



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ИМ. Г. Н. ФЛЕРОВА

В 2013 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 (девять проектов);
 - радиационные эффекты и физические основы нанотехнологий, радиоаналитические и радиоизотопные исследования на ускорителях ЛЯР (пять проектов);
 - ускорительный комплекс пучков ионов стабильных и радиоактивных нуклидов (проект DRIBs-III) (девять проектов).
- Время работы основных ускорителей ЛЯР в 2013 г. составило 11 400 ч.

DRIBs-III. УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПУЧКОВ ИОНОВ СТАБИЛЬНЫХ И РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ

Одним из основных проектов ОИЯИ является проект DRIBs-III (Dubna Radioactive Ion Beams). Задачами первого приоритета, которые должны быть реализованы в полном объеме в рамках 7-летнего плана в соответствии с решениями УС ОИЯИ и ПКК по ядерной физике, являются:

- создание в ОИЯИ первой в мире фабрики сверхтяжелых элементов (SHE-factory), включая создание и запуск нового ускорителя ДЦ-280, экспериментального корпуса и экспериментальных установок по синтезу и изучению свойств СТЭ;
- выполнение научной программы по синтезу СТЭ (У-400);
- завершение работ по модернизации У-400М и создание нового сепаратора ACCULINNA-2 для развития работ по изучению экзотических радиоактивных ядер;
- проведение подготовительных и проектных работ по реконструкции экспериментального зала У-400 и модернизации У-400 для обеспечения начала реконструкции в 2017 г.;

- строительство в ЛЯР ОИЯИ нового лабораторного корпуса площадью 1500 м² для развития исследований по применению тяжелых ионов в нанотехнологиях.

В рамках реализации проекта в 2013 г. выполнены следующие работы.

1. Сооружение нового циклотрона ДЦ-280:
 - в рамках контракта с НКМЗ (Украина) продолжается изготовление основного магнита;
 - завершено изготовление системы аксиальной инжекции;
 - продолжаются работы по организации тендеров по изготовлению основных систем ускорителя.
2. Экспериментальный корпус:
 - завершены проектные работы (стадия П) и получено положительное заключение Главгосэкспертизы;
 - завершено сооружение «нулевого» цикла.
3. Лабораторный корпус:
 - завершены общестроительные работы;

- завершен монтаж инженерного и технологического оборудования;

- начался монтаж экспериментального оборудования.

4. Реконструкция экспериментального зала У-400:

- завершены проектные работы (стадия П, контракт с ЗАО «Комета»).

5. В соответствии с контрактом, заключенным с компанией «SigmaPhi», в рамках создания установки ACCULINNA-2 в 2013 г. изготовлено следующее оборудование:

- дипольный магнит D2;
- 13 квадрупольных магнитов;
- 2 секстипольных магнита.

В 2013 г. подготовлены все технические спецификации для размещения оборудования в экспериментальном зале здания 101 ЛЯР ОИЯИ, проведены исследования несущих конструкций, а также подготовлено расписание работ по монтажу оборудования в 2014 г. Кроме того, произведена закупка силовых кабелей, подготовлена техническая спецификация для магнита нулевого градуса, а также получено соответствующее коммерческое предложение от компании «SigmaPhi» для его изготовления.

6. В 2013 г. в рамках проекта GALS приобретены оптические столы и лазер на красителях. Подготовлены помещение для лазеров и измерительная комната, включая систему вентиляции и охлаждения. Оставшееся оборудование (Nd:YAG-лазер с соответствующей комплектацией, оптоэлектроника и т.д.) должно быть закуплено, установлено и испытано в 2014 г. Таким образом, лазерная часть установки будет завершена, и в 2014 г. будут проведены первые эксперименты по селективной лазерной ионизации.

7. В 2013 г. успешно проведены вакуумные и высоковольтные испытания сепаратора VASSILISSA. Модернизированный сепаратор ядер отдачи был введен в эксплуатацию в мае 2013 г. Настройка сепаратора и измерения трансмиссии проводились с помощью α -источника, установленного в плоскости мишени, а также с использованием пучка ^{22}Ne и ми-

шени ^{198}Pt . В результате измерений было подтверждено увеличение акцептанса установки, а также увеличение эффективности транспортировки ядер отдачи до 5% (размер детектора в фокальной плоскости составлял $\sim 60 \times 60$ мм).

