

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ им. Г. Н. ФЛЕРОВА

В 2011 г. научная программа Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова в области физики тяжелых ионов включала в себя эксперименты по синтезу и исследованию свойств тяжелых и экзотических ядер с использованием пучков ускоренных ионов стабильных и радиоактивных изотопов, изучение механизма ядерных реакций, развитие ускорительной техники, изучение взаимодействия тяжелых ионов с конденсированными средами, а также прикладные исследования. Эти направления исследований были представлены в трех лабораторных темах:

- синтез и свойства ядер на границах стабильности (9 проектов);
- радиационные эффекты и физические основы нанотехнологий, радиоаналитические и радиоизотопные исследования на ускорителях ЛЯР (5 проектов);
- ускорительный комплекс пучков ионов стабильных и радиоактивных нуклидов (проект DRIBs-III) (5 проектов).

Время работы основных ускорителей ЛЯР в 2011 г. составило 11500 часов.

СИНТЕЗ НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В 2011 г. проведена серия экспериментов по измерению функции возбуждения реакции полного слияния $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, xn)^{291-x}115$ и изучению радиоактивных свойств изотопов элемента 115. Работа выполнена на газонаполненном сепараторе ЛЯР ОИЯИ в сотрудничестве с лабораториями в Ок-Ридже (ORNL), Ливерморе (LLNL) и Нашвилле (VU) [1, 2].

Эксперименты проведены при трех энергиях ускоренных на циклотроне У-400 ионов ^{48}Ca : 240, 243 и 248 МэВ с дозами $16,5 \cdot 10^{18}$, $3,3 \cdot 10^{19}$ и $3,7 \cdot 10^{19}$. В трех опытах зарегистрирована 21 цепочка распадов изотопа $^{288}115$, три ядра которого были впервые синтезированы в 2003 г. при энергии 248 МэВ (см. рис. 1). Свойства распада всех шести ядер: $^{288}115$, $^{284}113$, ^{280}Rg , ^{276}Mt , ^{272}Bh и ^{268}Db , полученных в 2003 г. и в данных экспериментах, полностью совпадают. Измеренная функция возбуждения подтверждает, что наблюдается изотоп $^{288}115$ —

продукт $3n$ -канала реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ (см. рис. 2).

При энергии ионов ^{48}Ca 240 МэВ синтезирован более тяжелый изотоп $^{289}115$, α -распад которого приводит к изотопам $^{285}113$ (α -распад) и ^{281}Rg (спонтанное деление). Эти ядра впервые были получены в реакции $^{249}\text{Bk}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{293}117$ после распада материнского ядра. Измеренные в данном эксперименте радиоактивные свойства $^{289}115$ и его дочерних ядер согласуются с теми, которые были определены для них из пяти цепочек распада ядра $^{293}117$ в реакции $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$. Таким образом, изотоп $^{289}115$ был получен в двух перекрестных реакциях, что убедительно доказывает открытие сверхтяжелых элементов 113, 115 и 117.

Реакции полного слияния $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ и $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$, приводящие к элементам 115 и 114, имеют наибольшие сечения по сравнению с другими реакциями, в которых были синтезированы сверхтяжелые ядра с большим или меньшим числом протонов.

