

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ им. Г. Н. ФЛЕРОВА

В 2007 г. научная программа Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова в области физики тяжелых ионов включала в себя эксперименты по синтезу тяжелых и экзотических ядер с использованием пучков стабильных и радиоактивных изотопов, изучение механизмов ядерных реакций, исследования по физике и технике ускорителей, а также изучение взаимодействия тяжелых ионов с конденсированными средами. Эти направления исследований были представлены в 19 лабораторных и одном общеинститутском проекте:

- синтез новых ядер, исследование свойств ядер и механизмов реакций под действием тяжелых ионов (12 проектов);
- радиационные эффекты и модификация материалов, радиоаналитические и радиоизотопные исследования на ускорителях ЛЯР (5 проектов);
- развитие циклотронов ЛЯР для получения интенсивных пучков ускоренных ионов стабильных и радиоактивных изотопов (2 проекта);
- создание ускорительного комплекса радиоактивных пучков (проект DRIBs).

В 2007 г. время работы циклотронов ЛЯР составило около 9000 ч, что соответствовало плану и обеспечило проведение экспериментов в области физики низких и промежуточных энергий.

Синтез новых элементов

За последние годы в области экспериментальных и теоретических исследований сверхтяжелых элементов был достигнут существенный прогресс. Макромикроскопическая (ММ) модель ядра предсказывает значительное усиление стабильности тяжелых ядер с приближением к замкнутому сферическим оболочкам $Z = 114$ и $N = 184$. Более поздние расчеты, выполненные в рамках микроскопических моделей Скирма–Хартри–Фока–Боголюбова (SHFB) или релятивистского среднего поля (RMF), также предсказывают большой стабилизирующий эффект нейтрон-

ной оболочки $N = 184$, однако предполагают, что магическая протонная оболочка должна находиться при более высоких числах протонов $Z = 120–126$.

В серии наших предыдущих экспериментов были получены 18 новых нуклидов с $Z = 112–118$ и их дочерние изотопы в реакциях полного слияния актинидных мишенных ядер ($^{238}\text{U}–^{249}\text{Cf}$) с пучком ионов ^{48}Ca [1, 2]. Свойства распада этих ядер обнаружили значительное увеличение их стабильности с приближением к предполагаемому магическому числу нейтронов. Нуклиды с наибольшим числом протонов и нейтронов $^{293}116$ ($N = 177$) и $^{294}118$ ($N = 176$), синтезированные в реакциях с наиболее тяжелыми изотопами ^{248}Cm и ^{249}Cf , которые могут быть использованы в таких экспериментах, имеют все же на 7–8 нейтронов меньше предсказанного магического числа. Можно ожидать, что дальнейшее увеличение числа нейтронов в ядрах приведет к дальнейшему увеличению их стабильности. Однако реакции со стабильными бомбардирующими ионами могут обеспечить большее число нейтронов только для еще более тяжелых элементов, для чего требуются пучки ионов тяжелее, чем ^{48}Ca . Например, для синтеза изотопов элемента 120 с максимальным числом нейтронов могут быть использованы три реакции: $^{238}\text{U} + ^{64}\text{Ni}$, $^{244}\text{Pu} + ^{58}\text{Fe}$ или $^{248}\text{Cm} + ^{54}\text{Cr}$, каждая из которых приводит к одному и тому же составному ядру $^{302}120$.

В соответствии с предсказаниями теории максимум выхода для канала испарения четырех нейтронов в реакции $^{244}\text{Pu} + ^{58}\text{Fe}$ ожидается при энергии $E_{\text{lab}} = 330$ МэВ. Вместе с тем вычисленное значение сечения оказалось значительно ниже чувствительности, которая может быть достигнута в эксперименте ($\sigma_{4n} \sim 0,02$ пб). Для оценки вероятности выживания составных ядер в процессе девозбуждения были использованы барьеры деления, вычисленные в рамках ММ-модели ($Z_{\text{magic}} = 114$). Соответственно, барьеры деления более тяжелых ядер становятся ниже, что приводит к постепенному умень-

шению вероятности выживания и сечения образования ядер. Напротив, согласно SHFB- и RMF-вычислениям барьеры деления ядер, а также вероятности их выживания должны увеличиваться с приближением к $Z = 120$.

Кроме того, использование реакций ядер актинидных элементов с бомбардирующей частицей, более тяжелой, чем ^{48}Ca (^{54}Ti , ^{58}Fe или ^{64}Ni), может уменьшить сечение слияния. Поэтому различное поведение реакции полного слияния и вероятности выживания, зависящей от величины барьера деления тяжелых составных ядер, может существенно повлиять на сечение образования ядер с $Z = 120$. Ожидаемые сечения могут варьироваться в широком диапазоне от 0,01 до 1 пб, что стимулирует дополнительный интерес к изучению реакций, приводящих к синтезу элемента 120.

Реакция $^{244}\text{Pu} + ^{58}\text{Fe}$ была выбрана из-за доступности мишенного материала и соответствующего пучка на циклотроне У-400. Облучение мишени ^{244}Pu пучком ^{58}Fe было выполнено в январе–марте 2007 г. Цепочки распада, которые могли бы быть приписаны изотопам элемента 120 или его дочерним ядрам, не наблюдались. Доза пучка в течение облучения составила $7,1 \cdot 10^{18}$, облучение проводилось при энергии ^{58}Fe 330 МэВ. Чувствительность эксперимента соответствует 0,4 пб для регистрации одного ядра (верхний предел сечения составляет 1,1 пб). Малое сечение, полученное в данной реакции, в сочетании с сечением, измеренным в реакции $^{249}\text{Cf}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{294}\text{118}$, по сравнению с соответствующими значениями для $Z = 114$ и 116 может свидетельствовать об удалении от области стабильности с $Z = 114$.

Еще одной важной причиной уменьшения сечения в реакции $^{244}\text{Pu}(^{58}\text{Fe}, xn)$ может являться увеличение запрета на образование составного ядра, вызванное повышением кулоновского отталкивания на 30 % по сравнению с реакцией $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, xn)$. Дальнейшие попытки синтеза элемента 120 в реакции $^{244}\text{Pu} + ^{58}\text{Fe}$ требуют увеличения чувствительности эксперимента. Можно ожидать, что более асимметричная реакция $^{248}\text{Cm} + ^{54}\text{Cr}$ окажется более предпочтительной.

Радиохимические исследования сверхтяжелых элементов

Химия элементов 112 и 114. В марте–апреле 2007 г. был проведен химический эксперимент совместно с радиохимическими группами из PSI (Швейцария) и LLNL (США). По сравнению с предыдущим экспериментом 2006 г. [3] системы транспорта ядер отдачи и детектирования были улучшены. Прозрачность решетки, поддерживающей мишень, была увеличена до 85 %. Скорость транспортируемого газа была увеличена с 0,8 до 1,5 л/мин. Транспортный капилляр из PFA нагревался до 100 °С.

Остальное оборудование было таким же, как и в предыдущем эксперименте. Первая часть эксперимента была посвящена подтверждению результатов 2006 г. Мишень из ^{242}Pu ($1,4 \text{ мг/см}^2$), приготовленная на тонкой (725 мкг/см^2) Ti-фольге, облучалась в течение 3 недель на циклотроне У-400 ионами ^{48}Ca (интеграл $3,1 \cdot 10^{18}$) при энергии $(236 \pm 3) \text{ МэВ}$. Изучалась реакция $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n) \rightarrow ^{287}\text{114} \rightarrow ^{283}\text{112}$. За время эксперимента два атома $^{283}\text{112}$ адсорбировались на золотой поверхности детекторов при температурах -26 и -44 °С. Свойства распада $^{283}\text{112}$ (E_α , время жизни, ТКЕ осколков деления дочернего изотопа $^{279}\text{110}$) подтвердили результаты предыдущего «химического» эксперимента [3] и результаты, полученные ранее на газонаполненном сепараторе (ГНС). Получено значение энтальпии адсорбции -52 кДж/моль , описывающей четыре атома, которые наблюдались в «химических» экспериментах. В результате было установлено, что элемент 112 является очень летучим и в отличие от радона проявляет металлическое взаимодействие с поверхностью золота. Эти характеристики адсорбции характеризуют элемент 112 как типичный элемент группы 12. Благодаря увеличенной скорости доставки ядер отдачи был также зарегистрирован один α -распад $^{287}\text{114}$ ($T_{1/2} = 0,5 \text{ с}$). Энергия $E_\alpha = 10,04 \text{ МэВ}$ согласуется с энергией α -распада $^{287}\text{114}$.

