

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ИМ. Г. Н. ФЛЕРОВА

В 2008 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 и одном общеинститутском проекте:

- синтез новых ядер, исследование свойств ядер и механизмов реакций под действием тяжелых ионов (11 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).

Время работы основных ускорителей ЛЯР в 2008 г. составило в соответствии с планом около 9000 часов.

Исследование реакции полного слияния $^{226}\text{Ra} + ^{48}\text{Ca}$

Для продолжения исследований области сверхтяжелых элементов требуются пучки ионов тяжелее ^{48}Ca , поскольку самым тяжелым изотопом, который может быть использован в подобных опытах в качестве мишени, является ^{249}Cf . Реакция слияния ^{249}Cf с ионами ^{48}Ca ведет к ядрам элемента 118, который был получен в 2005 г.

Однако при использовании более тяжелой бомбардирующей частицы сечение образования ядер может заметно уменьшиться. Для определения сте-

пени возможного уменьшения сечений начаты эксперименты по измерению сечений реакций полного слияния $^{226}\text{Ra} + ^{48}\text{Ca}$ и $^{226}\text{Ra} + ^{50}\text{Ti}$ с испарением 3–5 нейтронов. Из сопоставления сечений образования ядер в реакциях слияния с ионами ^{48}Ca и ^{50}Ti можно более точно оценить сечения реакций полного слияния ядер ^{243}Am , ^{249}Bk , ^{249}Cf с ионами ^{50}Ti и дальнейшие перспективы синтеза новых элементов 117, 119 и 120.

Первая серия экспериментов по изучению реакции полного слияния ядер ^{226}Ra и ^{48}Ca проведена в июле 2008 г. на газонаполненном сепараторе.

Мишень из ^{226}Ra толщиной $0,23 \text{ мг/см}^2$ облучалась ускоренными на циклотроне У-400 ионами ^{48}Ca . Полный интеграл пучка ^{48}Ca , прошедшего через мишень, составил $3,0 \cdot 10^{18}$ при энергии 233 МэВ и $2,9 \cdot 10^{18}$ при энергии 229 МэВ. Согласно расчетам эти энергии отвечают максимальному выходу продуктов реакции полного слияния $^{226}\text{Ra} + ^{48}\text{Ca}$ с испарением четырех и трех нейтронов соответственно, приводящих к образованию изотопов ^{270}Hs и ^{271}Hs .

Ранее данные изотопы наблюдались в эксперименте, в котором использовалась реакция $^{248}\text{Cm} + ^{26}\text{Mg}$, приводящая к тому же составному ядру ^{274}Hs . В этом эксперименте была измерена энергия α -частиц ядра ^{270}Hs $E_\alpha = 8,88 \pm 0,05 \text{ МэВ}$. При этом период полураспада составного ядра не измерялся, поскольку время образования ядра не регистрировалось. Для дочернего ядра ^{266}Sg наблюдалось спонтанное деление с периодом полураспада $0,36^{+0,25}_{-0,10} \text{ с}$. Измеренное сечение данной реакции составляет приблизительно 3 пб.

Цепочки распадов четырех ядер ^{270}Hs , полученных в наших экспериментах, приведены на рис. 1. Энергия α -частиц составила $9,03 \pm 0,09 \text{ МэВ}$, период полураспада этого ядра — $9,7^{+9,0}_{-3,1} \text{ с}$. Для спонтанно делящегося изотопа ^{266}Sg период полураспада составил $0,21^{+0,20}_{-0,07} \text{ с}$.

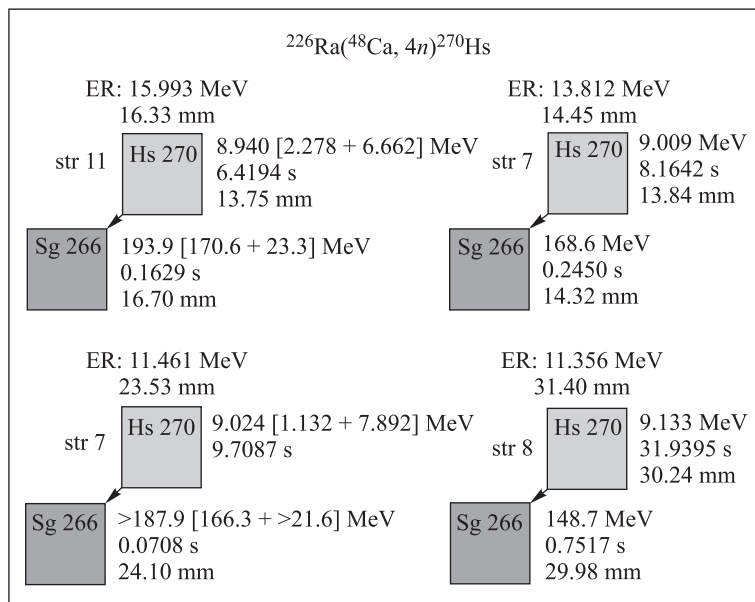


Рис. 1. Цепочки распада ядер ^{270}Hs и ^{266}Sg при энергии ионов ^{48}Ca 233 МэВ

Сечение реакции $^{226}\text{Ra}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{270}\text{Hs}$ при энергии ионов ^{48}Ca 233 МэВ равно $9,0^{+11,5}_{-4,9}$ пб. При энергии 229 МэВ ядра элемента 108 не наблюдались. Верхние границы сечений составили $\sigma_{3n} \leq 9,8$ и $\sigma_{4n} \leq 5,5$ пб. В ближайшее время эксперименты будут продолжены.

Результаты экспериментов опубликованы в работах [1, 2].

Сепаратор ВАСИЛИСА

В течение февраля–марта 2008 г. проведен очередной длительный эксперимент по изучению свойств распада трансфермиевых ядер в области деформированных нейтронных оболочек с использованием сепаратора ВАСИЛИСА и детектирующего комплекса GABRIELA (α -, β -, γ -спектроскопия). Специально для эксперимента были подготовлены тонкие эмиссионные пленки (~ 15 мкг/см²) для времяпролетной системы. В тестовых экспериментах для реакции $^{22}\text{Ne}+^{197}\text{Au}$ была получена эффективность транспортировки медленных ядер отдачи порядка 6%. В течение эксперимента в результате облучения вращающейся мишени ^{238}U интенсивным пучком ^{22}Ne ($\sim 2,0$ ч. мкА) получены спектроскопические данные для распада изотопов $^{255,256}\text{No}$. Далее с использованием пучка ^{40}Ar и мишеней ^{208}Pb , ^{181}Ta и ^{178}Hf были исследованы свойства распада изотопов $^{245,246}\text{Fm}$, набрана достаточная статистика для детального анализа свойств распада изотопов ^{217}Ra и ^{214}Th . Последний изотоп важен для подготовки эксперимента по исследованию изомерных свойств изотопа ^{218}U . В настоящее время данные анализируются.

В октябре 2008 г. проведен эксперимент по изучению свойств спонтанного деления изотопа ^{246}Fm ,

образующегося в реакции $^{40}\text{Ar}+^{208}\text{Pb}$. Для этой цели в фокальной плоскости сепаратора вокруг полупроводникового детектора был собран большой нейтронный детектор, состоящий из 62 ^3He -счетчиков. Этот детектор позволяет измерять множественность мгновенных нейтронов, сопровождающих спонтанное деление. Эксперимент продолжался 10 сут, была получена новая информация о спонтанном делении тяжелых изотопов.