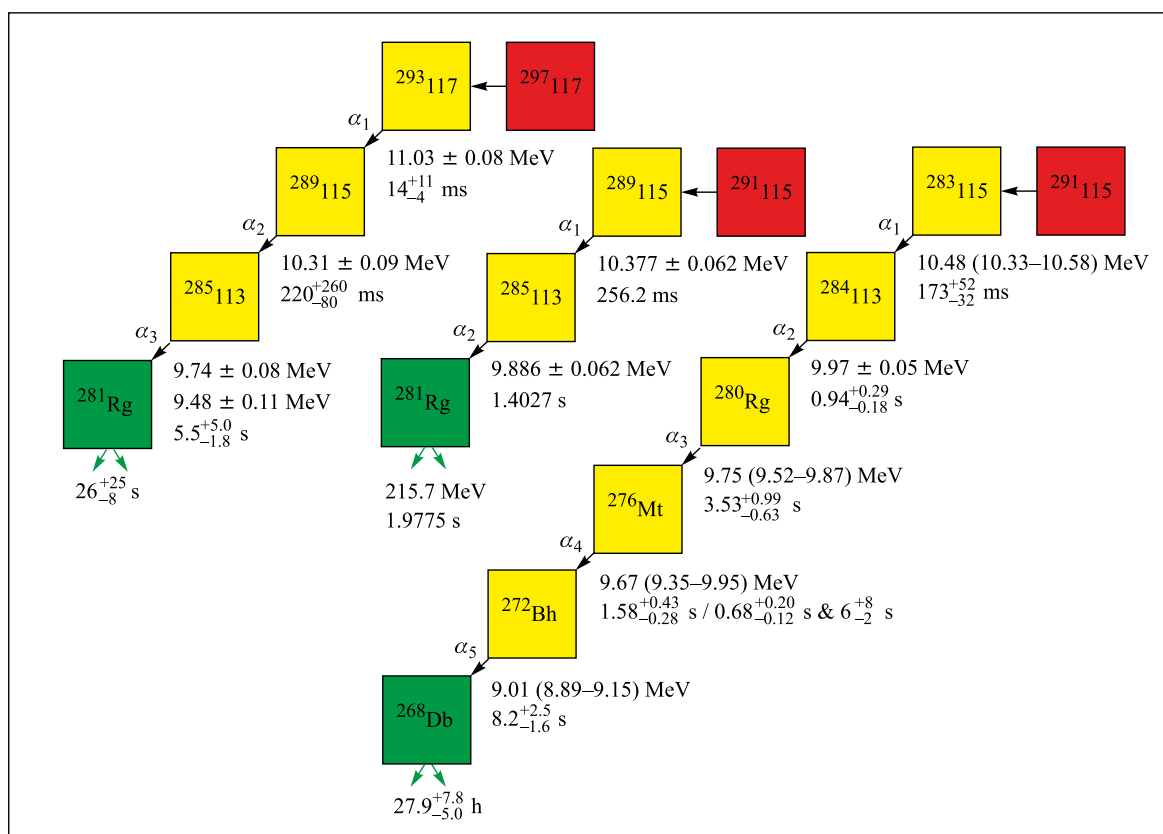


Рис. 1. Энергии α -частиц и периоды полураспада ядер в цепочках распада изотопов $^{293}_{117}$, $^{289}_{115}$ и $^{288}_{115}$. Для $^{293}_{117}$, $^{288}_{115}$ и их дочерних ядер указаны средние значения, определенные по 5 и 24 цепочкам распада соответственно

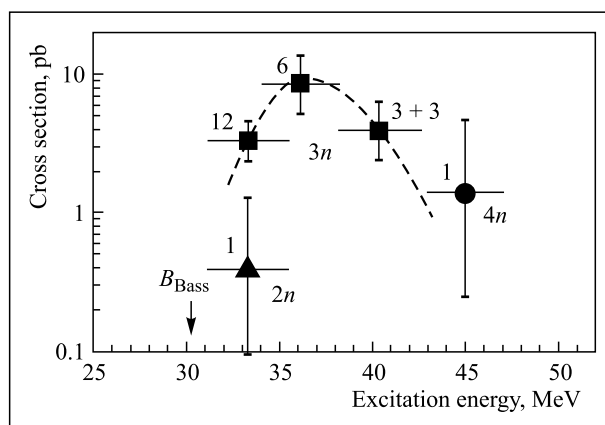


Рис. 2. Сечения образования ядер $^{289}_{115}$, $^{288}_{115}$ и $^{287}_{115}$ в зависимости от энергии возбуждения составного ядра. Цифрами указано число синтезированных ядер в данном эксперименте и в 2003 г.

ХИМИЯ ТРАНСАКТИНОИДОВ

В 2011 г. была проведена серия экспериментов по химической идентификации $^{268}_{Db}$ как конечного продукта распада $^{288}_{115}$. Целью работы являлось независимое подтверждение синтеза 115-го элемента в реакции $^{48}_{Ca} + ^{243}_{Am}$. На ускорителе У-400 ионами

$^{48}_{Ca}$ с энергией 247 МэВ облучалась мишень из тонкой титановой фольги с нанесенным на нее $^{243}_{Am}$ (99,9%) в виде оксида толщиной $0,5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$. Суммарное число ионов $^{48}_{Ca}$ на мишени за время облучения составило $8,9 \cdot 10^{18}$. Ядра отдачи после пред-

варительной сепарации на газонаполненном сепараторе (коэффициент разделения составил 10^4-10^5) собирались на медной фольге сборника, расположенного на выходе магнита. Время облучения в каждом опыте составляло от 24 до 48 ч, после чего медный сборник транспортировался в радиохимическую лабораторию, где проводилась его радиохимическая переработка. Для регистрации α -частиц и осколков спонтанного деления использовался детектирующий модуль с полупроводниковыми детекторами. По данным спектрометрических измерений

СЕПАРАТОР ВАСИЛИСА

В 2011 г. продолжался анализ данных, полученных на сепараторе ВАСИЛИСА в экспериментах по изучению свойств распада изотопа ^{253}No и спонтанного деления нейтронодефицитных изотопов Fm [5, 6].