Во время второй части эксперимента исследовалась реакция $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3-4n) \rightarrow ^{288-289}\text{114} \rightarrow ^{284-285}\text{112}$. За исключением материала мишени, все экспериментальные условия и оборудование были такими же, как и в первой части эксперимента. После облучения $4,0 \cdot 10^{18}$ частицами ^{48}Ca наблюдались два атома $^{288}\text{114}$ и их дочерние атомы $^{284}\text{112}$ (SF). Свойства распада этих двух изотопов были почти идентичны свойствам, полученным в предыдущих работах. Температуры адсорбции для $^{287}\text{114}$ и $^{288}\text{114}$, определенные в эксперименте, составили приблизительно -80 °С. Впервые установлен факт, что летучесть элемента 114 ближе к тяжелым благородным газам, чем к летучести его более легкого гомолога свинца.

Экспериментальное изучение реакции $^{136}\text{Xe} + ^{136}\text{Xe}$. Эксперимент по изучению симметричной реакции $^{136}\text{Xe} + ^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{272}\text{Hs}^*$ был проведен в июне–июле 2007 г. Пучок $^{136}\text{Xe}^{16+}$ интенсивностью до 2,5 емкА проходил через 4 мкм разделительную Ti-фольгу с начальной энергией 750 МэВ. Мишень (^{136}Xe с обогащением 99 %) находилась при нормальном давлении. Толщина мишени составляла $3 \cdot 10^{18}$ атомов Xe ($2,5 \text{ мг/см}^2$). Энергия пучка в центре мишенной камеры составляла 650 МэВ. Вторая фольга (13 мкм Be) разделяла объем газовой Xe-мишени и объем газовой камеры-ловушки. Продукты ядерных реакций останавливались в объеме камеры, через которую со скоростью 0,9 л/мин пропускали транспортный газ (70 % He, 20 % Ar и 10 % O₂). Концентрацию паров воды в газе перед

введением его в камеру снижали до $< 10^{-6}$ пропусканьем газа через патрон, содержащий осушитель P_2O_5 . Продукты реакции переносились транспортирующим газом, проходящим через кварцевую трубку длиной 30 см, содержащую в себе тампон из кварцевой ваты. Трубка, предназначенная для фильтрации аэрозолей, нагревалась до $650^\circ C$ и обеспечивала развитую поверхность для реакции окисления Os и Hs до их тетраоксидов. Оксиды транспортировались через 8-м трубку из перфтороалкокси полимера (PFA) к детектирующей системе. Детектирующая система состояла из 8 пар кремниевых PIN-фотодиодов с активной площадью 1×1 см. Расстояние между противоположными диодами составляло 1,5 мм. Система регистрации охлаждалась до температуры $-50^\circ C$ в соответствии с температурой осаждения HsO_4 . Для испытания оборудования газового транспорта и системы регистрации, а также для оценки времени транспорта ядер отдачи и выбора подходящих параметров основного эксперимента был проведен модельный эксперимент с реакцией $^{20}Ne + ^{156}Dy \rightarrow ^{176}Os^*$. В результате модельного эксперимента с использованием ^{169}Os сделана оценка времени газового транспорта, которое составило 3 с. За четыре недели измерения интеграл пучка составил $3,6 \cdot 10^{17}$ частиц. Ни спонтанных делений, ни α -распадов с энергией выше 7 МэВ не наблюдалось. При накопленной дозе пучка наблюде-

ние одного распада соответствует в данных условиях эксперимента сечению ~ 3 пб для полной толщины мишени.

Деление ядер

В 2007 г. основной задачей группы было проведение исследований динамики процессов образования и распада сверхтяжелых ядер. Основное внимание уделялось изучению влияния входного канала, эволюции формы составного ядра и конкуренции различных выходных каналов (деление, квазиделение). Измерения угловых, массовых и энергетических распределений позволили получить информацию как о процессе деления составного ядра, так и о процессе квазиделения. Были измерены сечения этих процессов. Эксперимент проведен в ЛЯР ОИЯИ в октябре 2007 г. на двухплечевом время-пролетном спектрометре CORSET. Эксперимент был посвящен изучению процессов слияния-деления и квазиделения в реакции $^{36}S + ^{238}U$. Участники эксперимента: ЛЯР им. Г.Н.Флерова, Universite Libre de Bruxelles (Бельгия), Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università di Napoli (Италия), Institut de Recherches Subatomiques (Франция), Laboratori Nazionale di Legnaro (Италия), Department of Physics of University Jyvaskyla (Финляндия), а также институты ЮАР.

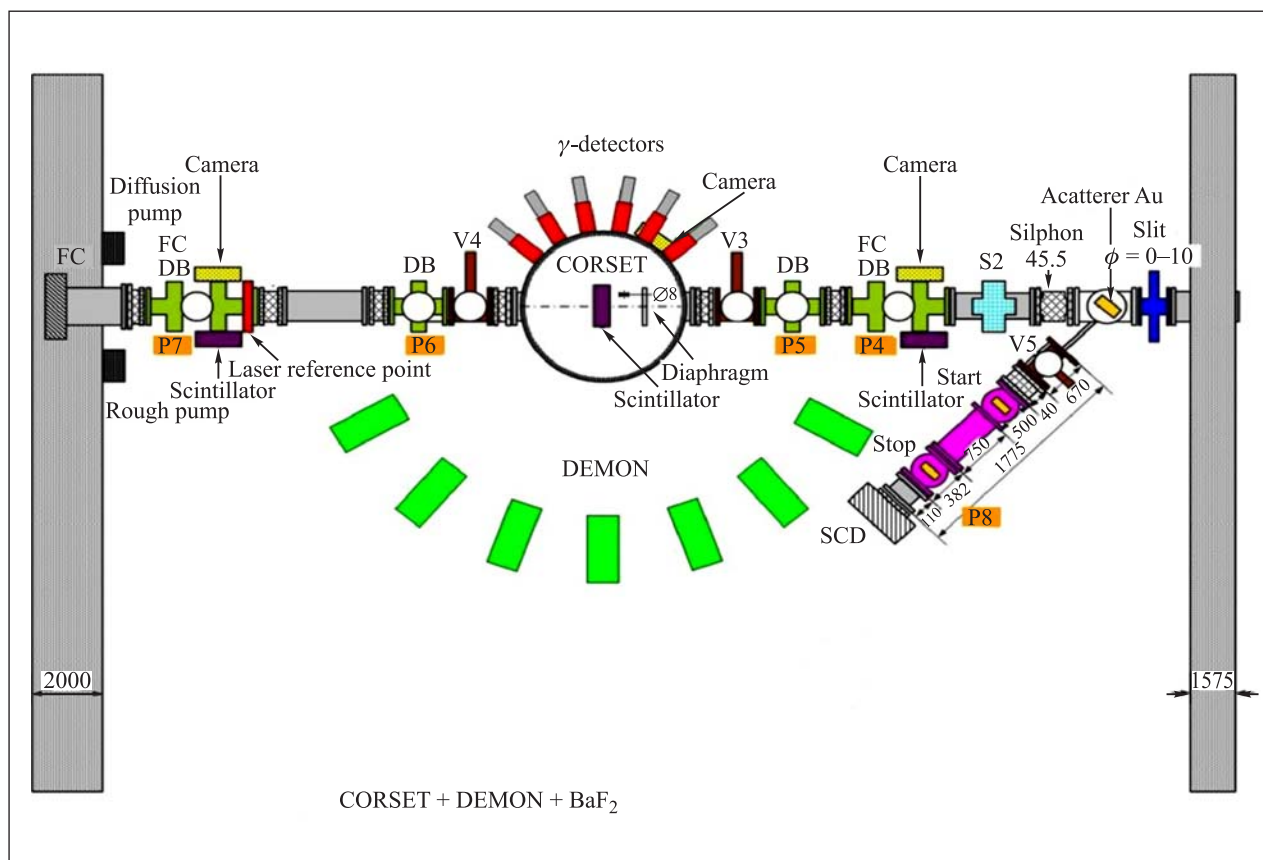


Рис. 1. Схема эксперимента: DB — блок диагностики; FC — цилиндр Фарадея; P — насос; S — стиринг; V — шибер