В 2008 г. начата модернизация сепаратора ВАСИЛИСА. Планируется заменить центральную часть сепаратора, состоящую из трех электростатических дефлекторов, на комбинацию из двух электростатических дефлекторов и двух дипольных магнитов. Таким образом, вместо фильтра энергий сепаратор будет представлять собой фильтр скоростей. Модернизированный сепаратор ВАСИЛИСА будет иметь ионно-оптическую схему QQQ-E-D-E-QQQ (где Q — квадрупольная линза, E — электростатический дефлектор, D — дипольный магнит) и располагаться на канале №3 выведенных пучков У-400. Начато изготовление дипольных магнитов, приобретены источники питания.

Продолжается анализ данных, полученных в последних трех длительных экспериментах. Обнаружено изомерное состояние изотопа ^{209}Ra , образующееся в реакции $^{174}\text{Yb}(^{40}\text{Ar}, 5n)$ и распадающееся в основное состояние путем каскада 238-кэВ (M2) и 644-кэВ переходов. Измеренный период полураспада изомерного состояния составил 117(5) мкс. Согласно систематике состояние имеет спин-четность $I^\pi = 13/2^+$. Изомерное состояние также наблюдалось для ^{255}Lr , образующегося в реакции $^{209}\text{Bi}(^{48}\text{Ca}, 2n)$. Оно имеет период полураспада $T_{1/2} = 1,52(12)$ мс и энергию возбуждения $E^x > 720$ кэВ. Предполагается, что это изомер-

ное состояние имеет трехквaziчастичную конфигурацию. Получены предварительные результаты для α -распада изотопа ^{217}Pa .

Результаты проведенных экспериментов опубликованы в работах [3–5].

Химия элементов 112 и 114

В апреле–июне 2008 г. совместно с радиохимическими группами из PSI (Швейцария) и LLNL (США) был проведен эксперимент по изучению химических свойств элемента 114. Ранее, в 2007 г., на основании изучения поведения его изотопов $^{288}\text{114}$ и $^{287}\text{114}$ впервые было установлено, что летучесть элемента 114 ближе к летучести тяжелых благородных газов, чем его ближайшего гомолога — свинца. Однако относительно высокий фон спонтанного деления в эксперименте 2007 г. не позволил однозначно идентифицировать изотоп $^{289}\text{114}$, имеющий два долгоживущих продукта $^{285}\text{112}$ ($T_{1/2} \sim 29$ с, α) и ^{281}Ds ($T_{1/2} \sim 11,1$ с, SF).

В эксперименте 2008 г. были объединены возможности физической и химической сепарации продуктов ядерных реакций. Вращающиеся мишени из $^{244}\text{PuO}_2$ толщиной $0,4$ мг/см², нанесенные на подложку из 1,5-мкм Ti-фольги, облучали пучком ^{48}Ca при энергии пучка в центре мишени 238 ± 4 МэВ. Полный интеграл пучка составил $9,7 \cdot 10^{18}$. Исследовались продукты ядерных реакций $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)$. Аппаратура для химического разделения была установлена в фокальной плоскости газонаполненного сепаратора DGFRS. Ядра отдачи термализовались в камере, через которую проходил транспортирующий газ при скорости потока 2,1 л/мин. Газ-носитель переносил сепарированные летучие продукты реакции к термохроматографической аппара-

туре, включающей в себя криодетектор COLD. Криодетектор обеспечивал градиент температуры от 11 до -171 °С. Полная эффективность измерений оказалась в 2–3 раза ниже по сравнению с экспериментом 2007 г. за счет использования более тонких мишеней (ранее толщина была $1,4$ мг/см²) и предварительной физической сепарации с эффективностью 35 %.

Во время эксперимента была зарегистрирована одна цепочка распада, которую можно однозначно отнести к распаду $^{285}\text{112}$ и его дочернего изотопа ^{281}Ds (см. рис. 2, цепочка распада №4), являющихся продуктами распада $^{289}\text{114}$. Эту цепочку распада наблюдали при температуре осаждения -93 °С, т.е. близко к точке максимума осаждения, ожидаемой для изотопа $^{289}\text{114}$ по результатам эксперимента 2007 г. Помимо этой цепочки распадов было зарегистрировано еще два события спонтанного деления с энергиями осколков $131 + 50$ МэВ (температура -8 °С) и $88 + 101$ МэВ (температура -16 °С), которые мы относим к распаду изотопа $^{284}\text{112}$ ($T_{1/2} = 0,1$ с, SF). Так как изотоп с таким коротким временем жизни не мог достичь детекторной камеры при времени транспортировки 1,2 с, мы полагаем, что он является дочерним продуктом изотопа $^{288}\text{114}$ ($T_{1/2} = 0,8$ с), испустившего в капилляре вблизи от детекторной камеры не зарегистрированную нами α -частицу и перешедшего в $^{284}\text{112}$. Таким образом, регистрация дочернего изотопа $^{284}\text{112}$ также указывает на высокую летучесть 114-го элемента. Химическое осаждение $^{284}\text{112}$, наблюдаемое в COLD, согласуется с результатами предыдущих экспериментов по адсорбции элемента 112 на золоте. Однако однозначная идентификация $^{284}\text{112}$ только по спонтанному делению в данном случае невозможна.