В целом состояние работ по реализации проекта DRIBs-III следует считать удовлетворительным. Вместе с тем необходимо отметить, что сооружение экспериментального корпуса происходит с определенным отставанием от намеченного графика.

Ионные источники. Одним из основных направлений научной деятельности ЛЯР ОИЯИ является производство пучков редких изотопов. Для получения ионов ^{58}Fe и ^{50}Ti использовался метод MIVOC (металлические ионы из летучих соединений). Для производства ионов железа использовалось соединение $(\text{C}_5\text{H}_5)_2\text{Fe}$. Эксперименты по получению ионов титана проводились на стенде ионных источников с естественными и обогащенными соединениями титана $(\text{CH}_3)_5\text{C}_5\text{Ti}(\text{CH}_3)_3$. После успешных испытаний на стенде пучок ионов $^{50}\text{Ti}^{5+}$ был ускорен на циклотроне У-400. Интенсивность пучка $^{50}\text{Ti}^{5+}$, инжектированного в ускоритель, составляла около 50 мкА, при этом источник стабильно работал в течение трех недель. Скорость расходования вещества в источнике составила 2,4 мг/ч, соответственно скорость расходования ^{50}Ti была равна 0,52 мг/ч.

Новый компактный сверхпроводящий ЭЦР-источник, который должен быть использован в качестве инжектора высокозарядных тяжелых ионов на циклотроне У-400М, был спроектирован и построен в ЛЯР в сотрудничестве с ЛФВЭ. Аксиальное магнитное поле источника создавалось с помощью сверхпроводящего магнита, в то время как гексаполь NdFeB использовался для радиального захвата плазмы. Для улучшения эффективности источника при получении высоких зарядовых состояний (таких как Xe^{+30}) источник был усовершенствован таким образом, что его рабочая частота составила 18 ГГц. Первые испытания усовершенствованного источника показали его эффективность для получения ионов в средних зарядовых состояниях.

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ЯДЕР НА ГРАНИЦАХ СТАБИЛЬНОСТИ

Синтез новых элементов. В 2013 г. завершена обработка результатов экспериментов по изучению радиоактивных свойств изотопов элементов 115 [1] и 117 [2] и продуктов их α -распада, синтезированных в реакциях полного слияния $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ и $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$. Работа выполнена на газонаполненном сепараторе ЛЯР ОИЯИ в сотрудничестве с лабора-

ториями в Ок-Ридже (ORNL), Ливерморе (LLNL), Ноксвилле (UT), Нашвилле (VU) и Димитровграде (НИИАР). В реакции $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$ зарегистрированы три ядра $^{294}117$ и 11 ядер $^{293}117$. Радиоактивные свойства всех ядер в цепочках распада изотопов $^{294}117$ и $^{293}117$ совпадают с данными, измеренными в первом эксперименте по синтезу элемента 117