В результате были измерены абсолютные сечения захвата, слияния–деления и квазиделения для реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ в энергетическом диапазоне 170–220 МэВ с шагом около 10 МэВ. Детекторы, установленные под углами $\theta = 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160$ и 165° , обеспечивали одновременные измерения полного сечения квазиупругого рассеяния $\sigma_{\text{qe}}(\theta)$. Как видно из выражения для эффективной энергии $E_{\text{eff}} = 2E/(1 + \text{cosec}(\theta/2))$, такая геометрия измерения позволяет более детально измерить энергетическую зависимость сечения и точно определить, какой энергии соответствует максимум σ_{ER} . Кроме того, может быть выполнена проверка на эквивалентность измеренного полного сечения деления и сечения захвата. Подобный экспериментальный подход недавно был использован в реакции $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ в iThemba LABS (ЮАР). Схема эксперимента показана на рис. 1.

В 2007 г. проведен эксперимент, посвященный изучению массового распределения фрагментов в реакции $^{238}\text{U}(d, pf)$ при промежуточной энергии. Эксперимент выполнен в рамках сотрудничества между ЛЯР ОИЯИ, LNS (Катания, Италия), Accelerator Laboratory of the University Jyvaskyla (Финляндия), Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università di Napoli (Италия) и IN2P3 (Франция). Для измерения нейтронов, γ -излучения и легких заряженных частиц (протонов) в совпадении с фрагментами деления в реакции $^{238}\text{U}(d, f)$ при энергии $E_d = 125$ МэВ использовалась установка CORSET + DEMON + BaF + LCP. Мы изучали суперасимметричную моду деления, возникающую благодаря влиянию ядерных оболочек $N = 50$ и $Z = 28$ (мода деления ^{78}Ni). В настоящее время проводится анализ полученных экспериментальных данных.

Исследование сечений деления было продолжено в рамках сотрудничества с LNL (Леньяро, Италия). В этом году завершен и опубликован в работе [4] анализ экспериментальных данных, полученных в LNL. Получены массовые, энергетические и угловые распределения фрагментов деления для реакций $^{48}\text{Ca} + ^{144,154}\text{Sm} \rightarrow ^{192,202}\text{Pb}$, $^{40}\text{Ca} + ^{154}\text{Sm} \rightarrow ^{194}\text{Pb}$. Подавление слияния и квазиделения при энергиях около и ниже кулоновского барьера наблюдалось для реакций с деформированным ядром мишени ^{154}Sm . В эксперименте были получены сечения квазиделения. В случае сферического мишенного ядра ^{144}Sm признаки квазиделения не наблюдались.

Сепаратор ВАСИЛИСА

В течение 2007 г. продолжались эксперименты по изучению свойств распада трансфермиевых ядер в области деформированных нейтронных оболочек в реакциях $^{22}\text{Ne} + ^{242}\text{Pu}$, ^{238}U . Эксперименты проводились на сепараторе ВАСИЛИСА с новой систе-

мой регистрации. Эти работы являются продолжением программы синтеза сверхтяжелых элементов и исследования свойств распада изотопов трансфермиевых элементов.

В результате облучения вращающейся мишени ^{238}U интенсивным пучком ^{22}Ne ($\sim 2,0$ рмкА) были получены изотопы $^{255,256}\text{No}$. Эксперимент проходил с использованием системы регистрации GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the ELectromagnetic Analyser). Во время эксперимента регулярно проводились калибровочные измерения на мишенях ^{164}Dy и ^{174}Yb , в которых получались хорошо изученные изотопы Rn и Th, в частности, известное изомерное состояние ^{207}Rn с временем жизни 181 мкс.

В настоящее время проводится анализ полученных данных. Совершенствуются система электроники и конструкция камеры в фокальной плоскости, что позволит увеличить эффективность и чувствительность системы регистрации в будущих экспериментах. В частности, число электронных каналов, предназначенных для регистрации β -излучения, будет увеличено для более эффективного измерения β -совпадений. Толщина стенок алюминиевой камеры в фокальной плоскости будет уменьшена с целью увеличения эффективности регистрации низкоэнергетических γ -квантов.

В результате модернизации установки будет достигнута довольно высокая ($\sim 5\%$) эффективность трансмиссии медленных продуктов реакции — ядер отдачи. Это означает, что необходимая статистика для α - γ - и α - β -совпадений в фокальной плоскости сепаратора для нейтроноизбыточных изотопов Rf из реакции $^{22}\text{Ne} + ^{242}\text{Pu}$ будет получена в течение одного месяца облучения. Этот эксперимент запланирован на ближайшее время.

Также планируется провести систематическое исследование спонтанного деления трансфермиевых ядер в реакциях полного слияния $^{44}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ и $^{22}\text{Ne} + ^{242}\text{Pu}$. Для этого был создан большой детектор, состоящий из 60 ^3He -счетчиков, расположенных вокруг полупроводникового детектора в фокальной плоскости. Этот детектор позволит измерять множественность нейтронов из процесса спонтанного деления тяжелых трансфермиевых ядер.

В 2008 г. будет начата модернизация сепаратора для исследований свойств распада изотопов трансфермиевых элементов.

Два эксперимента, посвященные изучению химических свойств 112 и 114 элементов, синтезированных в реакциях полного слияния ^{48}Ca с мишенными ядрами ^{238}U , ^{242}Pu , ^{244}Pu , проводились сотрудниками сектора совместно с сотрудниками химического отдела ЛЯР.

Наиболее важные результаты, полученные на сепараторе, опубликованы в работах [5–7].

Фрагмент-сепаратор COMBAS

В течение 2007 г. был выполнен анализ и интерпретация экспериментальных данных, полученных ранее на фрагмент-сепараторе COMBAS в реакции ^{22}Ne (40 А МэВ) + ^9Be . Для описания зарядовых и изотопных скоростных распределений продуктов реакции, вылетающих под углом 0° , была использована гибридная модель (квантово-молекулярная динамическая модель + статистическая модель распада). Квантово-молекулярная динамическая модель описывает образование первичных продуктов реакции как в основном, так и в возбужденных состояниях. Статистическая модель описывает распад возбужденных продуктов в конечные состояния. Результаты анализа показали, что зарядовые и скоростные распределения хорошо воспроизводятся с помощью симуляции, в которой взаимодействие нуклонов в среднем поле на 80 % является однотельным и на 20 % — двухтельным. Скорости фрагментов, превышающие скорость налетающей частицы, модельными вычислениями не предсказываются. Работа выполнена в сотрудничестве с Институтом ядерной физики (Краков, Польша). Результаты этих симуляций будут опубликованы в журнале «Acta Physica Polonica B».

Для корреляционных измерений на фрагмент-сепараторе COMBAS создана мультidetекторная система, включающая позиционно-чувствительные (32 стрипа) детекторы Si ΔE и детекторы CsI(Tl) E . Для регистрации длиннопробежных легких частиц опробованы толстые коаксиальные Si(Li) дрейфовые детекторы. Регистрация монохроматических частиц ^6He и ^{7-9}Li с энергией от 150 до 300 МэВ показала, что разрешение Si(Li) коаксиальных детекторов составляет 0,5–0,7%. Также детектиру-

ющая система практически полностью укомплектована многоканальной электроникой, отвечающей требованиям спектроскопических измерений с высоким разрешением.

Экзотические моды распада, 4 π -детектор FOBOS

В наших предыдущих экспериментах, посвященных изучению спонтанного деления ^{252}Cf , обнаружены многочисленные указания на существование необычного, по крайней мере тройного, канала распада, названного тройным коллинеарным кластерным распадом. Для исследования наблюдаемого эффекта необходимо детальное исследование различных делящихся ядерных систем при различных энергиях возбуждения вплоть до порога выживания ядерных оболочек. Одной из выбранных для изучения реакций была реакция $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$.