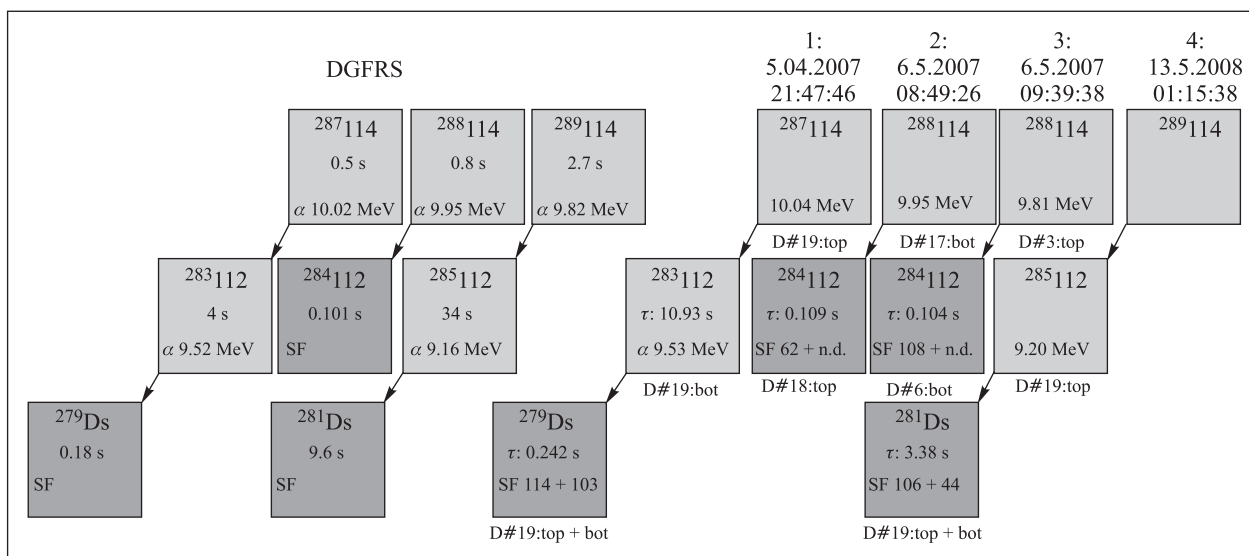


Рис. 2. Свойства распада $^{287-289}\text{114}$

На основании результатов, полученных в 2007 и 2008 гг., была рассчитана энтальпия адсорбции элемента 114 на золоте $-\Delta H_{\text{ads}}^{\text{Au}}(E114) = 35_{-3}^{+6}$ кДж/моль. Теоретические расчеты предсказывают образование металлических связей между элементом 114 и поверхностями переходных металлов, для которых $-\Delta H_{\text{ads}}^{\text{Au}}(E114)$ составляет 92 кДж/моль. Согласно этим расчетам температура осаждения элемента 114 на золоте приблизительно равна 150 °С. Расчеты, сделанные в рамках других подходов, дают значение энтальпии адсорбции элемента 114, равное 42 ± 5 кДж/моль. Сравнение теоретических предсказаний с результатами эксперимента приводит к выводу, что элемент 114 подобен благородным газам и в атомарном состоянии образует с поверхностью золота слабую физическую адсорбционную связь. Экспериментальный результат указывает на существенно повышенную устойчивость атомарного состояния элемента 114, что может объясняться заполнением стабилизирующей $7p_{1/2}^2$ подоболочки валентных электронов, существование которой предсказано расчетами, учитывающими релятивистские эффекты.

Деление ядер

В 2007 г. были проведены измерения массовых и энергетических распределений осколков деления и квазиделения в совпадении с нейтронами и γ -квантами в реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{274}\text{Hs}$ с использованием времяпролетного позиционно-чувствительного спектрометра CORSET и спектрометра DEMON [6]. В течение 2008 г. основное внимание было уделено обработке и анализу экспериментальных данных, полученных в реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{274}\text{Hs}$. Эксперимент был проведен в ЛЯР ОИЯИ в коллаборации с научными центрами Франции, Италии, Бельгии, Словакии, Бразилии и ЮАР, которыми были предоставлены для совместного использования установка DEMON, γ -детекторы, детекторы легких заряженных частиц, а также часть электронного оборудования. Измерения массовых и энергетических распределений позволили получить информацию как о процессе деления составного ядра, так и о процессе квазиделения.

Для исследования влияния асимметрии входного канала на динамику реакции образования сверхтяжелого ядра была выбрана комбинация $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{274}\text{Hs}$, ведущая к образованию того же самого составного ядра, что и в реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$, эксперименты по изучению которой проводились ранее. Сравнительный анализ массовых распределений фрагментов показал, что в случае реакции с ионами ^{26}Mg массовое распределение имеет форму, близкую к гауссовой, при энергиях как ниже, так и выше кулоновского барьера, в то время как в реакции с ионами ^{36}S массовое распределение меняется от асимметричного (при энергиях ниже кулоновского

барьера) к симметричному (при высоких энергиях). Такое различие можно объяснить влиянием асимметрии входного канала, что приводит к увеличению вклада процесса квазиделения для более симметричной реакции $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$. Массовое распределение фрагментов квазиделения в обеих реакциях главным образом формируется вблизи замкнутых оболочек с $Z = 28$ и $N = 50, 126$ (см. рис. 3).

В 2008 г. закончен анализ и опубликованы данные по исследованию влияния асимметрии входного канала реакции, которое подробно изучалось в реакциях $^{44}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb}$ и $^{64}\text{Ni} + ^{186}\text{W}$, ведущих к образованию одного и того же составного ядра ^{250}No . В обеих реакциях наблюдался вклад процесса квазиделения. В реакции с ионами ^{64}Ni квазиделение является доминирующим процессом, в то время как в реакции с ^{44}Ca основным каналом реакции является слияние-деление составного ядра ^{250}No . Также было установлено сильное влияние замкнутых оболочек с $Z = 28-50$, $N = 50-82$ на формирование фрагментов реакции как в случае квазиделения, так и для слияния-деления. Массовое распределение осколков деления составного ядра ^{250}No состоит из двух мод — симметричной и асимметричной, связанной с проявлением нейтронной оболочки $N = 82$ [7].

В 2008 г. закончен анализ и опубликованы экспериментальные данные по изучению взаимодействия двух сферических дважды магических ядер в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{256}\text{No}$ в широком диапазоне энергий ионов ^{48}Ca (206–242 МэВ). Получены массово-энергетические распределения фрагментов реакции, а также сечения захвата и сечения слияния-деления. Анализ массово-энергетических распределений показал, что свойства симметричных фрагментов в диапазоне масс 100–156 а.е.м. близки по своим характеристикам к процессу слияния-деления, описываемому моделью «жидкой капли», а процесс квазиделения сильно подавлен. Были обнаружены некоторые структурные особенности в массовых распределениях, обусловленные оболочечными эффектами. Высокоэнергетичная «super-short» мода была выявлена для фрагментов с массой тяжелого осколка 130–135 а.е.м. Вклад этой моды — порядка 2,5% при энергии 211 МэВ и уменьшается до 0,3% при энергии 234 МэВ [8].

В 2008 г. опубликованы результаты анализа экспериментальных данных, полученных в ЛЯР ОИЯИ, по изучению характеристик ^{274}Hs . Модальная структура в массовых распределениях осколков деления также обнаружена для ^{274}Hs , полученного в реакции $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$. Из анализа полной кинетической энергии (ТКЕ) фрагментов было установлено, что при ТКЕ больше 220 МэВ массовое распределение фрагментов очень узкое, в то время как для фрагментов, имеющих ТКЕ меньше 220 МэВ, массовое распределение имеет гауссову форму с шириной, предсказанной моделью «жидкой капли». Узкое массовое распределение фрагментов с большими