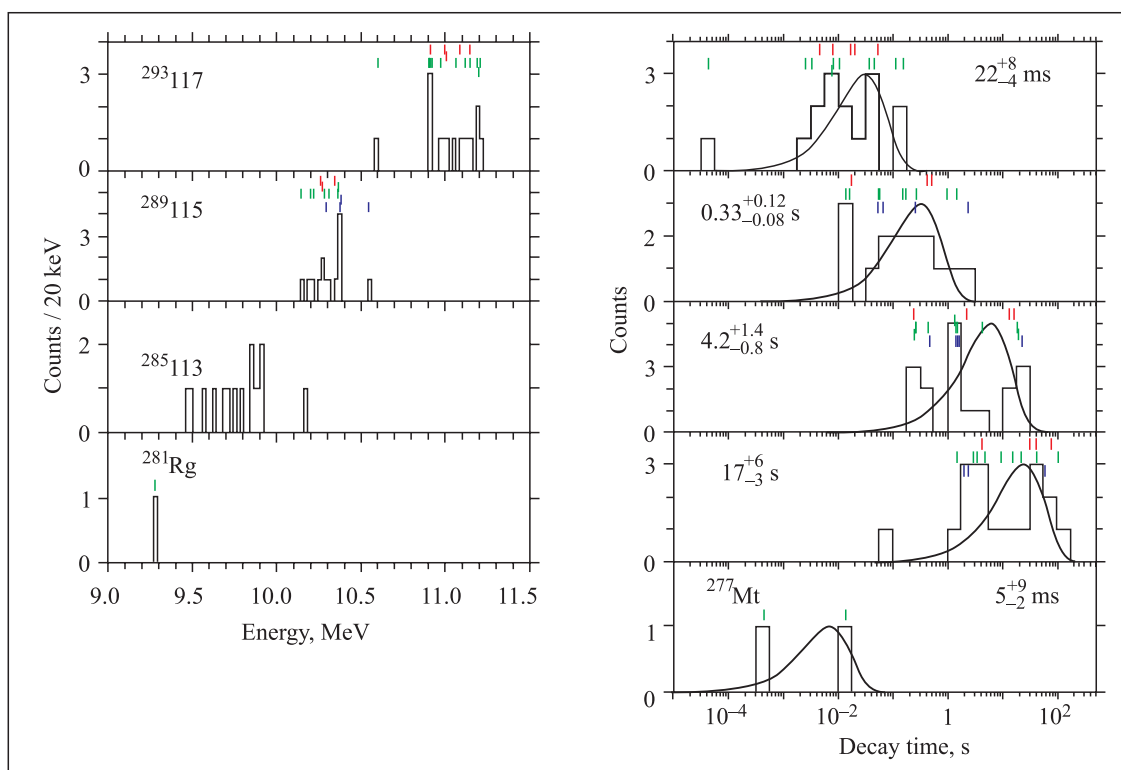


Рис. 1. Спектры энергий α -частиц (слева) и распределения времен распада (справа) ядер ^{277}Mt – $^{293}\text{117}$. Величины, измеренные ранее в реакциях $^{249}\text{Bk}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{293}\text{117}$ и $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{289}\text{115}$, отмечены линиями. Кривыми показаны экспоненциальные распределения $dN/d\log(t)$ для указанных периодов полураспада

в 2009–2010 гг. Изотоп $^{289}\text{115}$ наблюдался в перекрестных реакциях $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{289}\text{115}$ и $^{249}\text{Bk}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{293}\text{117} \rightarrow ^{289}\text{115}$. Свойства распада этого ядра и продуктов его α -распада (рис. 1) идентичны в обеих реакциях: при образовании его в прямой реакции и после α -распада материнского ядра $^{293}\text{117}$.

Химия трансактиноидов. В течение 2013 г. в рамках изучения физико-химических свойств трансактиноидов был модернизирован криодетектор с градиентом температуры от комнатной до -60°C . Установка состоит из закрытой газотранспортной системы, мишенной камеры и ловушки для аэрозольных частиц, воды и кислорода. Система регистрации включает в себя четыре детектирующих модуля с полупроводниковыми детекторами. Каждый модуль состоит из двух четырехстриповых детекторов, покрытых золотом. Для переноса радионуклидов к детекторам используется газовая смесь He/Ar . С помощью криодетектора изучались свойства элемента 113 в реакции слияния $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{288}\text{115}$. Изотоп $^{284}\text{113}$ образуется в результате α -распада изотопа $^{288}\text{115}$. Мишени ^{243}Am облучались на циклотроне У-400 ЛЯР ионами ^{48}Ca с энергией 273 МэВ. Суммарная доза облучения составила $2,0 \cdot 10^{19}$. В эксперименте наблюдались пять цепочек распада элемента 113. Энергии

распада и времена жизни полученных изотопов находятся в хорошем согласии с ранее полученными данными. В результате эксперимента была подтверждена летучесть элемента 113. Кроме того, две цепочки распада изотопа ^{283}Sn и пять цепочек распада изотопа ^{285}Sn наблюдались в результате облучения мишеней $^{242,244}\text{Pu}$ ионами ^{48}Ca с энергией 278 МэВ.