Эксперимент выполнен на пучке тепловых нейтронов реактора ИБР-2 в Лаборатории нейтронной физики с помощью двухплечевого спектрометра мини-FOBOS. Детекторы спектрометра позволяют находить как первичные, так и конечные массы фрагментов (т. е. до и после сброса нейтронов), вектор скорости (импульса), а также пробег фрагмента в газе ионизационной камеры в каждом плече спектрометра.

В экспериментах наблюдался специфический двумерный бамп в распределении масса–масса фрагментов деления (см. рис. 2, а). Эффект проявляется только в одном плече спектрометра, а именно со стороны подложки мишени. Выход событий, образующих бамп, составляет около $5 \cdot 10^{-3}$ на одно двойное деление. Эта оценка была получена после вычитания «хвоста» 2 из «хвоста» 1. Соответствующий

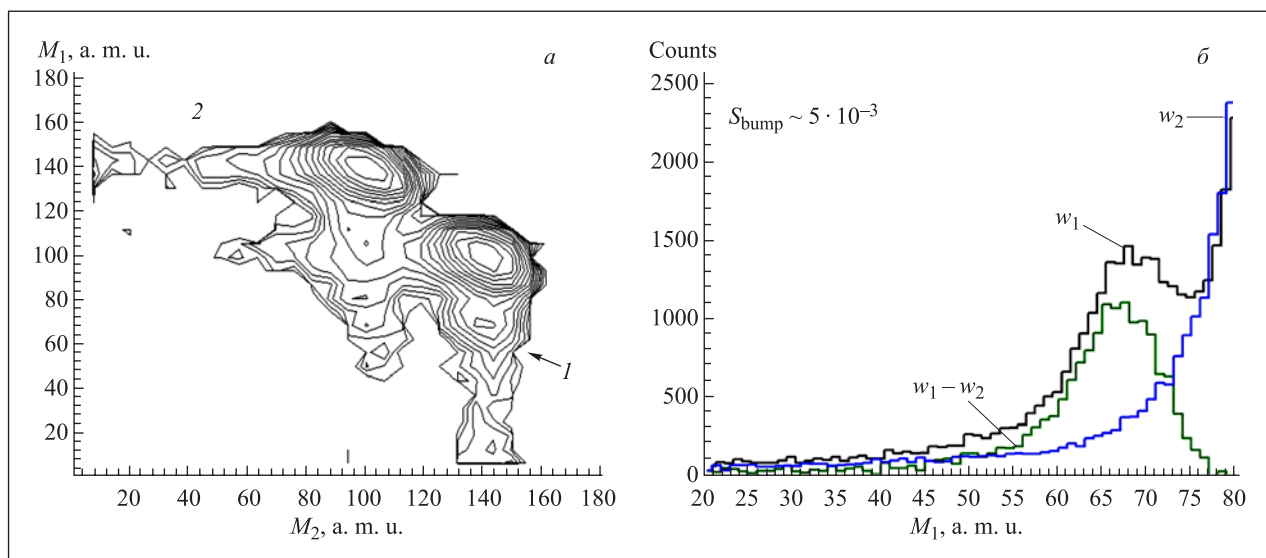


Рис. 2. а) Распределение масса–масса фрагментов (логарифмическая шкала), полученное в реакции $^{235}\text{U}(n, f)$. Обсуждаемая особенность спектра 1 обозначена стрелкой. б) Проекция распределения на ось M_1 : «хвост» 1 дает спектр w_1 , «хвост» 2 — спектр w_2 , а результат их вычитания обозначен как $w_1 - w_2$

разностный спектр (собственно бамп) показан на рис. 2, б. Максимум выхода в бампе лежит в окрестности масс 68–70, ассоциирующихся с магическими изотопами Ni.

Еще одно проявление кластеризации было получено в результате специальной обработки распределения масса–масса фрагментов. Был произведен отбор фрагментов деления по их скорости и импульсу. Мы отобрали события, имеющие приблизительно одинаковые скорости и лежащие одновременно вне «хвостов» рассеянных событий в распределении фрагментов по импульсам.

Обращает на себя внимание специфическая структура в центре распределения, показанного на рис. 3. Она выглядит подобно прямому углу с вершиной, лежащей в окрестности точки (68, 68) а. е. м., которая предположительно отвечает магическому ядру $^{68}\text{Ni}_{40}$. С использованием такого же отбора подобная структура (прямоугольник) была выявлена нами ранее в распределении масса–масса фрагментов спонтанного деления ядра ^{252}Cf . Некоторые точки на распределении лежат приблизительно на линии $M_1 + M_2 = \text{const}$. Соответствующий «потерянный фрагмент» также связан с известной нейтронной оболочкой $N = 40$.

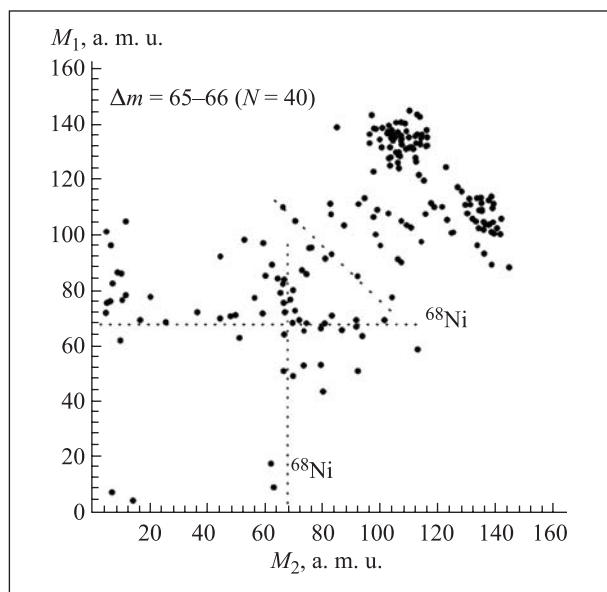


Рис. 3. Распределение масса–масса для событий деления с приблизительно равными скоростями, взятых вне «хвостов» рассеянных фрагментов в импульсном распределении. Специфическая структура в форме прямого угла ясно видна в центре распределения. Вершина угла расположена в точке (68, 68), предположительно связанной с магическим изотопом ^{68}Ni

Значение представленных результатов заключается в том, что они в основном подтверждают результаты, полученные нами ранее для различных делящихся систем [8, 9].

Фрагмент-сепаратор АКУЛИНА

Новые данные о структуре ^9He , полученные в работе [10], предполагают ревизию теоретических представлений о структуре более тяжелого изотопа гелия ^{10}He . Особенно интригующим представляется вопрос о роли состояния $(2s)^2$ в структуре ^{10}He . Для исследования ^{10}He была выбрана реакция передачи двух нейтронов $^3\text{H}(^8\text{He}, ^{10}\text{He})p$. Кроме того, изучалась аналогичная реакция $^3\text{H}(^6\text{He}, ^8\text{He})p$, в которой заселялись известные состояния ^8He . Сечения, полученные в последней реакции, можно сравнивать с сечениями, полученными в реакции $^3\text{H}(^8\text{He}, ^{10}\text{He})p$. Система регистрации, использованная в эксперименте, была аналогична системе, которая применялась ранее для исследований сверхтяжелого изотопа водорода ^5H : протоны, вылетающие из тритиевой газовой мишени назад в лабораторной системе, регистрировались в совпадении с ядрами $^8\text{He}(^6\text{He})$ из распада $^{10}\text{He}(^8\text{He})$. Продукты распада $^{10}\text{He}(^8\text{He})$ регистрировались в узком угловом конусе относительно оси пучка. Регистрация p – ^8He -совпадений в реакции $^3\text{H}(^6\text{He}, ^8\text{He})p$ являлась признаком образования ^8He в основном состоянии.