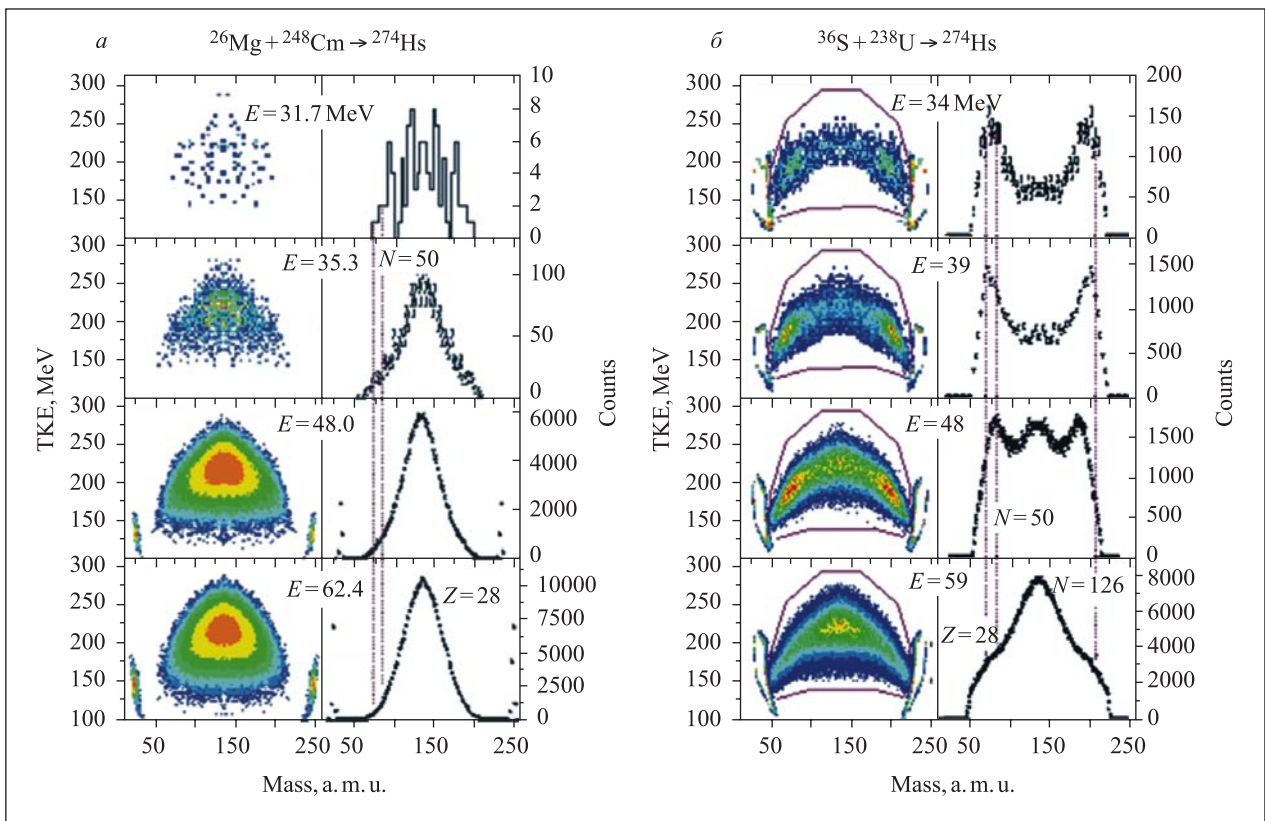


Рис. 3. Массово-энергетические распределения бинарных фрагментов, полученных в реакциях $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{274}\text{Hs}$ (а) и $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{274}\text{Hs}$ (б), ведущих к образованию одной и той же составной системы ^{274}Hs при энергиях вблизи кулоновского барьера (левая панель — массово-энергетические распределения, правая — массовые распределения для фрагментов, обозначенных контуром на массово-энергетических распределениях)

значениями ТКЕ является следствием того, что при симметричном делении ^{274}Hs фрагменты имеют число нейтронов, близкое к замкнутой нейтронной оболочке $N = 82$. Полная кинетическая энергия фрагментов деления также состоит из двух компонент: $\langle \text{TKE} \rangle = 198$ и 227 МэВ. Сильное увеличение выхода высокоэнергетичной симметричной моды деления, когда число нейтронов обоих фрагментов близко к $N = 82$, является общей тенденцией для деления сверхтяжелых ядер [9].

В рамках сотрудничества ЛЯР ОИЯИ и Университета г. Ювяскюля (Финляндия) в октябре 2008 г. был проведен эксперимент, посвященный изучению динамики реакции $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$, с целью использования данной реакции как возможного инструмента для синтеза сверхтяжелых элементов с $Z = 120$. Энергия ионов ^{64}Ni изменялась от 320 до 390 МэВ (выше и ниже кулоновского барьера). Массово-энергетические распределения бинарных продуктов реакции и энергия α -частиц, связанных с образованием этих продуктов, измерялись с помощью двухплечевого времяпролетного позиционно-чувствительного спектрометра CORSET и $\Delta E \times E$ -детекторов легких заряженных частиц (INFN, Италия). В настоящее время проводится обработка экспериментальных данных.

В ноябре–декабре 2008 г. проведены измерения сечения слияния в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ при энергиях вблизи кулоновского барьера. Основной целью этого эксперимента было определение полного сечения слияния для реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ путем измерения массовых и энергетических распределений осколочноподобных фрагментов, которые в основном получают в выходном канале реакции при энергиях вблизи кулоновского барьера. Экспериментальные данные сечения захвата и сечения деления для этой реакции показывают сильное расхождение по отношению друг к другу. Этот эксперимент был проведен на ускорителе TANDEM-ALPI Лаборатории г. Леньяро Национального института ядерной физики (Италия) с использованием установки CORSET.

Экзотические моды распада

В 2008 г. сделан существенный шаг в развитии методики выявления тонкой структуры (ТС) распределений масса–полная кинетическая энергия (M–TKE) продуктов ядерных реакций. Для реакций слияния-деления анализ ранее выявленных структур позволил заключить, что они, по-видимому, являются отображением линии разрыва, порождаемой

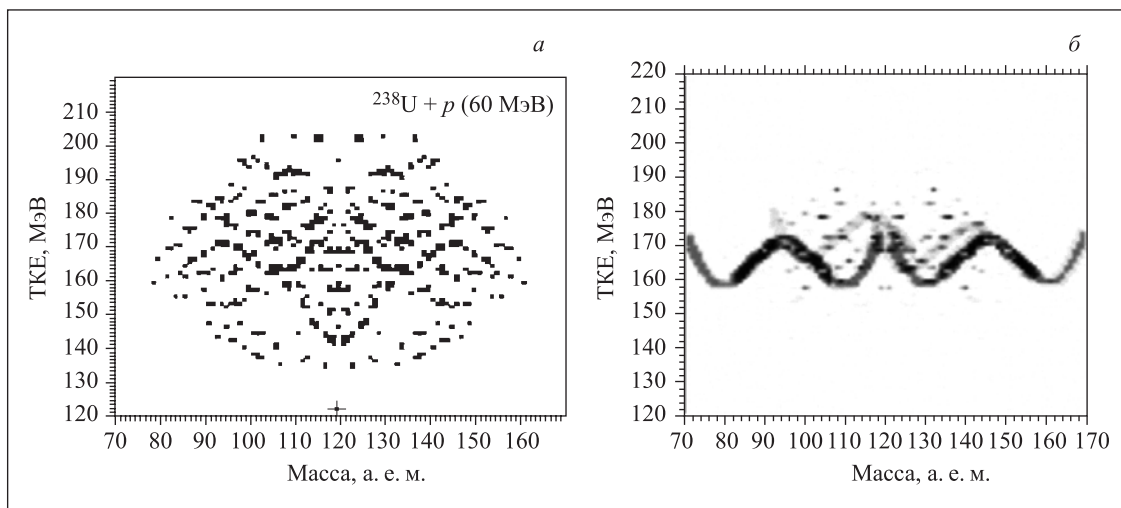


Рис. 4. Тонкая структура распределения масса–энергия, выявленная эвристическими методами (а). Структура, выявленная в этом же распределении в рамках морфологического анализа изображений (б). Доказано, что вероятность случайного образования выявленной структуры не превышает 10^{-3}

конкретной делительной модой, в координатах удлинение–масс-асимметрия делящегося ядра. До сих пор открытым оставался вопрос о надежности обнаружения обсуждаемой ТС.

Предложен оригинальный подход на базе морфологического анализа изображений, позволяющий количественно оценить надежность обнаружения ТС и усовершенствовать фильтр для ее выделения. Так, на рис. 4, а представлена ТС распределения М–ТКЕ осколков деления в реакции $^{238}\text{U} + p$ (60 МэВ), выделенная эвристическими методами с привлечением априорной информации о симметрии распределения. На рис. 4, б те же данные обработаны в рамках формализованного морфологического подхода без использования какой-либо дополнительной информации. Получено не только хорошее согласие изображений, но и количественная оценка надежности обнаружения. Доказано, что вероятность случайного образования выявленной структуры не превышает 10^{-3} .