Сепаратор VASSILISSA. В 2013 г. после успешных вакуумных и высоковольтных испытаний состоялся ввод в эксплуатацию сепаратора ядер отдачи SHELS. Измерения эффективности трансмиссии, настройка ионно-оптических элементов сепаратора, тестирование электронной аппаратуры и спектрометрической системы регистрации производились с использованием α -источника и реакций слияния $^{22}\text{Ne}(^{238}\text{U}, 4-5n)^{255-256}\text{No}$, $^{22}\text{Ne}(^{208}\text{Pb}, 4n)^{226}\text{U}$ и $^{22}\text{Ne}(^{206}\text{Pb}, 4n)^{224}\text{U}$. В экспериментах со свинцовой мишенью наблюдались корреляции α – α , α – γ и α –конверсионный электрон. Анализ данных продолжается. В ноябре 2013 г. проведены тестовые эксперименты на пучке ионов ^{50}Ti , в результате которых была измерена эффективность транспортировки ядер отдачи Rf до фокальной плоскости сепаратора SHELS. Эффективность транспортировки составила почти 40 % для ядер отдачи $^{209,210}\text{Ra}$, образующихся в реакции с использованием пучка ^{50}Ti и мишени

^{164}Dy . В реакции полного слияния $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{258}\text{Rf}^*$ измерялось спонтанное деление изотопа ^{256}Rf и α -распад ^{257}Rf . Наиболее важные результаты опубликованы в работах [3, 4].

Масс-спектрометр MASHA. В 2013 г. анализировались данные тестовых экспериментов по измерению быстродействия и эффективности сепарации короткоживущих изотопов ртути, полученные в реакции полного слияния $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$. Время сепарации составило $(1,8 \pm 0,5)$ с, а эффективность — 7% [5]. Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными на установке ISOLDE (ЦЕРН).

На установке MASHA выполнен эксперимент по измерению массы ядра ^{283}Sn , синтезированного в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$. В эксперименте использовалась вращающаяся мишень из окиси урана на титановой подложке. Мишень облучалась в течение 670 ч. Полный поток ионов ^{48}Ca , прошедших через мишень, составил $1,9 \cdot 10^{18}$. Событий, соответствующих распаду ядра ^{283}Sn , в эксперименте не зарегистрировано.

Динамика взаимодействия тяжелых ядер, деление тяжелых и сверхтяжелых ядер. Проведен эксперимент по поиску канала деления ядра $^{260}\text{No} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca} + 4n$, образованного в реакции $^{22}\text{Ne} (106 \text{ МэВ}) + ^{238}\text{U}$ на ускорителе У-400. Осколки деления составного ядра ^{260}No регистрировались с помощью двухплечевого времяпролетного спектрометра CORSET. Были измерены массово-энергетические распределения осколков деления. В результате эксперимента было обнаружено увеличение выхода фрагментов в области масс 52/208 а. е. м., что соответствует образованию делительной пары, состоящей из двух магических ядер Са/Рb. Следует отметить, что ранее самая большая массовая асимметрия $\eta = 2,5$ при образовании осколков деления была обнаружена при делении актинидов тепловыми нейтронами. В данном эксперименте массовая асимметрия для обнаруженного суперасимметричного деления составляет $\eta = 4,3$.

В рамках коллаборации с ускорительной лабораторией Университета г. Ювяскюля (Финляндия), департаментом физики Университета г. Неаполя (INFN, Италия) и ОИЯИ–GSI (Германия) на циклотроне К-130 были измерены массово-энергетические распределения бинарных фрагментов реакции $^{88}\text{Sr} + ^{176}\text{Yb}$ при энергии налетающего иона $E_{\text{lab}} = 435 \text{ МэВ}$ при углах $30\text{--}140^\circ$ в системе центра масс. Для значительной части бинарных фрагментов наблюдалась большая диссипация начальной кинетической энергии, что характерно для реакций глубоководных передач. Был обнаружен повышенный выход фрагментов с массами 190–200 а. е. м., обусловленный влиянием замкнутых протонных оболочек с $Z = 28$ и 82. Это означает, что в этой реакции происходит передача порядка 20–25 нуклонов от на-

тающей частицы к ядрам мишени. В результате анализа данных сделан вывод о том, что относительный вклад реакций многонуклонных передач в сечение захвата зависит главным образом от свойств входного канала. Для мишенеподобных фрагментов, масса которых больше массы мишени, энергия возбуждения составила порядка 30–50 МэВ, что делает возможным, после эмиссии 3–5 нейтронов, выживание таких ядер. Неожиданно высокий измеренный выход продуктов реакции с массами, превышающими массу мишени, подтверждает, что при низких энергиях реакции многонуклонных передач могут использоваться для получения новых нейтронно-избыточных изотопов. Этот результат особенно важен, так как такой механизм может быть использован для синтеза новых сверхтяжелых элементов [6, 7].