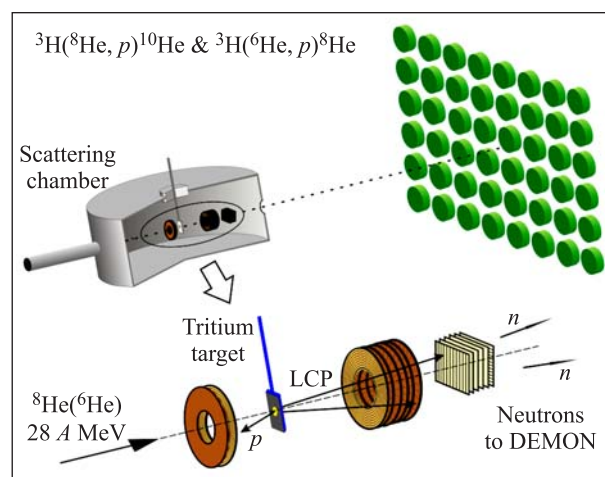


Рис. 4. Схема эксперимента

Схема эксперимента показана на рис. 4. Криогенная тритиевая газовая мишень толщиной $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ облучалась вторичными пучками ^8He и ^6He с энергией 25 А МэВ и интенсивностью около $1 \cdot 10^4$ и $2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ соответственно, полученными на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА. Телескоп, состоящий из двух позиционно-чувствительных кольцевых кремниевых детекторов, установленный на расстоянии 100 мм от мишени, предназначался для регистрации протонов, вылетающих в угловом диапазоне от 172 до 153° . Второй телескоп, установленный на расстоянии 350 мм от мишени, служил для измерения координат и ΔE – E -идентификации ядер $^8\text{He}(^6\text{He})$, вылетающих вперед в лабораторной системе. Нейтроны из распада $^{10}\text{He}(^8\text{He})$ регистри-

ровались с помощью 48 сцинтиляционных модулей времяпролетного нейтронного спектрометра DEMON.

Полученные в реакциях ${}^3\text{H}({}^8\text{He}, p){}^{10}\text{He}$ и ${}^3\text{H}({}^6\text{He}, p){}^8\text{He}$ спектры недостающей массы ${}^{10}\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ показаны на рис. 5. Спектр ${}^{10}\text{He}$ содержит 44 события, зарегистрированные в диапазоне энергии от порога распада ${}^8\text{He} + n + n$ до 16 МэВ. Необходимо отметить, что в диапазоне энергии от 0 до 2 МэВ не зарегистрировано ни одного события, что позволяет сделать вывод об отсутствии узких резонансов в ${}^{10}\text{He}$ в этом энергетическом диапазоне. Достигнутый предел сечения для реакции ${}^3\text{H}({}^8\text{He}, p){}^{10}\text{He}$, соответствующий одному зарегистрированному событию, составляет 16 мкб/ср. В то же время в спектре ${}^{10}\text{He}$ наблюдается выделенная группа из 10 событий в диапазоне от 2 до 5 МэВ с максимумом при энергии 3 МэВ. Необходимо отметить, что 4 из этих 10 событий были зарегистрированы в тройных p - ${}^8\text{He}$ - n -совпадениях. Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что наблюдаемые события не являются фоном и интерпретируются как проявление основного состояния ${}^{10}\text{He}$. Также заслуживает внимания тот факт, что для этих 10 событий характерно ярко выраженное взаимодействие в конечном состоянии между нейтронами, которые являются продуктами распада ${}^{10}\text{He}$.

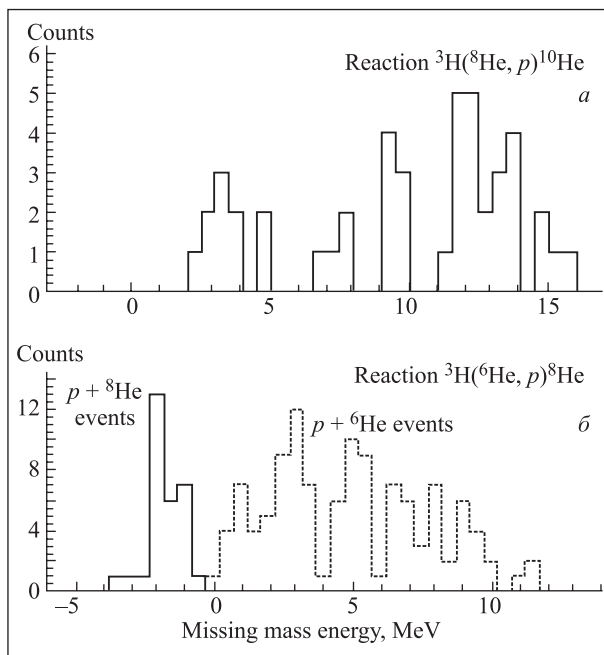


Рис. 5. Спектр недостающей массы для ${}^{10}\text{He}$ (а) и для ${}^8\text{He}$ (б). Энергия ${}^{10}\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ отсчитывается от порогов распада ${}^{10}\text{He} \rightarrow {}^8\text{He} + n + n$ и ${}^8\text{He} \rightarrow {}^6\text{He} + n + n$ соответственно

Основное состояние ${}^8\text{He}$, заселяемое в реакции ${}^6\text{He} + t$, соответствовало регистрации совпадений ${}^8\text{He} - p$ (см. нижний спектр на рис. 5). Сечение заселения основного состояния составляло ~ 200 мкб/ср. Спектр возбужденных состояний ${}^8\text{He}$ также показан

на рис. 5. В спектре наблюдается структура непосредственно над энергетическим порогом отделения двух нейтронов, равным 2,14 МэВ. Эта структура может рассматриваться как проявление мягкого дипольного резонанса 1^- , ранее не наблюдавшегося для ядра ${}^8\text{He}$. Более определенное заключение может быть сделано после детального анализа корреляций, характерных для этих событий.

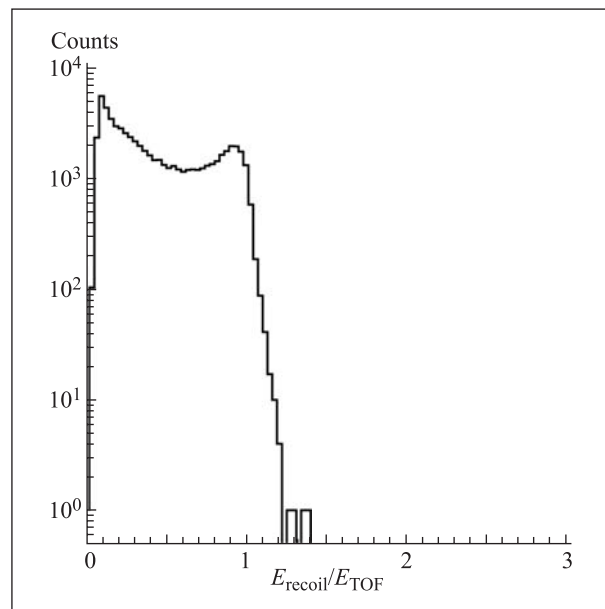


Рис. 6. Распределение $E_{\text{recoil}}/E_{\text{TOF}}$ для событий, зарегистрированных в модулях DEMON. Кинематический предел для одного нейтрона равен единице при условии идеального разрешения

Совпадения α -частицы с нейтроном, которые были зарегистрированы в эксперименте ${}^8\text{He} + t$ с большой статистикой, изучались в контексте поиска связанного тетранейтрона. На рис. 6 показан спектр отношения энергии нейтрона, измеренной спектрометром DEMON, к энергии нейтрона, вычисленной на основе измеренного времени пролета. События, лежащие выше кинематического предела, равного единице, могут соответствовать регистрации ядерной системы, состоящей из нескольких нейтронов. Аналогичный способ поиска связанного тетранейтрона ранее использовался при изучении реакции фрагментации ${}^{14}\text{B}$. Протоны с энергией выше кинематического предела в данном измерении не наблюдались.