Результаты экспериментов опубликованы в работах [10, 11].

Канал высокого разрешения АКУЛИНА

В 2008 г. на установке DRIBs изучались реакции полного и неполного слияния ^6He с мишенным ядром ^{166}Er при энергии пучка ^6He $E_{\text{lab}} = 55\text{--}64$ МэВ. Кроме того, исследовались реакции $^6\text{Li} + ^{165}\text{Ho}$ и $^6\text{Li} + ^{166}\text{Er}$ при энергии бомбардирующей частицы 58 МэВ. Схема эксперимента показана на рис. 5. В эксперименте использовалась система регистрации на основе шести HP Ge-детекторов с VGO-оболочками, предназначенными для подавления комптоновского рассеяния, детектор заряжен-

ных частиц, а также 8 модулей времяпролетного спектрометра DEMON, предназначенного для регистрации нейтронов. Эффективность регистрации одиночного γ -кванта с энергией $E_\gamma > 80$ кэВ и двух γ -квантов, зарегистрированных в совпадении, составляла 0,06–0,015 и $3 \cdot 10^{-3}$ – $2 \cdot 10^{-4}$ соответственно. Телескоп, предназначенный для регистрации заряженных частиц, состоял из трех кольцевых кремниевых детекторов и позволял регистрировать продукты реакций, испущенные в угловом диапазоне $15\text{--}40^\circ$. Полная толщина телескопа составляла 2,3 мм. Модули спектрометра DEMON регистрировали быстрые нейтроны (3–10 МэВ), испущенные в угловом диапазоне $\pm 15^\circ$ относительно направления пучка. Эффективность регистрации нейтронов составляла 1%. Триггером для записи события являлось совпадение двух γ -квантов.

Вероятности заселения были измерены для уровней основной ротационной полосы и полосы 8 в ^{166}Yb . Критические значения орбитального момента l_{cr} и параметр диффузности D_l характеризуют ширину диапазона орбитального момента, в котором коэффициенты трансмиссии T_l изменяются в диапазоне $0 \div 1$. Параметры l_{cr} и D_l , от которых в основном зависит сечение образования ^{166}Yb , были получены в результате подгонки экспериментальных данных с помощью кода EMPIRE. Результаты, полученные для реакций полного слияния $^{166}\text{Er}(^6\text{He}, 6n)^{166}\text{Yb}$ и $^{165}\text{Ho}(^6\text{Li}, 5n)^{166}\text{Yb}$, показаны на рис. 6. Численные результаты представлены в таблице. Для реакции $^{166}\text{Er}(^6\text{He}, 6n)^{166}\text{Yb}$ при энергии ^6He 64 и 55 МэВ были получены практически такие же значения критического орбитального момента $l_{\text{cr}} = 19,3$ и диффузности $D_l = 1,5$. В случае реакции $^{165}\text{Ho}(^6\text{Li}, 5n)^{166}\text{Yb}$ ($E_{\text{lab}} = 58$ МэВ)

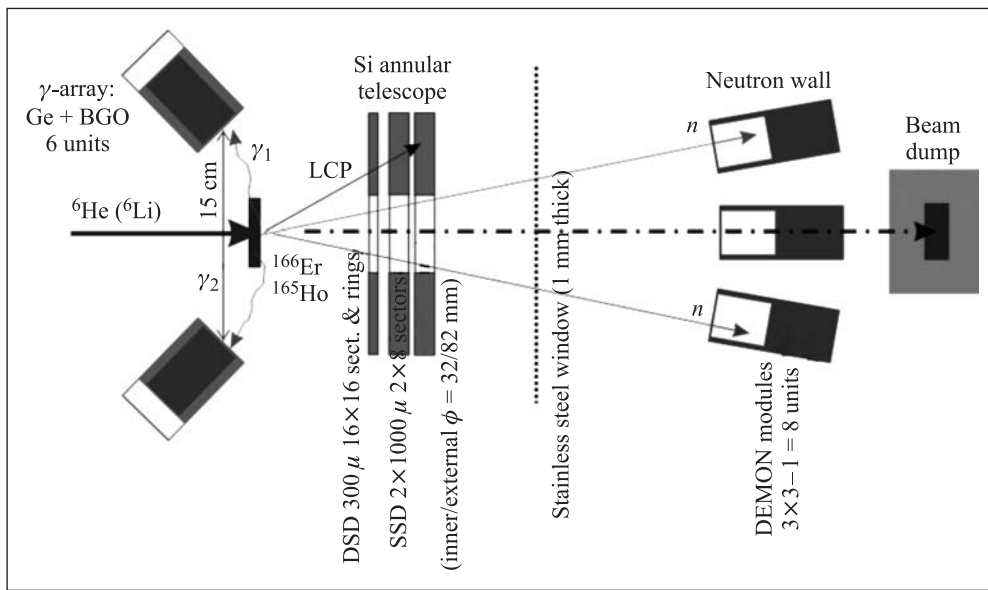


Рис. 5. Схема экспериментов по изучению полного и неполного слияния

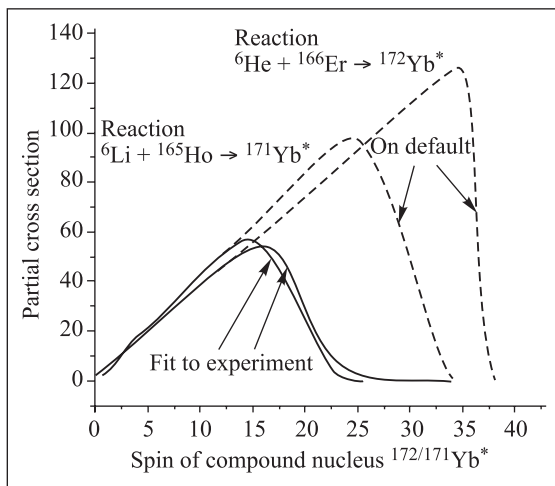


Рис. 6. Зависимость сечения полного слияния от величины орбитального момента. Сплошные линии получены в результате подгонки заселенностей состояний ^{166}Yb . Пунктирные линии показывают те же распределения, полученные с помощью кода EMPIRE

Сечение полного слияния σ_{fus} , сечение испарения нейтронов $\sigma_{5n}(\sigma_{6n})$, средние значения критического углового момента l_{cr} и параметр диффузности D_l , полученные в эксперименте и с помощью кода EMPIRE

Налетающее ядро, энергия, МэВ	$\sigma_{\text{fus}}/l_{\text{cr}}$, мб/ \hbar		Фактор подавления	σ_{5n}/D_l , мб/ \hbar	
	EMPIRE	Эксп.		EMPIRE	Эксп.
^6He , 64	2490/39,0	731/19,3	3,41	881/1,5	254/1,5
^6Li , 58	1770/32,5	737/18,6	2,40	656/0,2	244/0,4

полученное значение критического орбитального момента составляет $\sim 18,6$. Величины сечения полного слияния, соответствующие этим значениям критического углового момента, составляют 731 и 737 мб для ^6He и ^6Li соответственно.