В августе 2011 г. был произведен демонтаж старого сепаратора и ионопровода и начаты работы по модернизации сепаратора ВАСИЛИСА. Проводятся вакуумные испытания новой секции сепарации, магнитные измерения полей в двух новых дипольных магнитах. Разрабатывается детектирующая система, предназначенная для размеще-

МАСС-СПЕКТРОМЕТР MASHA

В 2011 г. на масс-спектрометре MASHA [8] был создан канал измерения энергии пучка по времени пролета на основе микроканальных пластин. Произведена модернизация системы управления горячей ловушкой. С помощью калиброванных течей инертных газов проведено измерение времени транспортировки атомов из объема горячей ловушки до ЭЦР-источника. Результаты измерений подтвердили предварительные оценки и позволили установить ограничения по быстродействию методики.

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

На лазерном спектрометре ЛЯР проведена серия экспериментов на ядрах отдачи ^{229}Th после α -распада изотопа урана ^{233}U с целью измерения сверхтонкой структуры и изомерного сдвига изомера ^{229}Th . Показано, что в 2% случаев распад осуществляется на низколежащее изомерное состояние с энергией ~ 5 эВ.

эффективность выделения для фракции Db составила 60–80%. С учетом предварительной сепарации фактор разделения элементов 5-й группы и актинидов составил $\geq 10^6$. Всего в 19 опытах было зарегистрировано 8 событий спонтанного деления с $T_{1/2} = 23_{-6}^{+13}$ ч. Сечение образования в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am}$ равно $6,0_{-2,4}^{+3,6}$. Полученные результаты согласуются с результатами экспериментов по синтезу 115-го элемента на газонаполненном сепараторе ядер отдачи. Результаты, полученные в 2011 г., опубликованы в [3, 4].

ния в фокальной плоскости. Приобретены два новых 10×10 см двусторонних многостриповых детектора (DSSD), изготовлена специальная тестовая камера. В настоящее время проводится работа по моделированию конфигурации и оценке эффективности Si- и Ge-детекторов, которые будут окружать фокальный DSSD Si-детектор [7].

Сотрудники группы ВАСИЛИСА принимали участие в эксперименте на сепараторе SHIP в GSI (Дармштадт) по синтезу 120-го элемента в реакции полного слияния $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{302}120^*$.

В рамках сотрудничества с Институтом технической и прикладной физики при Пражском университете (Чехия) были проведены тестовые измерения с использованием гибридного кремниевого пиксельного детектора MEDIPIX с целью его применения на масс-спектрометре MASHA для регистрации и идентификации ядер, удаленных от области стабильности. Планируется использование детектора MEDIPIX в экспериментах по измерению эффективности установки MASHA при регистрации изотопов ртути, синтезируемых в реакции $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$.

Проводилась работа по детальной проработке проекта новой установки для извлечения продуктов ядерных реакций с использованием их остановки в газе и последующей резонансной лазерной ионизацией. Разработаны конкретная схема ее реализации и требования к ее отдельным узлам. Проводилась проработка технической документации и

схем конкретного размещения на ускорителях ЛЯР (У-400, У-400М). Было проведено рабочее совещание по этой тематике с участием ведущих специалистов из Лювена, Ювяскюли, ЦЕРН, GANIL, Дармштадта, Майнца и Лаборатории iThemba.

Для установки по лазерной спектроскопии трансурановых элементов проведена модернизация вы-

сокотемпературного атомизатора с использованием нагрева электронным пучком. Проведены вакуумные и температурные испытания. Атомизатор оснащен новым стабилизированным высоковольтным блоком питания, что позволило повысить температуру нагрева атомизатора и стабильность атомного пучка.

ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР, ДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ И СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

Основной задачей является поиск новых путей получения нейтроноизбыточных тяжелых и сверхтяжелых ядер вблизи острова стабильности с использованием процессов многонуклонных передач и квазиделения при взаимодействии тяжелых ионов с ядрами вблизи кулоновского барьера. Для решения этих задач в 2011 г. были проведены измерения массово-энергетических и угловых распределений фрагментов, получаемых в реакции $^{136}\text{Xe} + ^{208}\text{Pb}$ вблизи кулоновского барьера при энергиях 700, 870 и 1020 МэВ на ускорителе У-400М на выведенном пучке ионов ^{136}Xe . Кроме того, для получения информации о сечении образования новых нейтроноизбыточных изотопов Os в реакции $^{136}\text{Xe} + ^{208}\text{Pb}$ был проведен эксперимент на ускорителе К-130

Университета г. Ювяскюля (Финляндия) при энергии 820 МэВ. Результаты представляют интерес для получения и исследований свойств нейтроноизбыточных изотопов ^{197}Os , ^{198}Os , ^{199}Os и ^{200}Os .

Методика, применяемая для исследования ядер с $N = 126$, может использоваться для синтеза сверхтяжелых элементов в реакциях передач при низкоэнергетическом столкновении тяжелых актинидов. Если сечения образования таких ядер в районе $N = 126$ окажутся достаточными для формирования интенсивного пучка, это позволит синтезировать новые изотопы сверхтяжелых ядер, расположенные существенно ближе к предсказанному пику острова стабильности при $Z = 114$, $N = 184$ [9, 10].

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОТИЧЕСКИХ МОД РАСПАДА

Исследования нового типа многотельного распада, названного нами тройным коллинеарным кластерным распадом (ТККР), были продолжены на новом спектрометре СОМЕТА [11]. Это двухплечевой времяпролетный спектрометр, включающий стартовый детектор на базе микроканальных пластин с источником ^{252}Cf внутри. Используются также две мозаики из PIN-диодов по восемь детекторов в каждой и «нейтронный пояс», состоящий из 28 ^3He нейтронных счетчиков. С каждого PIN-диода снимается как энергетический, так и временной сигнал.

На рис. 3 представлено распределение масса-масса осколков деления (ОД) для событий при условии регистрации трех нейтронов и попадания в выделенную область распределения $V_1 - E_1$ (скорость-энергия) ниже локусов обычного бинарного деления. Видна прямоугольная структура, аналогичная той, которая наблюдалась ранее в данных с модифицированного спектрометра FOBOS, но в другом массовом диапазоне. Дополнительный отбор позволяет выявить новые моды ТККР с очень легкими фрагментами. Прямоугольная структура ограничена ядрами с массами, мало отличающимися от масс известных магических ядер. Эти массы (кроме ^{132}Sn)

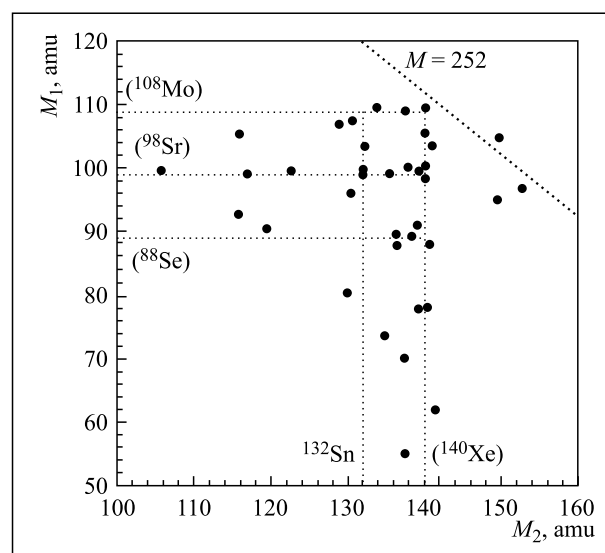


Рис. 3. Распределение масса-масса ОД ^{252}Cf (sf) при условии, что в каждом событии в совпадении с осколками регистрировалось три нейтрона ($n = 3$), а скорости и энергии ОД лежат в выбранной области $V_1 - E_1$ распределения ниже локуса бинарных событий

рассчитывались на основе гипотезы неизменной зарядовой плотности для ядра ^{252}Cf . Известно, что по крайней мере три нейтрона было испущено в каждом делительном событии, показанном на рис. 3. Изменение нуклонного состава материнской системы приводит к сдвигу масс магических ядер, если нейтроны были испущены непосредственно из делящейся си-