Реакции, вызываемые ускоренными ионами стабильных и радиоактивных изотопов легких элементов

В 2007 г. продолжались исследования энергетических зависимостей сечения реакций с пучками ядер ${}^6\text{He}$, полученными на ускорительном комплексе DRIBs. Получены функции возбуждения для каналов слияния с последующим испарением нейтронов, а также для реакций передачи одного и двух

нейтронов на мишени ^{197}Au . Полученные сечения реакций сравнивались с результатами измерений на пучке ядер ^4He , проведенных на циклотроне У-200 ЛЯР ОИЯИ. Кроме подтверждения полученного ранее эффекта усиления сечения реакции слияния с ядрами ^6He в околобарьерной области энергий наблюдалось значительное сечение для реакции передачи одного нейтрона, ведущей к образованию ^{198}Au при энергиях, более чем на 10 МэВ меньших значения энергии, соответствующего величине кулоновского барьера реакции — глубокоподбарьерные реакции передачи. Большое сечение передачи одного нейтрона и его плавное падение в область низких энергий (до 5 МэВ) может свидетельствовать о квазисвободном механизме взаимодействия нейтрона ядра ^6He с ядром мишени.

Аналогичный пример хорошо известен для (d, p) -реакций, где в глубокоподбарьерной области энергии наблюдается существенное увеличение сечения (так называемый резонанс Оппенгеймера–Филипса, связанный с поляризацией слабосвязанного дейтрона). В реакциях с ^6He этот эффект может быть выражен сильнее из-за меньшей энергии связи ядра ^6He по сравнению с дейтроном и большими кулоновскими силами отталкивания α -частицы в ^6He по сравнению с протоном в дейтроне.

На рис. 7, а представлены функции возбуждения реакций передачи одного нейтрона при взаимодействии ^6He с ^{197}Au . В районе кулоновского барьера заметно большое сечение реакции передачи одного нейтрона с ядра ^6He на ядро мишени

^{197}Au [11]. Полученные данные для ^6He сильно отличаются от результатов, полученных на пучке ^4He . В то же время поведение функций возбуждения для пучков ^6He и дейтронов имеет сходный характер (см. рис. 7, б).

На пучке ^6He также были измерены изомерные отношения для продуктов реакций слияния ($^{196,198}\text{Tl}$) и реакций передачи ($^{196,198}\text{Au}$) [12]. Изомерные отношения для реакции слияния с последующим испарением пяти или семи нейтронов на один–три порядка превышают изомерные отношения для реакции передачи нейтронов. В случае реакций передачи изомерные отношения для ^{196}Au и ^{198}Au имеют различную зависимость от энергии бомбардирующего ядра ^6He и отличаются по величине: для реакции срыва нейтрона с ядра мишени ^{197}Au изомерное отношение выше, чем для реакции передачи одного нейтрона на ^{197}Au . Кроме важной информации о механизме взаимодействия слабосвязанных экзотических ядер эти данные представляют большой интерес для астрофизики.

На лазерном спектрометре ЛЯР проводились эксперименты по лазерной спектроскопии экзотических ядер. Впервые в цепочке, включающей радиоактивные изотопы европия, измерена сверхтонкая магнитная аномалия (СМА), связанная с радиусом распределения валентных нуклонов (эта величина характеризует магнитный радиус ядра). Обнаружена аномально большая, $> 5\%$, СМА в изотопических парах $^{151,152}\text{Eu}$ и $^{152,153}\text{Eu}$, а также корреляция между поведением зарядовых радиусов и СМА в цепочке

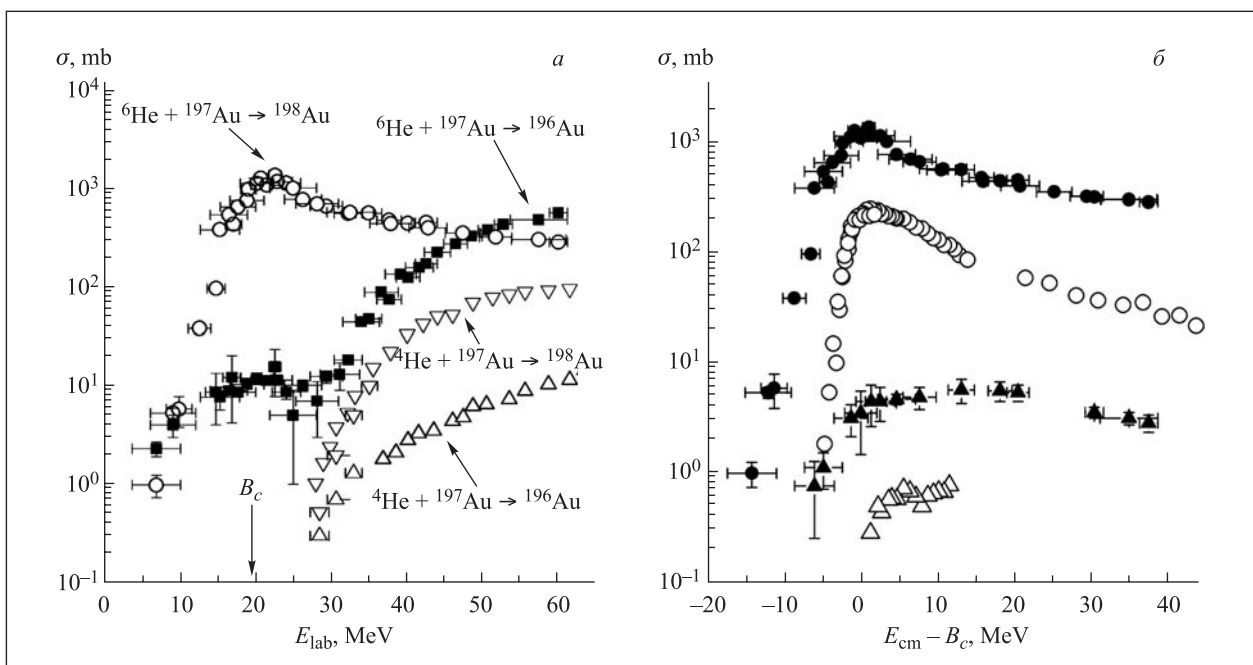


Рис. 7. а) Функции возбуждения реакций передачи одного нейтрона (○) на ^{197}Au и срыва нейтрона (■) с ^{197}Au на пучке ^6He . Для сравнения показаны результаты на пучке ^4He — (▽), (△) соответственно. б) Функции возбуждения образования ^{198}Au , полученные на пучках ^6He (темные символы) и дейтронов (светлые символы): кружки и треугольники — основное и изомерное состояния соответственно

$^{151-154}\text{Eu}$. Эти результаты указывают на перспективность подобных исследований по определению сверхтонкой магнитной аномалии в цепочке изотопов $^{150-155}\text{Eu}$ и являются необходимыми для развития теоретических моделей.

Теоретическая и компьютерная физика

На основе расширенной версии двухцентральной оболочечной модели получена многомерная поверхность потенциальной энергии тяжелой ядерной системы. Она зависит от нескольких степеней свободы и позволяет на единой основе проводить одновременный анализ процессов глубокоэластичного рассеяния, слияния и деления.

Динамика низкоэнергетических столкновений тяжелых ядер изучена в рамках реалистической модели с использованием многомерных уравнений Ланжевена [13, 14]. Изучено взаимодействие сильно связанных между собой каналов глубокоэластичного рассеяния, квазиделения, слияния и обычного деления. Рассмотрены столкновения очень тяжелых ядер ($^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$, $^{232}\text{Th} + ^{250}\text{Cf}$ и $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$) как альтернативный путь к образованию сверхтяжелых элементов с большим числом нейтронов. Найдена возможность большой передачи заряда и массы в этих реакциях за счет обратного (антисимметризирующего) процесса квазиделения, ведущего к образованию выживающих нейтронно-избыточных долгоживущих сверхтяжелых ядер. Во многих случаях время жизни составной гигантской системы двух соприкасающихся ядер оказывается довольно долгим ($\sim 10^{-20}$ с), достаточным для спонтанного образования позитронов в сверхсильном электрическом поле — фундаментального процесса квантовой электродинамики.