Фактор подавления полного слияния представляет собой отношение сечения, вычисленного с помощью кода EMPIRE, и сечения, полученного из экспериментальных значений l_{cr} и D_l . Теоретиче-

ское значение сечения получено в рамках модели одномерного барьера проницаемости. Как следует из данных, представленных в таблице, фактор подавления для реакции $^{166}\text{Er} + ^6\text{He}$ больше, чем фактор подавления для реакции $^{165}\text{Ho} + ^6\text{Li}$. Этот результат мы интерпретируем как следствие отличия вероятностей слияния для ^6He и ^6Li . Уменьшение измеренного сечения в области больших угловых моментов (см. рис. 6) говорит о том, что в этой области

слияния не происходит. Естественно предположить, что при больших угловых моментах неполное слияние и/или развал слабосвязанного ядра становятся доминирующими процессами.

Результаты экспериментов опубликованы в работах [12–16].

Реакции, вызываемые ускоренными ионами стабильных и радиоактивных изотопов легких элементов

На ускорительном комплексе DRIBs с помощью подготовленной методики исследовались каналы реакций $^{206}\text{Pb}(^6\text{He}, 2n)^{210}\text{Po}$, $^{208}\text{Pb}(^4\text{He}, 2n)^{210}\text{Po}$ с образованием одного и того же составного ядра ^{212}Po . Эксперименту предшествовала работа по подготовке и проверке методики для вторичных пучков. В экспериментах использовался монохроматический пучок ^6He с высокой интенсивностью (до 10^8 c^{-1}). Разработаны две методики уменьшения энергии (ниже кулоновского барьера) без значительного ухудшения энергетического разрешения пучка ионов ^6He и ^6Li :

— с использованием магнитного спектрометра МСП-144 как монохроматора;

— с использованием внутреннего пробника ускорителя У-400.

Подготовлена установка для измерения наведенной α -активности на 16 независимых каналах. Использовался активационный метод идентификации и определения выходов продуктов ядерных реакций. В реакции $^{206}\text{Pb}(^6\text{He}, 2n)^{210}\text{Po}$ при энергетическом разрешении не хуже 0,8 МэВ наблюдалось значительное увеличение канала слияния в подбарьерной области энергий по сравнению с реакцией $^{208}\text{Pb}(^4\text{He}, 2n)^{210}\text{Po}$. Это подтверждает предположение о влиянии слабосвязанных нейтронов в ядре ^6He на механизм слияния.

Получены данные о полном слиянии ионов ^6Li с ядрами Pt и Bi, а также информация о каналах развала слабосвязанных ядер (^6He и ^6Li) с последующим слиянием образовавшихся продуктов с ядрами мишени. Полученные результаты свидетельствуют об усилении сечения передачи кластеров в этих слабосвязанных ядрах ($2n$ — в случае ^6He и d — в случае ^6Li).

Основные результаты проведенных в 2008 г. экспериментов представлены в публикациях [17–20].

Теоретическая и компьютерная физика

Проанализированы возможности и ограничения реакций «холодного» и «горячего» синтеза, слияния фрагментов деления, реакций передач и реакций с пучками радиоактивных ионов, ведущих к образованию новых сверхтяжелых (СТ) элементов и изотопов [21]. Показано, что при увеличении интенсивности пучка и эффективности регистрации (в общей

сложности на один порядок величины) могут быть синтезированы несколько новых изотопов элементов с $Z = 120–124$ в ядерных реакциях титана, хрома, железа и бария с актинидными мишенями. Использование нейтронно-избыточных радиоактивных пучков легких и средних масс может помочь заполнить пробел между СТ-ядрами, образованными в реакциях горячего слияния, и «материком». Эти реакции позволили бы приблизиться к «острову стабильности». Такую возможность дают и процессы многонуклонных передач в низкоэнергетических неупругих столкновениях тяжелых ядер актинидов. Также установлено, что образование СТ-элементов в реакциях слияния с ускоренными осколками деления выглядит менее перспективным.

Предложен новый способ получения и изучения неизвестных нейтронно-избыточных тяжелых ядер на «северо-востоке» карты изотопов [22, 23]. Это «белое пятно» не может быть достигнуто ни в реакциях слияния-деления, ни в процессах фрагментации, которые в настоящее время широко используются для синтеза новых ядер. Современные границы верхней части карты ядер очень близки к линии стабильности, в то время как неисследованная область тяжелых нейтронно-избыточных ядер вместе с замкнутой нейтронной оболочкой $N = 126$ («востоку» от линии стабильности) является чрезвычайно важной для ядерных астрофизических исследований и, в частности, для понимания r -процесса в астрофизическом нуклеосинтезе. Предложен новый способ получения этих ядер с помощью низкоэнергетических реакций многонуклонных передач. По оценкам, выход нейтронно-избыточных ядер в таких реакциях оказывается довольно высоким. Например, в околбарьерном столкновении ^{136}Xe с ^{208}Pb могут быть получены несколько десятков новых ядер. Этот вывод может стимулировать новые исследования на ускорителях тяжелых ионов и должен оказать существенное влияние на будущие эксперименты.

Впервые показано, что «распределение по барьерам», полученное из квазиупругого рассеяния тяжелых ионов, дает нам, по сути, информацию о «распределении по порогам реакции», а не о «барьере слияния» [24]. Это не вопрос терминологии, а важный вывод, поскольку эксперименты по измерению квазиупругого рассеяния под обратными углами для получения распределения по барьерам тяжелых ядерных систем (которые могут быть использованы для синтеза сверхтяжелых элементов), как планируется, будут проводиться в нескольких лабораториях.

Метод молекулярных состояний валентных нейтронов и времязависимая квантовая модель малой размерности были применены для описания подбарьерного слияния ^6He с ^{12}C [25]. Расчеты подтверждают предсказания нашей полумпирической модели о значительном увеличении сечения слияния

нейтронно-избыточных слабосвязанных ядер. Это может иметь большое значение для первичного нуклеосинтеза и нуклеосинтеза в сверхновых.

Вклад каналов развала легких слабосвязанных ядер в оптический потенциал их упругого рассеяния на тяжелых ионах был рассчитан с помощью техники операторного проектирования Фешбаха [26]. Метод, предложенный ранее, был расширен, чтобы избежать упрощений, использованных в предыдущих исследованиях. Связанные состояния и состояния непрерывного спектра снаряда описаны в рамках микроскопической кластерной модели и использованы для построения проекционных операторов Фешбаха. Получен обобщенный оптический потенциал, явно учитывающий связь с каналами развала снаряда. Применимость этой модели продемонстрирована для упругого рассеяния ядер ^2H и ^6Li . Этот подход также применен к упругому рассеянию ^6He при промежуточных энергиях с использованием реалистичных многотельных волновых функций ^6He . Установлено, что упрощенная двухкластерная модель развала переоценивает вклад в оптический потенциал и, следовательно, занижает сечение упругого рассеяния на большие углы.

Стохастический подход к динамике деления, основанный на трехмерных уравнениях Ланжевена, применен для расчета массово-энергетических и угловых распределений осколков деления [27]. Изучены зависимости параметров массово-энергетического распределения от углового момента и зависимость анизотропии углового распределения фрагментов деления от энергии возбуждения. Температурно-зависимая модель «жидкой капли», учитывающая конечный радиус действия ядерных сил, применена согласованным образом для расчета функционала свободной энергии Гельмгольца и параметра плотности уровней. Модифицированный одотельный механизм ядерной вязкости был использован для определения диссипативных сил в уравнениях Ланжевена. Было также учтено испарение легких предделительных частиц. Анализ анизотропии углового распределения осколков деления, выполненный с использованием модели переходных состояний в седловой точке и модели переходных состояний в точке разрыва, свидетельствует о необходимости учета динамических аспектов формирования углового распределения осколков деления.