СТРУКТУРА ЭКЗОТИЧЕСКИХ ЯДЕР

Спектр низкоэнергичных состояний ^{10}He изучался на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА в реакции передачи двух нейтронов $^3\text{H}(^8\text{He}, p)^{10}\text{He}$ с использованием вторичного пучка ^8He с энергией 21,5 А МэВ и криогенной тритиевой мишени. В результате были получены энергия и ширина основного состояния 0^+ : $2,1 \pm 0,2$ и ~ 2 МэВ. Кроме того, впервые были определены спин-четности низколежащих состояний: анализ угловых корреляций позволил идентифицировать спектр ^{10}He как смесь 0^+ , 1^- (при энергии выше порога распада ^{10}He $E_T > 4$ МэВ) и 2^+ (при $E_T > 6$ МэВ). В результате было установлено, что ^{10}He является еще одной ядерной системой на границе нуклонной стабильности, в которой нарушается оболочечная структура [12].

РЕАКЦИИ С ПУЧКАМИ ЛЕГКИХ СТАБИЛЬНЫХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЯДЕР

На пучке установки АКУЛИНА проведены эксперименты по измерению энергетической зависимости полного сечения реакции $\text{Au} + ^6\text{He}$ с использованием методики измерения γ -излучения с использованием 4π γ -спектрометра. В эксперименте были измерены функции возбуждения реакций $^{197}\text{Au} + ^6\text{He}$, протекающих через каналы слияния, реакций с вылетом заряженных частиц и передачи нейтронов, а также изомерные отношения некоторых образовавшихся продуктов в диапазоне энергий значительно выше кулоновского барьера. В этих экспериментах использовалась активационная методика с использованием высокоэффективного γ -спектрометра, созданного в 2011 г.

Эффективно развивалось сотрудничество с другими научными центрами. В 2011 г. были проведены эксперименты на циклотроне У120 ИЯФ (Ржеж, Чехия) и тандеме ИЯИТ (Бухарест, Румыния) по изучению особенностей взаимодействия легких кластерных ядер ($d, ^6\text{Li}$) в области энергий вблизи кулоновского барьера реакций [14]. В этих экспериментах были получены интересные данные, свидетельствующие о влиянии кластерной структуры слабосвязанных ядер на усиление каналов реакций в околосбарьерной области энергий по сравнению с модельно зависимыми расчетными значениями. Следует отметить, что реакции с передачей ядру мишени

стемы (предделительные нейтроны). Предделительные нейтроны, эмитируемые из делящейся системы, находящейся в покое, имеют преимущество в эффективности регистрации в силу геометрии использованной сборки нейтронных счетчиков, что приводит к появлению структуры при использовании отбора по экспериментальной нейтронной множественности.

В 2010 г. был проведен эксперимент, посвященный изучению структуры ^6Be в реакции перезарядки $^1\text{H}(^6\text{Li}, ^6\text{Be})n$ при энергиях пучка ^6Li 25 и 32 А МэВ. Анализ полученных данных продолжался в 2011 г. Было показано, что спектр энергии ^6Be выше порога распада системы $E_T < 16$ МэВ полностью описывается заселением трех основных структур ^6Be : 0^+ при энергии 1,37 МэВ, 2^+ при энергии 3,05 МэВ и смеси состояний $\{0^-; 1^-; 2^-\}$ в энергетическом диапазоне 4–16 МэВ. Континуум с отрицательной четностью был интерпретирован как новое явление — изовекторная мягкая дипольная мода возбуждения [13].

d -кластеры из ядра ^6Li идут с высокими сечениями в подбарьерной области энергий, достигая наибольшего значения при энергии вблизи кулоновского барьера (см. рис. 4). Этот результат имеет большое значение как для фундаментальной ядерной физики, так и для астрофизики.

