ экспериментальных данных, которые заключаются в следующем:

- Измерена функция возбуждения для $1n$, $2n$ и $3n$ испарительных каналов реакции $^{204}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},xn)^{252-x}\text{No}$ при различных энергиях пучка.
 - Обнаружена новая активность ($T_{1/2} = 38,3 \pm 2,8$ мс, $E_\alpha = 9129 \pm 22$ кэВ), которая была отнесена к распаду нового изотопа ^{249}No , образованного в $3n$ испарительном канале реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{204}\text{Pb}$.
 - Определено, что основному состоянию ^{249}No соответствует нейтронная конфигурация $5/2^+[622]$ и установлена возможная схема распада ^{253}Rf через ^{249}No в ^{245}Fm , с учетом полученных данных из работы [A5] о свойствах α -распад изотопа ^{253}Rf , образующегося в реакции $^{50}\text{Ti} + ^{204}\text{Pb}$, приводящий к дочернему ядру ^{249}No .
 - Определен верхний предел вероятности СД нового изотопа $b_{\text{СД}} < 6,9 \cdot 10^{-3}$.
 - Установлена новая мода распада для ^{245}Fm (EC/β^+ -распад) с вероятностью $b_{\text{ЭЗ}/\beta^+} = 11,5_{-5,0}^{+6,8}$ %, подтверждаемая предыдущими оценками [18].
 - Измерены изомерные отношения заселенностей основного и изомерного состояний для ^{250}No в зависимости от энергии пучка.
 - Получены новые данные на основе ЯО- β - α корреляций, свидетельствующие о наличии изомерного состояния ^{256}No .
 - Измерен период полураспада и дана нижняя оценка энергии возбуждения изомерного состояния для ^{256}No . Обсуждена природа данного изомерного состояния.
2. Проведен расчет эффективности регистрации γ -квантов в двух различных конфигурациях германиевых детекторов системы GABRIELA методом Монте-Карло в программном пакете GEANT4.

Публикации автора по теме диссертации

- A 1. **M. S. Tezekbayeva**, A.V.Yeremin, A. I. Svirikhin, A. Lopez-Martens, M.L.Chelnokov, V. I. Chepigin, A. V. Isaev, I.N.Izosimov, A.V.Karpov, A. A. Kuznetsova, O. N. Malyshev, R. S. Mukhin, A. G. Popeko, Yu. A. Popov, V. A. Rachkov, B. S. Sailaubekov, E. A. Sokol, K. Hauschild, H. Jacob, R. Chakma, O.Dorvaux, M. Forge, B.Gall, K. Kessaci, B. Andel, S. Antalic, A. Bronis, P. Mosat, Study of the production and decay properties of neutron-deficient nobelium isotopes // Eur. Phys. J A. – 2022. – Vol. 52, № 52.
- A 2. **М. С. Тезекбаева**, А. В. Еремин, О. Н. Малышев, А. В. Исаев, Р. С. Мухин, А. А. Кузнецова, А. Г. Попеко, Ю. А. Попов, А. И. Свирихин, Е. А. Сокол, М. Л. Челноков, В. И. Чепигин, А. Лопез-Мартенс, К. Хошильд, О. Дорво, Б. Галл, Б. С. Сайлаубеков, Спектроскопия свойств распада трансфермиевых элементов в Дубне // Известия РАН. Сер. Физическая. – 2021. – Т. 85, № 10. – С. 1495–1500.
- A 3. **M.S. Tezekbayeva**, A.V. Yeremin, O.N. Malyshev, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, A.V. Isaev, A.V. Karpov, A.A. Kuznetsova, A.G. Popeko, Yu.A. Popov, A.I. Svirikhin, E.A. Sokol, A. Lopez-Martens, K. Hauschild, O. Dorvaux, B. Gall, P. Mosat, B.S. Sailaubekov, Detailed study of Rf and No isotopes radioactive decay properties // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2019. – V. 3. №4. – P. 300.
- A 4. А.И.Свирихин, А.В.Ерёмин, Н.И.Замятин, И.Н.Изосимов, А.В.Исаев, А.А.Кузнецова, О.Н.Малышев, Р.С.Мухин, А.Г.Попеко, Ю.А.Попов, Е.А.Сокол, Б.Сайлаубеков, **М.С. Тезекбаева**, М.Л.Челноков, В.И.Чепигин, Б.Андел, С.Анталик, А.Бронис, П.Мошат, Б.Галл, О.Дорво, А.Лопез-Мартенс, К.Хошил, Новый изотоп ^{249}No // Письма в ЭЧАЯ. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 356-361.
- A 5. A. Lopez-Martens, K. Hauschild, A. I. Svirikhin, Z. Asfari, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, O. Dorvaux, M. Forge, B. Gall, A. V. Isaev, I. N. Izosimov, K. Kessaci, A. A. Kuznetsova, O. N. Malyshev, R. S. Mukhin, A. G. Popeko, Yu. A. Popov, B. Sailaubekov, E. A. Sokol, **M. S. Tezekbayeva** and A. V. Yeremin, Fission