В 2013 г. сотрудник сектора № 5 Ю. М. Иткис защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Диссертация посвящена изучению свойств массовых и энергетических распределений фрагментов деления и квазиделения, полученных в реакциях с ионами ^{22}Ne , ^{26}Mg , ^{36}S и ^{58}Fe , ведущих к образованию изотопов $^{266,271,274}\text{Hs}^*$ ($Z = 108$), при энергиях выше и ниже кулоновского барьера.

Структура экзотических ядер. В 2013 г. на фрагмент-сепараторе ACCULINNA были проведены эксперименты по изучению мод двухпротонного распада возбужденных состояний ядра ^{17}Ne , полученных в реакции $^{18}\text{Ne} + ^1\text{H} \rightarrow d + ^{17}\text{Ne}$. Основной целью этих экспериментов было получение данных о ветви истинного двухпротонного распада первого возбужденного состояния ^{17}Ne ($J^\pi = 1/2^+$, $E^* = 1,288 \text{ МэВ}$). Основным каналом распада этого состояния является $M1$ γ -переход в основное, ядерно-стабильное состояние. Обнаружение даже слабой ветви истинного $2p$ -распада состояния $1/2^+$ представляет задачу исключительной важности, так как изучение этого нового вида радиоактивного распада даст ценную информацию о весьма вероятной природе ^{17}Ne как ядерной системы, имеющей так называемую «боромиевскую» трехкластерную ($^{15}\text{O} + 2p$) структуру. Не менее важным является астрофизический аспект данной проблемы. Даже очень слабая ($\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma \approx 0,01\text{--}0,001\%$) ветвь $2p$ -распада состояния $1/2^+$ будет свидетельствовать о предпологавшемся ранее пути обхода (через захват двух протонов $^{15}\text{O} + 2p$) точки ожидания ^{15}O , возникающей в rp -процессе нуклеосинтеза. В проведенных экспериментах был реализован новый метод измерения спектра состояний ^{17}Ne , испытывающих $2p$ -распад, обеспечивающий измерение спектра энергии $^{17}\text{Ne}^*$ с разрешением не хуже 100 кэВ (ПШПВ). Столь высокое разрешение необходимо для надежного выделения истинного $2p$ -распада состояния $1/2^+$ на фоне событий последовательного испускания двух протонов, представляющих основной канал распада двух

более высоколежащих уровней ^{17}Ne ($E^* = 1,764$ и $1,908$ МэВ). Обработанный к настоящему времени объем данных дал предел $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma < 0,1\%$. В результате обработки полного объема данных этого опыта можно рассчитывать на получение предела $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma < 0,01\%$.

В 2013 г. продолжался анализ данных, полученных в эксперименте по изучению низкоэнергетического спектра возбуждения сверхтяжелого изотопа гелия ^{10}He , полученного в реакции передачи двух нейтронов $^8\text{He} + ^3\text{H} \rightarrow ^{10}\text{He} + p$ [8].

Реакции с пучками легких стабильных и радиоактивных ядер. В 2013 г. сотрудники группы продолжали деятельность, связанную с развитием систем пропорциональных многопроволочных камер, которые использовались в качестве позиционно-чувствительных детекторов и систем диагностики пучков низкой интенсивности ($\leq 10^7$ с $^{-1}$). В испытаниях этих систем, которые, в частности, предполагается использовать в экспериментах на ускорительном комплексе SPIRAL-2 (Франция), принимали активное участие специалисты GANIL.