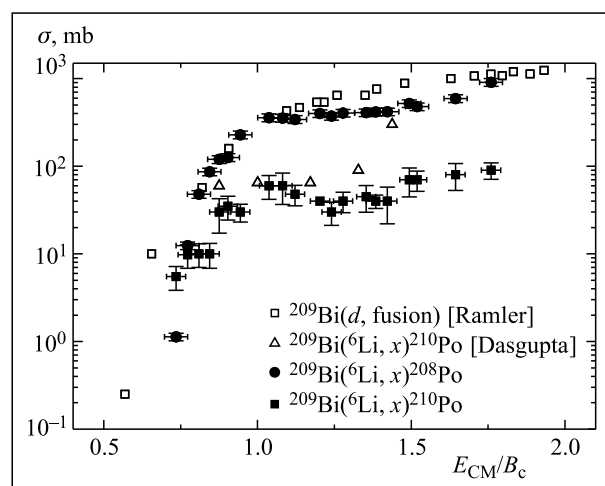


Рис. 4. Энергетическая зависимость образования изотопов ^{208}Po (●) и ^{210}Po (■, △) в реакции $^6\text{Li} + ^{209}\text{Bi}$. Для сравнения приведены сечения образования ^{210}Po (□) в реакции $^{209}\text{Bi}(d, n)^{210}\text{Po}$

Проведена серия экспериментов на микротроне МТ-25 с целью исследования альтернативной возможности получения пучков ионов ${}^6\text{He}$ в реакции ${}^7\text{Li}(\gamma, p){}^6\text{He}$, в которой γ -кванты образовывались в результате тормозного излучения ускоренных электронов. Образующиеся в реакции атомы ${}^6\text{He}$ до-

ставлялись в ЭЦР-источник и ионизировались, что дает возможность их последующей транспортировки в ускоритель. На выходе из ЭЦР-источника была получена интенсивность $4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ ионов ${}^6\text{He}$ при токе 1 мкА электронного пучка.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

Исследована возможность получения и изучения тяжелых нейтроноизбыточных ядер [15]. Процессы многонуклонных передач при околосбарьерных столкновениях тяжелых (и очень тяжелых, U-подобных) ионов являются единственным механизмом, позволяющим получать такие ядра. Детально изучены реакции передач для нескольких комбинаций снаряд–мишень. Предсказаны сечения этих процессов, проанализированы угловые и энергетические распределения первичных и конечных продуктов реакций в лабораторной системе. Эти результаты, а также предсказанные функции возбуждения для выхода нейтроноизбыточных сверхтяжелых (СТ) ядер могут быть полезными при разработке экспериментальных установок и при проведении соответствующих экспериментов.

Процесс захвата нейтронов рассмотрен как альтернативный метод получения СТ-ядер. Сильные нейтронные потоки могут быть созданы в ядерных реакторах, при ядерных взрывах и взрывах сверхновых. Две области короткоживущих ядер (в районе фермия и в области $Z = 106-108$ и $N \sim 170$) препятствуют образованию СТ-ядер из-за недостаточных нейтронных потоков в существующих ядерных реакторах. Показано [16], что при нескольких (до-

вольно «мягких») ядерных взрывах эти области могут быть легко пройдены и будет синтезировано макроскопическое количество нейтроноизбыточных долгоживущих СТ-ядер в районе острова стабильности. Сформулированы требования для импульсных реакторов следующего поколения, достаточные для получения долгоживущих СТ-ядер. Выход СТ-ядер при взрыве сверхновой по отношению к свинцу составляет около 10^{-12} , что находится в пределах экспериментальной чувствительности при поиске СТ-элементов в космических лучах.

При частичной поддержке программы сотрудничества ОИЯИ–ЮАР расширена [17] база знаний по низкоэнергетической ядерной физике (<http://nrv.jinr.ru/nrv>): включены программы расчета сечений малонуклонных передач в рамках метода искаженных волн, а также реализована возможность учета каналов передачи нейтронов в процессах слияния ядер с использованием эмпирической модели.

В рамках программы сотрудничества ОИЯИ–АРЕ изучено усиление подбарьерного слияния тяжелых ионов за счет передачи нейтронов. Большой эффект нейтронных передач предсказан для нескольких реакций, доступных для экспериментального изучения.

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ, РАДИОАНАЛИТИЧЕСКИЕ И РАДИОИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА УСКОРИТЕЛЯХ ЛЯР

Трековые мембраны. Проведены подробные исследования свойств «наножидкостного» диода на основе асимметричной нанопоры. Исследована взаимосвязь между коэффициентом выпрямления и геометрией нанопоры — ее размером и профилем канала. Проанализирована зависимость коэффициента выпрямления от концентрации электролита. Данные результаты имеют большое значение для понимания процессов в биологических мембранах, а также для разработки сенсоров биологических молекул.