- properties of ^{253}Rf and the stability of neutron-deficient Rf isotopes // *Phys. Rev. C.* – 2022. – Vol. 105, № 2. – P. 50–53.
- A 6. *K. Kessaci, B. J. P. Gall, O. Dorvaux, A. Lopez-Martens, R. Chakma, K. Hauschild, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, M. Forge, A. V. Isaev, I. N. Izosimov, D. E. Katrasev, A. A. Kuznetsova, O. N. Malyshev, R. Mukhin, J. Piot, A. G. Popeko, Yu. A. Popov, E. A. Sokol, A. I. Svirikhin, M. S. Tezekbayeva and A. V. Yeremin*, Evidence of high-K isomerism in ^{256}No // *Phys. Rev. C.* – 2021. – Vol. 104, № 4. – P. 044609:1–6.
- A 7. *Еремин А. В., Попеко А. Г., Малышев О. Н., Исаев А. В., Кузнецова А. А., Попов Ю. А., Свирихин А. И., Сокол Е. А., Тезекбаева М. С., Челноков М. Л., Чепигин В. И., Лопез-Мартен А., Хошильд К., Дорво О., Галл Б., Пио Ж., Анталиц С., Мошат П., Тонев Д., Стефанова Е.*, Спектроскопия свойств распада трансфермиевых элементов в Дубне: современное состояние и перспективы // *Ядерная физика.* – 2020. – Т. 83, №4. – С. 278–287.
- A 8. *A. Yeremin, A. Lopes-Martens, K. Hauschild, A. Popeko, O. Malyshev, V. Chepigin, A. Svirikhin, A. Isaev, Yu. Popov, M. Chelnokov, A. Kuznetsova, O. Dorvaux, B. Gall, Z. Asfari, M. Tezekbaeva, J. Piot, S. Antalic*, Velocity filter SHELS: Performance and experimental results // *Nucl. Instr. and Meth.* B. – 2020. – V. 463. – P. 2019–2020.
- A 9. *K. Hauschild, R. Chakma, A. Lopez-Martens, K. Rezyunkina, V. Alaphillipe, L. Gibelin, N. Karkour, D. Linget, A.V. Yeremin, A.G. Popeko, O.N. Malyshev, V.I. Chepigin, A.I. Svirikhin, A.V. Isaev, E.A. Sokol, M.L. Chelnokov, Yu.A. Popov, D.E. Katrasev, A.N. Kuznetsov, A.A. Kuznetsova, M.S. Tezekbayeva, O. Dorvaux, B.J.P. Gall, P. Brionnet, K. Kessaci, C. Mathieu*, New Front and Back-End Electronics for the Upgraded GABRIELA Detection System // *Int. Symp. On Exotic Nuclei, EXON18* / Ed. By Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev; Petrozavodsk, 2018. Singapore: World Scientific. – 2020. – P. – 403–409.

Список литературы

1. Hauschild K. et al. GABRIELA: A new detector array for γ -ray and conversion electron spectroscopy of transfermium elements // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. – 2006. – Vol. 560, № 2. – P. 388–394.
2. Chakma R. et al. Gamma and conversion electron spectroscopy using GABRIELA // Eur. Phys. J. A. Springer Berlin Heidelberg, – 2020. – Vol. 56, № 10. – P. 1–10.
3. Brun R., Rademakers F. ROOT - An object oriented data analysis framework // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. – 1997. – Vol. 389, № 1–2. – P. 81–86.
4. Yeremin A. V. et al. Experimental tests of the modernized VASSILISSA separator (SHELS) with the use of accelerated ^{50}Ti ions // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2015. – Vol. 12, № 1. – P. 43–47.
5. Yeremin A. V. et al. First experimental tests of the modernized VASSILISSA separator // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2015. – Vol. 12, № 1. – P. 35–42.
6. Popeko A.G. et al. Separator for Heavy Element Spectroscopy - Velocity filter SHELS // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. Elsevier B.V., – 2016. – Vol. 376. – P. 140–143.
7. Yeremin A. et al. First experimental tests of the kinematic separator SHELS (Separator for Heavy Element Spectroscopy). // EPJ Web Conf. – 2015. – Vol. 86. – P. 4–6.
8. Yeremin A. V. et al. The kinematic separator VASSILISSA performance and experimental results // Nucl. Inst. Methods Phys. Res. A. – 1994. – Vol. 350, № 3. – P. 608–617.
9. Mosat P. et al. K isomerism in ^{255}Rf and total kinetic energy measurements for spontaneous fission of $^{255,256,258}\text{Rf}$ // Phys. Rev. C. – 2020. – Vol. 101, № 3. – P. 1–12.

10. Karpov V. et al. NRV web knowledge base on low-energy nuclear physics // *Phys. At. Nucl.* – 2016. – Vol. 79, № 5. – P. 749–761.
11. Karpov A. V. et al. NRV web knowledge base on low-energy nuclear physics // *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. Elsevier B.V.*, – 2017. – Vol. 859, № December 2016. – P. 112–124.
12. Kallunkathariyil J. et al. Stability of the heaviest elements: K isomer in ^{250}No // *Phys. Rev. C.* – 2020. – Vol. 101, № 1. – P. 1–6.
13. Sonzogni A. NNDC Chart of Nuclides // *Int. Conf. Nucl. Data Sci. Technol.* – 2007. – № 029. <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>
14. А Ефимов, Изосимов И. Систематика ираст-полос в области тяжелых и сверхтяжелых четно-четных ядер // *Письма в ЭЧАЯ.* – 2021. – Vol. 6, № 238. – P. 551–559.
15. Heßberger F.P. et al. Alpha-gamma decay studies of ^{255}Rf , ^{251}No and ^{247}Fm // *Eur. Phys. J. A.* – 2006. – Vol. 30, № 3. – P. 561–569.
16. Lopez-Martens A. et al. Isomeric states in ^{253}No // *Eur. Phys. J. A.* – 2007. – Vol. 32, № 3. – P. 245–250.
17. Lopez-Martens A. et al. Spectroscopy of ^{253}No and its daughters // *Nucl. Phys. A. Elsevier B.V.*, – 2011. – Vol. 852, № 1. – P. 15–35.
18. Khuyagbaatar J. et al. α decay of $^{243}\text{Fm}_{143}$ and $^{245}\text{Fm}_{145}$, and of their daughter nuclei // *Phys. Rev. C.* – 2020. – Vol. 102, № 4. – P. 1–8.