Околобарьерное слияние нейтронно-избыточных ядер изучено в рамках полуэмпирического метода связанных каналов с учетом промежуточных нейтронных передач и в рамках нестационарного уравнения Шредингера [15]. Возможность нейтронных передач с положительным значением Q -реакции значительно увеличивает барьерную проницаемость. Большое усиление глубокоподбарьерного слияния найдено для нейтронно-избыточных слабо связанных ядер (таких как ^6He). Этот эффект может оказаться чрезвычайно важным в процессах первичного нуклеосинтеза и при взрывах сверхновых.

Развит динамический подход к анализу угловых распределений осколков деления. Подход основан на комбинации трехмерной ланжевенской динамики параметров формы и метода Монте-Карло для проекции полного углового момента делящейся системы на ось симметрии. Оценено время релаксации колебаний этой проекции. Время релаксации $\sim 4 \cdot 10^{-21}$ с получено из подгонки экспериментальных данных по угловому распределению осколков деления при температурах $\sim 1-2$ МэВ.

Принципиальная возможность синтеза дважды магического ядра $^{298}114_{184}$ изучена в рамках флуктуационно-диссипационной модели [16]. Это ядро может быть получено в результате испарения нейтронов из сильно возбужденного первичного ядра $^{304}114$, которое обладает большой выживаемостью. Во-первых, из-за низкой энергии отделения нейтронов и быстрого остывания восстанавливается оболочечная поправка и, следовательно, делительные барьеры. Во-вторых, из-за приближения к замкнутой оболочке 184 растет сам делительный барьер. В результате вероятность выживания ядра $^{304}114$ не уменьшается с ростом энергии возбуждения вплоть до $E^* = 50$ МэВ, что ведет к повышенному сечению выхода испарительных остатков.

Метод проекционных операторов использован для вычисления обобщенного оптического потенциала легких ядер с учетом связи с каналами развала. В данном подходе удалось избежать используемых ранее упрощений. Предложенная модель применена к описанию упругого рассеяния двух- и трехкластерных легких ядер и процессов их развала в поле тяжелого ядра-мишени. Получено хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными. В рамках данного подхода вычислен оптический потенциал, описывающий упругое рассеяние ^6He (рассматриваемого как трехчастичная система $\alpha + n + n$) на ядре ^{12}C при энергии 40 МэВ/нуклон.

Размещенная на веб-сайте <http://nrv.jinr.ru/nrv> база знаний по низкоэнергетической ядерной физике, «Ядерные реакции — видео», была значительно расширена и улучшена.

1. В базу знаний включены программы вычисления драйвинг-потенциалов для взаимодействия деформированных и произвольно ориентированных ядер (фолдинг-процедура, потенциал проксимити и расширенная версия двухцентральной оболочечной модели). Написан соответствующий веб-диалог для работы с этими программами.

2. Добавлена новая программа расчета одночастичных состояний (энергии и волновые функции) в деформированных ядрах с использованием потенциала Вудса–Саксона.

3. База данных по слиянию атомных ядер дополнена несколькими сотнями оцифрованных экспериментальных сечений. Все ресурсы базы знаний находятся в свободном многопользовательском доступе через стандартные веб-браузеры с использованием CGI-технологии и Java-апплетов.

Физические основы нанотехнологии и радиационное материаловедение

Отработаны режимы формирования одной металлической нанопроволочки в штатных трековых мембранах, режимы формирования образцов из медных нанопроволочек для проведения АСМ

(атомно-силовая микроскопия) и ПЭМ (просвечивающая электронная микроскопия) исследований по всей их длине, а также режимы гальванического формирования монокристаллических медных нанопроволочек.

С использованием специального состояния образца кремния (наличие термически нестабильных радиационных дефектов и примесного водорода) экспериментально установлен факт атермического радиационного повреждения кремния в области ионизационных потерь высокоэнергетических тяжелых ионов — удаление примесного водорода в условиях сохранения дислокационно-петлевой структуры.

Исследования образцов кремния, легированных водородом и переоблученных высокоэнергетическими ионами Bi (710 МэВ) и Kr (85 и 250 МэВ), позволили обнаружить новый экспериментальный факт атермического выхода водорода из образца и особенности проявления данного эффекта в зависимости от величины удельных ионизационных потерь бомбардирующих частиц. Исследования проводились методами оптической и электронной микроскопии, а также с помощью спектроскопии ядер отдачи.

Совместно с ИФМ СО РАН (Екатеринбург) проведено изучение магнитных свойств никелевых нанопроволочек. Обнаружен эффект перехода ферромагнитного состояния нанопроволочки (30 нм) в диамагнитное и обратно при температурах в области 50–60 К.

Продолжены исследования процессов распыления поверхности модельных и конструкционных реакторных материалов в зависимости от величины ионизационных потерь энергии тяжелых ионов и степени дефектности образцов. Продолжены работы по изучению методами атомно-силовой микроскопии наноразмерных структурных дефектов на поверхности монокристаллов Al_2O_3 , $ZrO_2 \cdot Y$ и $MgAl_2O_4$, облученных ионами криптона, ксенона и висмута с энергиями, характерными для осколков деления. Продолжена систематизация данных по зависимости геометрических параметров радиационных дефектов, образованных единичными ионами от уровня ионизационных потерь энергии.

Продолжены *in situ* пьезоспектроскопические исследования механических напряжений в кристаллах радиационно стойких оксидов в процессе облучения тяжелыми ионами с энергиями выше 1 МэВ/а. е. м. в зависимости от плотности ионизации, флюенса ионов и температуры облучения. Проводятся анализ и систематизация полученных результатов.

Проведены первые эксперименты по изучению радиационной стойкости наноструктурированных полупроводников (GaN) по отношению к воздействию высокоэнергетических ионов.

Основные результаты опубликованы в работах [17–21].

Трековые мембраны и модификация полимеров

Продолжены разработки методик получения асимметричных нано- и микропор при химической обработке облученных ионами полимеров. Разработаны методы, позволяющие управлять профилем формирующихся нанопор. Исследованы электрохимические свойства асимметричных нанопористых мембран и показано, что геометрическая асимметрия приводит к возникновению диодоподобных свойств. Исследован эффект выпрямления электрического тока в заполненных электролитом асимметричных нанопорах в зависимости от концентрации электролита, размера пор и степени геометрической асимметрии [22]. Совместно с Институтом спектроскопии РАН (г. Троицк) продолжены работы по созданию методики атомно-пучковой нанолитографии с использованием асимметричных «трековых» нанопор.

Выполнены первые этапы работы по созданию мембран повышенной производительности и повышенной химической стойкости в рамках договора между Институтом кристаллографии им. А. В. Шубникова (заказчик) и Объединенным институтом ядерных исследований (исполнитель) по теме «Разработка научных основ технологии получения трековых мембран из полиэтилентерефталата и полиэтиленафталата».

Исследованы структура и электротранспортные свойства полиэтилентерефталатных трековых мембран, модифицированных в плазме тиофена. Установлено, что осаждение слоя полимера на поверхности трековой мембраны с помощью полимеризации тиофена в плазме приводит к образованию композитных мембран, обладающих асимметрией проводимости (выпрямляющим эффектом) в растворах хлористого калия. Обусловлено это наличием в модифицированной мембране двух слоев с антиполярной проводимостью. Показано, что допирование образованного в плазме слоя полимера йодом или воздействие УФ-излучением вызывает изменение плотности положительного заряда на его макромолекулах, что приводит к изменению выпрямляющего эффекта.

Разработана методика темплетного синтеза полимерных микро- и наноструктурных материалов (нанопроволок, нанотрубок, наномембран с селективным слоем) на основе сополимеров из стирола, бутилметакрилата и 4-аминостирола. Подобные полимерные композиции могут быть использованы в качестве матрицы в нелинейной оптике при создании электронных и оптических наноприборов. В качестве шаблона были использованы трековые мембраны из полиэтилентерефталата с эффективным диаметром пор от 0,15 до 0,55 мкм. Изучены закономерности образования данных материалов и исследованы их структурные свойства. Для получения полимерных наноматериалов был использован метод

полива. Показано, что варьирование параметров процесса осаждения сополимеров на поверхности трековых мембран дает возможность получать большой ассортимент композитных наномембран с селективным слоем, а также нанопроволок и нанотрубок с широким спектром характеристик.