Существенно расширена и усовершенствована база знаний по ядерной физике низких энергий «Nuclear Reactions Video», расположенная на веб-сайте <http://nrv.jinr.ru/nrv> [28]: 1) вычислительные коды для расчета вероятности выживания и ширин распада (по каналам испарения нейтронов, протонов, α -частиц, γ -квантов, а также деления) возбужденных ядер были включены в базу знаний; для этой модели разработаны веб-диалог и Java-апплеты для отображения и сохранения полученных результатов; 2) уже существующая в разделе «Ядерные модели» опти-

ческая модель упругого рассеяния была дополнена возможностью расчета сечения упругого рассеяния с использованием фолдинг-взаимодействия DDM3Y; 3) базы данных по реакциям слияния и испарительным остаткам дополнены несколькими сотнями экспериментальных сечений. Все ресурсы базы знаний доступны в режиме он-лайн через стандартные веб-браузеры с использованием Java-апплетов и технологии CGI.

Влияние оболочечной поправки к энергии деформации на процесс слияния исследовано на основе флуктуационно-диссипативной динамики [29]. В области сверхтяжелых ядер оболочечная поправка играет чрезвычайно важную роль и повышает вероятность слияния, когда одно из сталкивающихся ядер имеет ярко выраженную оболочечную структуру. Анализируя траектории в трехмерном координатном пространстве с помощью уравнений Ланжевена, мы раскрываем механизм усиления слияния, обусловленный существованием «долины холодного слияния» и временным потенциальным карманом, появляющимся в процессе образования составного ядра.

Ионно-имплантационные нанотехнологии и радиационное материаловедение

В 2008 г. изучались электрические и оптические свойства нанокристаллов кремния (ncSi) в слоях SiO_2 (избыточная концентрация кремния варьировалась в пределах от 5 до 92%), облученных высокоэнергетическими ионами Bi и Kr в режиме неперекрывающихся треков. Радиационно-стимулированные изменения состоят в сдвиге основного пика фотолюминесценции нанокристаллов и усилении интенсивности люминесценции нанокристаллов в коротковолновой части спектра. Эти эффекты сопровождаются коллективной перезарядкой нанокристаллов и изменением механизмов проводимости через слой ncSi– SiO_2 .

Были проведены сравнительные исследования радиационной повреждаемости слоев GaN и ZnO с различной морфологией, выращенных методом MOCVD и электроосаждением из водных растворов, после облучения ионами Xe^{+23} с энергией 130 МэВ, до $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Анализ люминесценции и резонансного комбинационного рассеяния света показывает, что наноструктурированные слои обладают значительно большей радиационной стойкостью по сравнению с объемным материалом.

Методом лазерной сканирующей конфокальной микроскопии исследованы профили остаточных механических напряжений в кристаллах $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$, облученных ионами Kr , Xe и Bi с энергиями $1 \div 3$ МэВ/а.е.м. Установлено, что поле напряжений состоит из сжимающих напряжений, максимальный уровень которых сравним с пределом

прочности кристаллов рубина. Проведен анализ экспериментальных данных в рамках модели, рассматривающей атомы Cr^{3+} как индивидуальные пьезосенсоры.

Изучено влияние облучения двухкомпонентным пучком ионов ($\text{He} + \text{H/D}$) на развитие blisterной структуры кремния. Установлено, что при формировании блистеров двухкомпонентное облучение является более эффективным по сравнению с однокомпонентным облучением (He , D , H). Это связано с синергетическим действием радиационных дефектов от облучения ионами He . Определены режимы формирования двухслойных (Cu/Ni) нанопроволочек в одном составе электролита в условиях действия медного или никелевого анода.

Основные результаты опубликованы в работах [30–34].

Формирование нанопористых структур. Трековые мембраны и модификация полимеров

Завершен цикл работ по созданию мембран повышенной производительности и повышенной химической стойкости в рамках договора между Институтом кристаллографии им. А. В. Шубникова и Объединенным институтом ядерных исследований по теме «Разработка научных основ технологии получения трековых мембран из полиэтилентерефталата и полиэтиленафталята». Проведены работы по совершенствованию установок облучения и травления для получения трековых мембран, финансируемые из средств Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.».

Разработаны новые методики получения асимметричных нанопор, обладающих эффектом выпрямления электрического тока в растворах электролитов. Исследованы электрохимические свойства асимметричных нанопористых мембран, и показана взаимосвязь между геометрическими характеристиками поры и вольт-амперными характеристиками. Совместно с Университетом Валенсии (Испания) проведены работы по теоретической интерпретации эффекта выпрямления электрического тока в заполненных электролитом асимметричных нанопорах в зависимости от концентрации электролита, размера пор и степени геометрической асимметрии. Полученные результаты опубликованы в журнале «*Nanotechnology*».

Совместно с Институтом акустики (Мадрид, Испания) продолжены эксперименты по исследованию прохождения ультразвуковых волн различной частоты через трековые мембраны как модельные среды. Установлено, что измерение прохождения ультразвука через микропоры может быть использовано не только для оценки среднего эффективного диаметра пор, но и для оценки формы пор.

Совместно с Физическим институтом им. П. Н. Лебедева РАН и Королевской обсерваторией (Бельгия) продолжены работы по развитию методики изготовления и исследованию характеристик дифракционных фильтров для электромагнитного излучения рентгеновского диапазона.

Исследованы структура и электротранспортные свойства полиэтилентерефталатных и поликарбонатных трековых мембран, модифицированных в плазме тиофена и пиррола. Изучено влияние степени окисления иодом и УФ-излучением образованного в плазме слоя полимера на характеристики мембран. Установлено, что осаждение слоя полимера на поверхности трековой мембраны с помощью полимеризации паров тиофена или пиррола в плазме приводит к образованию композитных мембран, обладающих асимметрией проводимости (выпрямляющим эффектом) в растворах хлористого калия. Это обусловлено наличием в модифицированной мембране двух слоев с антиполярной проводимостью. Показано, что допирование образованного в плазме слоя полимера иодом или воздействие УФ-излучения, вызывая изменение плотности положительного заряда на его макромолекулах, приводит к изменению степени выпрямляющего эффекта.

Разработана методика темплетного синтеза полимерных наноструктурных материалов (нанопроволок, нанотрубок, наномембран с селективным слоем) на основе сополимеров из стирола, бутилметакрилата и 4-аминостирола. Подобные полимерные композиции могут быть использованы как матрица в нелинейной оптике при создании электронных и оптических наноустройств. В качестве шаблона были использованы трековые мембраны из полиэтилентерефталата с эффективным диаметром пор менее 1,0 мкм. Изучены закономерности образования данных материалов, 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.

Создание наноразмерных кластерных структур с помощью ионной имплантации

В рамках нелинейной модели термического пика выполнены расчеты температурных эффектов в пиролитическом графите при облучении тяжелыми ионами, на основании которых объяснены процессы образования (ионы ^{209}Bi с энергией 710 МэВ) или отсутствия (ионы ^{86}Kr с энергией 305 МэВ) выступов (hillocks) в выполненных ранее экспериментальных исследованиях.