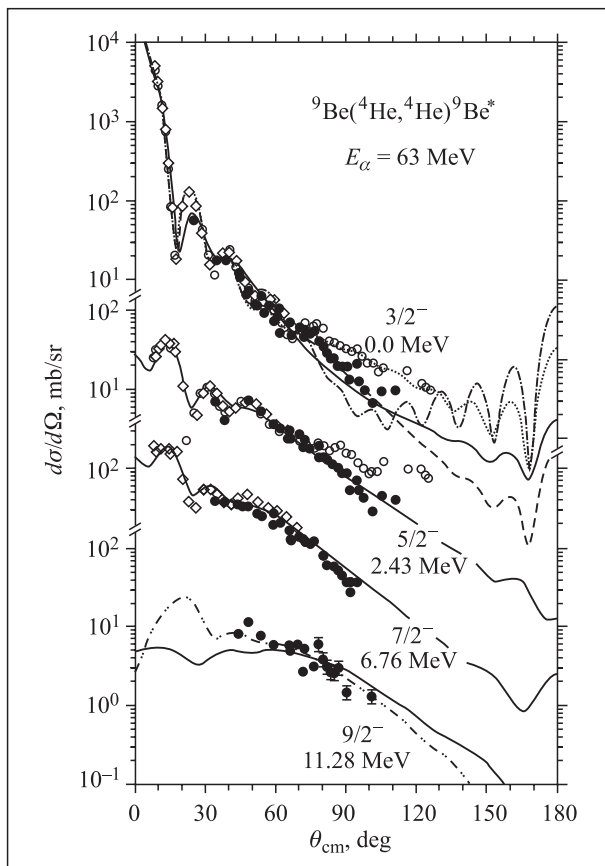


Рис. 2. Дифференциальные угловые распределения для основного и возбужденных состояний ^9Be , полученные в реакции $^9\text{Be}(\alpha, \alpha')^9\text{Be}^*$. Экспериментальные данные показаны в виде символов, результаты анализа по оптической модели и методом искаженных волн представлены в виде кривых

В 2013 г. сотрудниками группы был проведен цикл экспериментов по изучению особенностей структуры изотопов бериллия и бора $^9,^{10}\text{Be}$, ^{10}B . Эксперименты проводились на циклотроне У-120 (Ржеф, Чехия), а также в циклотронной лаборатории Университета Ювяскюля (Финляндия). В результате были получены угловые распределения дифференциальных сечений для реакций $^9\text{Be}(\alpha, \alpha')^9\text{Be}^*$, $^9\text{Be}(\alpha, ^3\text{He})^{10}\text{Be}$ и $^9\text{Be}(\alpha, t)^{10}\text{B}$. Проведен анализ измеренных зависимостей с использованием оптической модели (ОМ), метода искаженных волн (DWBA). В качестве примера на рис. 2 представлены измеренные угловые распределения дифференциальных сечений в реакции $^9\text{Be}(\alpha, \alpha')^9\text{Be}^*$, а также результаты анализа полученных данных. В результате работы были установлены спин и четность возбужденного состояния ^9Be с энергией возбуждения $11,28$ МэВ — $9/2^-$. Эта информация представляет также интерес для астрофизических исследований.

Эффективно развивалось сотрудничество с другими научными центрами. В частности, на установке комплекса радиоактивных пучков ALTO (Орсе, Франция) проведен эксперимент по измерению β -запаздывающей нейтронной эмиссии ядер $^{82,83,84}\text{Ga}$ с помощью 4π -нейтронного детектора ТЕТРА, изготовленного в Дубне.

Наиболее значимые результаты, полученные в 2013 г., опубликованы в работах [9, 10].

Теоретическая и вычислительная физика. Изучена проблема получения новых нейтронно-обогащенных тяжелых ядер в процессах многонуклонных передач при низкоэнергетических столкновениях тяжелых ионов [11]. Показано, что реакции с актиноидными пучками и мишенями представляют особый интерес для получения нейтронно-обогащенных изотопов трансфермиевых элементов и еще не изученных ядер с замкнутой нейтронной оболочкой $N = 126$, оказывающих наибольшее влияние на процесс нуклеосинтеза. Рассчитанные сечения соответствующих реакций оказались достаточно высокими, и предлагаемые эксперименты могут быть реализованы на существующих ускорителях.

Быстрое падение сечений и резкое уменьшение времени жизни ядер с $Z > 120$, получаемых в реакциях слияния, создают значительные трудности и вносят большую неопределенность в дальнейшее развитие физики сверхтяжелых элементов. Все возможные механизмы ядерных реакций (слияние стабильных и радиоактивных ядер, многонуклонные передачи и процессы захвата нейтронов), которые могут быть использованы для синтеза сверхтяжелых элементов, были тщательно изучены в работе [12]. Предложены новые эксперименты, нацеленные на синтез сверхтяжелых ядер, расположенных между теми, которые были синтезированы в реакциях «холодного» и «горячего» слияния, а также на полу-

чение долгоживущих нейтронно-обогащенных изотопов сверхтяжелых элементов, в том числе тех, которые расположены в центре «острова стабильности».