Совместно с Институтом акустики (Мадрид, Испания) выполнены эксперименты по исследованию прохождения ультразвуковых волн различной частоты через трековые мембраны как модельные среды. Установлено, что при прохождении ультразвуковой волны через трековую мембрану она разделяется на два компонента — волну, распространяющуюся по матрице (полимеру), и волну, распространяющуюся по воздуху, заполняющему поры. Амплитуда и фаза второго компонента могут быть измерены и использованы для оценки параметров мембраны — пористости и диаметра пор [23].

Ультрачистые радионуклиды и радиоаналитические исследования

Получение изотопов. Получены ультрачистые (радионуклидно-чистые) препараты радиоактивных изотопов в состоянии без носителя: ^{88}Zr , ^{92m}Nb , ^{99}Mo (^{99m}Tc), ^{97}Ru , ^{109}Cd , ^{111}In , ^{175}Hf , ^{177}Ta , ^{178}W (^{178}Ta), ^{186}Re , ^{188}Re , ^{209}Po , ^{211}At , ^{237}U , $^{236,237}\text{Pu}$ и др.

Разработаны новые методы разделения и концентрирования радионуклидов (селективные ядерные реакции, сбор ядер отдачи, радиохимическое выделение), а также разделения ^{237}U и ^{238}U с фактором обогащения 10^6 .

Исследовалась реакция $^{226}\text{R}(\gamma, n)^{226}\text{R} \rightarrow ^{225}\text{Ac}$ с целью получения ^{225}Ac для биомедицинских исследований.

Радиоаналитические исследования. Проведены рентгено-флуоресцентный (РФА), а также гамма- и нейтронно-активационный анализы почв и мхов, металлургических загрязнений почв в районе свинцово-цинкового комбината в Болгарии.

Исследованы РФА и гамма-активационным анализом донные осадки, используемые в медицине, из озер Хар-Нуур и Их-Цайдам в Монголии.

Состояние радиоактивных элементов в водных средах. Обработываются результаты по определению K_d (коэффициентов распределения) для U, Mo, Eu, Ba, Ce, Mn и Y в системе почва–раствор в диапазоне pH 1–7 (Болгария).

Продолжены исследования распределения ^{237}U в системе гуминовые кислоты – раствор (Англия, Манчестерский университет).

Физика и техника ускорителей тяжелых ионов

Циклотрон У-400. В основном циклотрон У-400 использовался для получения пучков высокой интенсивности ^{48}Ca , которые широко используются в про-

грамме синтеза ряда новых изотопов сверхтяжелых элементов.

В последнее время проводится работа по подготовке циклотрона У-400 к полной модернизации. Целью модернизации является

- увеличение интенсивности пучков ядер с массами $A \sim 50$ и энергиями ~ 6 МэВ/А до 4 емкА (20 пмкА для $^{48}\text{Ca}^{5+}$);
- обеспечение возможности вариации энергии пучка в пределах фактора 5;
- уменьшение энергетического разброса пучка до уровня менее 10^{-3} ;
- обеспечение эмиттанса пучка на мишени не более $10 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$;
- уменьшение среднего магнитного поля;
- обеспечение легкого и быстрого изменения магнитного поля в диапазоне от 0,8 до 1,8 Тл;
- замена устаревшего оборудования на более современное.

Модернизация циклотрона У-400 будет проведена после модернизации ускорителя У-400М и установки нового экспериментального оборудования (сепаратор MASHA и газонаполненный сепаратор ГНС) в экспериментальном зале циклотрона У-400М.

Циклотрон У-400М. Сконструирована и испытана новая линия аксиальной инжекции циклотрона У-400М. Установлен новый ЭЦР-источник. В 2008 г. планируется установка второго, сверхпроводящего источника ионов DECRIS-SC2. Была собрана линия, предназначенная для транспортировки пучков низкой энергии (3–9 МэВ/нуклон). Модернизированный циклотрон У-400М введен в действие осенью 2007 г.

В рамках проекта DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beam) ускорители У-400 и У-400М будут использоваться для ускорения радиоактивных пучков ^6He и ^8He .

Циклотрон для прикладных исследований ИЦ-100. Циклотрон для прикладных исследований ИЦ-100 успешно применялся для регулярных облучений полимерных пленок и получения трековых мембран (ТМ). В облучениях использовались ускоренные пучки Kr^{15+} и Xe^{23+} интенсивностью 2,5 и 1,3 емкА соответственно. Пучки ионов Ar, Fe, I, W, ускоренные на циклотроне ИЦ-100, также использовались в различных научных и прикладных исследованиях.

Развитие ЭЦР-источников. Развитие ионных источников на основе электрон-циклотронного резонанса (ЭЦР) проводится в рамках модернизации ускорительного комплекса ЛЯР. Новые ЭЦР-источники также необходимы для получения вторичных радиоактивных пучков.

В новом поколении ЭЦР-источников DECRIS-SC для формирования аксиального магнитного поля используется сверхпроводящая магнитная система (2 и 3 Тл в максимуме распределения). Для охлаждения обмоток соленоида применяется компактная система охлаждения Gifford-McMahon. Магнитная система

позволяет использовать частоту 14–28 ГГц для нагрева плазмы. Компактные версии ионных источников DECRISS-SC2 и DECRISS-SC3, в которых будут использоваться частоты для нагрева плазмы 14 и 18 ГГц соответственно, в настоящее время находятся на стадии проектирования и производства.

Также разрабатывается проект ЭЦР-источника, в котором аксиальное и радиальное магнитные поля будут формироваться с помощью сверхпроводящих обмоток.

Для получения стабильных и радиоактивных однозарядных ионов в ЛЯР были разработаны ионные источники, работающие с частотой 2,45 ГГц. Магнитная система источников этого типа состоит из набора постоянных магнитов (NdFeB). С помощью этих источников можно получать пучки однозарядных ионов газов с эффективностью около 80% для Kr, Xe и около 15% для He. Эти источники смонтированы на установке DRIBs и используются для получения пучков ${}^6\text{He}^+$ и ${}^8\text{He}^+$, а также в сепараторе MASHA (Mass Analyzer of Super Heavy Atoms).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stoyer N. J. et al.* // Nucl. Phys. A. 2007. V. 787. P. 388c–395c.
2. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 011601.
3. *Eichler R. et al.* // Nature. 2007. V. 447. P. 72.
4. *Knyazheva G. N. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 75. P. 05562813.
5. *Hofmann S. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 32. P. 251–260.
6. *Lopez-Martens A. et al.* // Ibid. P. 245–250.
7. *Hofmann S. et al.* // Intern. J. Mod. Phys. E. 2007. V. 16. No. 4. P. 937–947.
8. *Zherebchevsky V. et al.* // Phys. Lett. B. 2007. V. 646. P. 12–18.
9. *Zherebchevsky V. et al.* // Pis'ma v ZhETF. 2007. V. 85. No. 3. P. 168–173.
10. *Golovkov M. S. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 021605(R).
11. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 31. P. 185.
12. *Kulko A. A. et al.* // Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2007. V. 34.
13. *Zagrebaev V. I., Greiner W.* // Nucl. Phys. A. 2007. V. 787. P. 363c.
14. *Greiner W., Zagrebaev V. I.* // Intern. J. Mod. Phys. D. 2007. V. 16. P. 141–153.
15. *Zagrebaev V. I. et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 75. P. 035809.
16. *Aritomo Y.* // Ibid. P. 024602.
17. *Рейтов В. Ф., Дмитриев С. Н.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 5. С. 41–45.
18. *Рейтов В. Ф., Микляев М. Ф.* // ПТЭ. 2007. № 3. С. 140–143.
19. *Рейтов В. Ф. и др.* // Там же. С. 144–147.
20. *Ursaki V. V. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 161908-1–161908-3.
21. *Kuzmin V.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2007. V. 256 P. 105–108.
22. *Apel P. Yu. et al.* // Nanotechnology. 2007. V. 18. P. 305302.
23. *Gómez Álvarez-Arenas T. E. et al.* // J. Membr. Sci. 2007. V. 301. P. 210–220.