Для объяснения экспериментальных результатов, полученных при исследовании методом поперечного слоя монокристалла GaAs, облученного ионами ^{84}Kr (394 МэВ), предложена модель захвата ионов ^{84}Kr , а также высокоэнергетических первично-выбитых атомов Ga и As в режим аксиального каналирования.

Проводятся исследования образцов SiC, Al_2O_3 и слабомагнитных аморфных сплавов, облученных электронами.

Радиоэкологические исследования. Ультрачистые радиоизотопы для ядерной медицины и биомедицины

Получение изотопов

1. Продолжались работы по получению ультрачистых препаратов 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 , ^{225}Ac , ^{237}U , ^{236}Pu и др.
2. Разработаны новые методы разделения и концентрирования радиоизотопов (селективные ядерные реакции, сбор ядер отдачи, радиохимическое выделение).
3. Разработаны новые методы разделения ^{99}Mo и ^{100}Mo , ^{237}U и ^{238}U с фактором обогащения 10^4 – 10^5 .
4. Получено 50 кБк ^{236}Pu для проведения радиоэкологических и биомедицинских исследований.
5. Исследовалась реакция $^{118}\text{Sn}(\gamma, n)$ с целью получения ^{117m}Sn для биомедицинских исследований.

Радиоаналитические исследования. Проведены работы по РФА и гамма-, нейтронно-активационному анализу почв, мхов и экологических образцов из Болгарии, Румынии и России, выполнен анализ образцов для лаборатории (ЛЯР).

Состояние радиоактивных элементов в водных средах

1. Исследовано распределение U(VI), Ce(III) и Nd(III) в системе почва–раствор (Болгария).
2. Исследовано распределение ^{237}U в системе гуминовые кислоты – раствор (Великобритания, Манчестерский университет).

Основные результаты опубликованы в работах [35–44].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Proc. of the Intern. Symp. on Physics of Unstable Nuclei «ISPUN'07», Hoi An, Vietnam, July 3–7, 2007 / Ed. by Dao Tien Khoa et al. Singapore, 2008. P. 353–361.
2. *Stefanini A. M. et al.* // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 044607-1–044607-5.

3. *Hauschild K. et al.* // Ibid. V. 77. P. 047305.
4. *Hauschild K. et al.* // Ibid. V. 78. P. 021302(R).
5. *Yeremin A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2008. V. 266. P. 4137–4142.
6. *Козулин Э. М. и др.* // ПТЭ. 2008. № 1. С. 51–66.
7. *Княжева Г. Н. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т. 5, № 1(143). С. 40–52.
8. *Prokhorova E. V. et al.* // Nucl. Phys. A. 2008. V. 802. P. 45–66.
9. *Itkis M. G., Knyazheva G. N., Kozulin E. M.* // Proc. of the First Workshop on State of the Art in Nuclear Cluster Physics «SOTANCP2008», Strasbourg, France, May 13–16, 2008; Intern. J. Mod. Phys. E. 2008. V. 17, No. 10. P. 2208.
10. *Kamanin D. V. et al.* // Ibid. P. 2250–2254.
11. *Pyatkov Yu.* // Ibid. P. 2226–2230.
12. *Golovkov M. S. et al.* The ^8He and ^{10}He Spectra Studied in the (t, p) Reaction // Phys. Lett. B. (submitted); Archiv PLB 2008arXiv0804.0310G.
13. *Fomichev A. S. et al.* Properties of Very n -Rich He Isotopes // Eur. Phys. J. A. (submitted).
14. *Chudoba V. et al.* Quest for the ^{10}He Nucleus // Proc. of the Intern. Conf. «ASI-Prague-2007»; Eur. Phys. J. A. Spec. Topics. 2008 (in print).
15. *Grigorenko L. V. et al.* Soft Dipole Mode in ^8He // Part. Nucl. Lett. (in press).
16. *Krupko S. A. et al.* Complete and Incomplete Fusion of ^6He and ^6Li Projectiles with Medium Mass Targets at Energy ~ 10 AMeV // Book of Abstr. «Fusion'08», Chicago, USA, Sept. 21–26, 2008. P. 50. Will be published in «World Scientific».
17. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* Complete and Incomplete Fusion of ^6Li Ions with Bi and Pt // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. (submitted).
18. *Lukyanov S. M. et al.* Study of the $2n$ -Evaporation Channel in the $^4,6\text{He} + ^{206,208}\text{Pb}$ reactions // Phys. Lett. B. (submitted).
19. *Скобелев Н. К. и др.* Функции возбуждения реакций полного и неполного слияния ионов ^6Li с ядрами Pt // Письма в ЭЧАЯ (направлено).
20. *Penionzhkevich Yu. E.* Physics with Beams of Radioactive Nuclei // Phys. At. Nucl. 2008. V. 71. P. 1127; Yad. Fiz. 2008. V. 71. P. 1155.
21. *Zagrebaev V., Greiner W.* // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 034610.
22. *Zagrebaev V., Greiner W.* // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. P. 122701.
23. *Zagrebaev V., Greiner W.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2008. V. 35 P. 125103.
24. *Zagrebaev V. I.* // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 047602.
25. *Zagrebaev V. I., Samarin V. V.* // Izv. RAN (Bull. of the Rus. Acad. of Sci.: Phys.). 2008. V. 72, No. 3. P. 274–277.
26. *Denikin A. S. et al.* // J. Phys. G (in press); nucl-th/0801.4550.
27. *Ryabov E. G. et al.* // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 044614.
28. *Zagrebaev V. I. et al.* <http://nrv.jinr.ru/nrv>.
29. *Aritomo Y., Hanappe F.* // Nucl. Phys. A. 2008. V. 805. P. 534–536
30. *Antonova I. V. et al.* // Solid State Phenomena. 2008. V. 131–133. P. 541–546.

31. *Burlacu A. et al. // Nanotechnology. 2008. V. 19. P. 215714–215721.*
32. *Gordo P. M. et al. // Appl. Surface Sci. 2008. V. 255, Iss. 1. P. 254–256.*
33. *Nazarov M. M. et al. // Rad. Measurements. 2008. V. 43, Suppl. 1. P. S591–S593.*
34. *Гикал Б. Н. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т. 5, № 1(143). С. 59–85.*
35. *Молоканова Л. Г. и др. // Журн. прикладной химии. 2008. Т. 81, № 3. С. 480–485.*
36. *Балькин В. И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72, № 2. С. 224–228.*
37. *Ramirez P. et al. // Nanotechnology. 2008. V. 19. P. 315707.*
38. *Gillespie D. et al. // Biophys. J. 2008. V. 95. P. 609–619.*
39. *Apel P. Yu. et al. // Rad. Measurements. 2008. V. 43, Suppl. 1. P. 552–559.*
40. *Schulz A. et al. //Ibid. P. 612–616.*
41. *Кравец Л. И. и др. // Нанотехника. 2008. № 1. С. 48–51.*
42. *Кравец Л. И. и др. // Там же. С. 43–48.*
43. *Дидык А. Ю. и др. // Перспективные материалы. 2008. № 4. С. 45–51.*
44. *Amirhanov I. V. et al. // J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2008. V. 2, No. 3. P. 331–339.*