Изучено совместное влияние каналов коллективных возбуждений и перераспределения нейтронов на сечение подбарьерного слияния атомных ядер [13]. Показано, что, для того чтобы перераспределение нейтронов приводило к усилению подбарьерного слияния, недостаточно только наличия положительных Q , как считалось ранее. Установлено, что существенное усиление слияния должно наблюдаться, если сталкивающиеся ядра еще и до-

статочно инертны к возбуждению коллективных мод. Предложен ряд комбинаций снаряд–мишень для экспериментального изучения.

При частичной поддержке программы сотрудничества ОИЯИ–SAR расширена база знаний по низкоэнергетической ядерной физике. В частности, база знаний пополнилась новыми моделями, включая а) программы расчета сечений малонуклонных передач в рамках кода GRAZING; б) код EPAX для нахождения выходов продуктов реакций в процессах фрагментации тяжелых ионов при промежуточных энергиях.

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

Исследования нанопор, получаемых методом травления треков, были продолжены в нескольких направлениях. Разработан метод восстановления продольного профиля симметричных нанопор, основанный на измерении электропроводности как функции времени. Данный подход может быть полезен для применений нанопор в качестве сенсоров. Проведены сравнительные исследования диодоподобных свойств асимметричных мембран с одиночными и многими нанопорами. Профили пор в полиэтилентерефталатных (ПЭТФ) трековых мембранах изучены при помощи метода спектроскопии потерь энергии ионов [14].

Разработаны принципы получения нанокomпозитных фотокаталитических мембран путем модификации поверхности ПЭТФ трековых мембран серебром и диоксидом титана. Были проведены исследования фотокаталитических свойств трековых мембран. Установлено, что поверхность мембран обладает свойствами самоочистки и супергидрофильности.

Изучены процессы изменения элементного состава в металлах, находящихся в атмосфере водорода или дейтерия при высоком давлении и облученных γ -квантами с энергиями 10 и 23 МэВ [15].

Методы просвечивающей электронной микроскопии в геометрии «cross-section» (ХТЕМ) и сканирующей электронной микроскопии (SEM) были использованы для исследования образцов нанокристаллического ZrN, с имплантированными в него ионами гелия (30 кэВ , $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и облученного затем ионами Хе с энергией 167 МэВ (10^{14} см^{-2}). Установлено, что послерадиационная термическая обработка вызывает формирование блистеров за счет процессов сегрегации ионов гелия. ХТЕМ- и SEM-

анализы показали, что облучение высокоэнергетическими ионами Хе подавляет образование гелиевых блистеров. Этот результат представляет значительный практический интерес для моделирования радиационных повреждений, вызываемых осколками деления в реакторных материалах [16, 17].

Методами оптической и электронной микроскопии, ERD-спектроскопии, термодесорбционной спектроскопии исследовано влияние воздействия высокой плотности ионизации ($22,5 \text{ кэВ/нм}$) ионами Вi с энергией 710 МэВ на развитие приповерхностной газовой пористости в виде блистеров в кремнии, легированном ионами дейтерия ($E = 12,5 \text{ кэВ}$) и ионами гелия ($E = 25 \text{ кэВ}$), в результате послерадиационного отжига при $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Впервые установлено существенное влияние на уменьшение, вплоть до полного подавления в случае дейтерия, развития блистерно-флэкинговой структуры. Из анализа результатов сделано предположение о радиационно-индуцированной десорбции дейтерия и гелия из приповерхностного слоя кремния во время облучения высокоэнергетичными ионами висмута.

Исследовано разделение 4- и 5-валентных элементов с применением наноструктурного материала. Исследовались реакции $^{118}\text{Sn}(\gamma, n)^{117m}\text{Sn}$ и $^{196}\text{Pt}(\gamma, n)^{195m}\text{Pt}$ с целью получения радиоизотопов для биомедицинских исследований. Получен выход радионуклида ^{117m}Sn на уровне 40 %, ^{195m}Pt — 50 %.