Предложен и осуществлен новый процесс получения пористого углеродного материала, включающий облучение полиимида ускоренными ионами, химическое травление и последующую карбонизацию. Ис-

следованы структурные характеристики полученного материала.

Исследованы структура и электрохимические свойства трековых мембран, модифицированных в плазме 1,1,1,2-тетрафторэтана. Данный процесс приводит к созданию двухслойных композитных мембран, обладающих в растворах электролитов асимметрией электрической проводимости.

Наноразмерные структуры в материалах. Начаты исследования воздействия высокоэнергетического ионного облучения на радиационную стабильность наночастиц оксидов иттрия в перспективных дисперсно-упрочненных оксидами сплавах. Первые

результаты показали, что высокий уровень ионизации может приводить к частичной аморфизации кластеров Y_2O_3 .

Получены новые результаты по формированию нановыделений железа в молибдене с предварительно сформированной упорядоченной гелиевой пористостью при низкодозном облучении ускоренными тяжелыми ионами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Eleven New Heaviest Isotopes of Elements $Z = 105$ to $Z = 117$ Identified among the Products of $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$ Reactions // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 83. 054315.
2. *Oganessian Yu. Ts. et al.* New Insights into the ^{243}Am , ^{48}Ca Reaction Products Previously Observed in the Experiments on Elements 113, 115, and 117 // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. 022502.
3. *Aksenov N. V. et al.* // *Part. Nucl., Lett.* 2011. V. 8, No. 4. P. 356–363.
4. *Аксенов Н. В. и др.* Разработка экстракционного метода выделения ^{268}Db // *Радиохимия* (направлено).
5. *Lopez-Martens A. et al.* Spectroscopy of ^{253}No and Its Daughters // *Nucl. Phys. A.* 2011. V. 852. P. 15.
6. *Hagen T. W. et al.* Spectroscopy of Transfermium Nuclei Using the GABRIELA Setup // *Acta Phys. Polon. B.* 2011. V. 42. P. 605.
7. *Исаев А. В. и др.* Первое применение двустороннего многострипового Si-детектора в проекте GABRIELA // *ПТЭ.* 2011. № 1. С. 43.
8. *Родин А. М. и др.* Масс-спектрометр MASHA — результаты тестов на пучке тяжелых ионов. Сообщение ОИЯИ Р15-2011-47. Дубна, 2011.
9. *Itkis I. M. et al.* Fission and Quasi-Fission Modes in Heavy Ion-Induced Reactions Leading to the Formation of Hs^* // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 83. 064613.
10. *Kozulin E. M. et al.* Symmetric and Asymmetric Quasi-Fission in Reactions with Heavy Ions // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2011. V. 282, No. 1. 012008/1.
11. *Kamanin D. V. et al.* // *Proc. of the 18th Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, 26–29 May 2010.* Dubna, 2011. P. 39–45.
12. *Sidorchuk S. I. et al.* Correlations Uncovering the Nature of Low-Lying States of ^{10}He // *Phys. Rev. Lett.* (submitted).
13. *Fomichev A. S. et al.* Isovector Soft Dipole Mode in ^6Be // *Phys. Lett. B.* 2012; doi:10.1016/j.physletb.2012.01.004.
14. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* // «Fusion-2011», St. Malo, France; XVII Colloque GANIL, Corsica, 2011.
15. *Zagrebaev V. I., Greiner W.* Production of Heavy and Superheavy Neutron-Rich Nuclei in Transfer Reactions // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 83. 044618.
16. *Zagrebaev V. I. et al.* Production of Heavy and Superheavy Neutron-Rich Nuclei in Neutron Capture Processes // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 84. 044617.
17. *Zagrebaev V. I. et al.* Nuclear Reactions Video. Low Energy Nuclear Knowledge Base. <http://nr.v.jinr.ru/nrv>.
18. *Apel P. Yu., Dmitriev S. N.* Micro- and Nanoporous Materials Produced Using Accelerated Heavy Ion Beams // *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 2011. V. 2. 013002.
19. *Apel P. Yu. et al.* Effect of Nanopore Geometry on Ion Current Rectification // *Nanotechnology.* 2011. V. 22. 175302.
20. *Качурин Г. А. и др.* Формирование светоизлучающих структур в слоях стехиометрического SiO_2 при облучении тяжелыми ионами высоких энергий // *Физика и техника полупроводников.* 2011. Т. 45, вып. 10. С. 1363.