Разрабатывается экспрессная методика анализа Po в почвах и растениях, начаты исследования поведения летучих элементов и продуктов распада урана и тория в летучей золе при сжигании горючих сланцев [18, 19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Investigation of the $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ Reaction Products Previously Observed in the Experiments on Elements 113, 115, and 117 // *Phys. Rev. C.* 2013. V. 87. P. 014302.
2. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Studies of the $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$ Reaction Including Decay Properties and Excitation Function for Isotopes of Element 117 and Discovery of the New Isotope ^{277}Mt // *Ibid.* P. 054621.
3. *Yeremin A. et al.* First Experimental Tests of the SHELS Separator // *Part. Nucl., Lett.* (submitted).
4. *Yeremin A. et al.* Experimental Tests of the Acceleration of ^{50}Ti Ions and Study of ^{50}Ti Induced Complete Fusion Reactions with SHELS Separator // *Part. Nucl., Lett.* (submitted).
5. *Родин А. М. и др.* Сепаратор MASHA на пучке тяжелых ионов для определения масс и ядерно-физических свойств изотопов тяжелых и сверхтяжелых элементов // ПТЭ (направлено).
6. *Kozulin E. M. et al.* Shell Effects in Damped Collisions of ^{88}Sr with ^{176}Yb at the Coulomb Barrier Energy // *Phys. Rev. C.* 2014. V. 89. P. 014614-1–014614-5.
7. *Itkis M. G. et al.* Nuclear Reaction Mechanisms Induced by Heavy Ions // *Exciting Interdisciplinary Physics. FIAS Interdisciplinary Science Series. Switzerland: Springer Intern. Publ., 2013. P. 33.*
8. *Сидорчук С. И. и др.* Корреляционные исследования низкоэнергичного спектра ^{10}He // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2013. Т. 77, №4. С. 398.
9. *Sobolev Yu. G. et al.* A New Set-up for Total Reactions Cross-Section Measurement // *Proc. of the Intern. Symp. on Exotic Nuclei / Eds.: Yu. Penionzhkevich, Yu. Sobolev. World Sci. Publ. Co., 2013. P. 431.*
10. *Vajta Zs. et al.* A Study of the Neutron-Rich ^{25}F Nucleus via Single-Step Fragmentation // *Acta Phys. Pol. B.* 2013. V. 44. P. 553.
11. *Zagrebaev V. I., Greiner W.* Production of Heavy Trans-Target Nuclei in Multinucleon Transfer Reactions // *Phys. Rev. C.* 2013. V. 87. P. 034608.
12. *Zagrebaev V. I., Karpov A. V., Greiner W.* Future of Superheavy Element Research: Which Nuclei Could Be Synthesized within the Next Few Years? // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. V. 420. P. 012001.
13. *Rachkov V. A. et al.* Effect of Neutron Transfer Channels in Fusion Reactions with Weakly Bound Nuclei at Subbarrier Energies // *Bull. Rus. Acad. Sci. Phys.* 2013. V. 77. P. 411; *Ibid.* 2014.
14. *Apel P. Yu.* Track-Etching // *Encyclopedia of Membrane Science and Technology. John Wiley and Sons, 2013. P. 1–25. DOI: 10.1002/9781118522318.*
15. *Didyk A. Yu., Wisniewski R.* Nuclear Reactions in Deuterium-Saturated Palladium under Irradiation by 10 MeV γ -Quanta, in Dense Molecular Deuterium at 1.2 kbar Pressure // *Eur. Phys. Lett.* 2013. V. 103. P. 42002-P1–42002-P6.
16. *Rymzhanov R. A. et al.* Effect of Swift Heavy Ion Irradiation on Transformations of Oxide Nanoclusters in ODS Alloys // *Phys. Status Solidi C.* 2013. V. 10, No. 4. P. 681.
17. *Skuratov V. A. et al.* Radiation Stability of the ODS Alloys Against Swift Heavy Ion Impact // *J. Nucl. Materials.* 2013. V. 442. P. 449–457.
18. *Tserenpil Sh. et al.* Chemical and Mineralogical Composition of the Mongolian Rural Soils and Their Uranium Sorption Behavior // *J. Environmental Radioactivity C.* 2013. V. 118. P. 105–112. DOI:10.1016/j.
19. *Tran Due Thiep et al.* Study of the Isomeric Ratios in Photonuclear Reactions of Natural Indium Induced by Bremsstrahlungs with Endpoint Energies in the Giant Dipole Resonance Region // *Part. Nucl., Lett.* 2013. V. 10, No. 4. P. 540.