

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ИМ. Г. Н. ФЛЕРОВА

В 2005 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, изучение взаимодействий тяжелых ионов с конденсированными средами, а также прикладные исследования. Программа исследований сформулирована в трех лабораторных темах и одном общеинститутском проекте:

- синтез новых ядер, изучение свойств ядер и механизмов реакций с тяжелыми ионами (11 проектов);
- радиационные эффекты и модификация материалов, радиоаналитические и радиоизотопные исследования (пять проектов);
- развитие циклотронного комплекса ЛЯР для получения интенсивных пучков ускоренных ионов стабильных и радиоактивных изотопов (два проекта);
- создание комплекса ускорителей — циклотронов У-400+У-400М и микротрона МТ-25 — для получения пучков радиоактивных ядер (общеинститутский проект DRIBs).

Время работы основных ускорителей ЛЯР в 2005 г. составило около 9000 ч, что соответствовало плану и обеспечило проведение экспериментов в области физики низких и промежуточных энергий. Распределение «пучкового» времени между экспериментальными установками ЛЯР в 2005 г. представлено в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Эксперименты на У-400	«Пучковое» время, ч
ГНС	3100
ВАСИЛИСА	800
CORSET	800
Химические эксперименты	450
Прикладные исследования	600
Усовершенствование ускорителя	150
Итого:	5900

Таблица 2

Эксперименты на У-400М	«Пучковое» время, ч
АКУЛИНА	1850
МУЛЬТИ	750
FOBOS	100
Усовершенствование ускорителя	200
Итого:	2900

Синтез новых элементов

В экспериментах, выполненных в 2005 г., были измерены сечения образования, а также изучены свойства радиоактивного распада изотопов $^{282-285}_{112}$, $^{286-289}_{114}$ и $^{290-293}_{116}$, синтезированных в реакциях полного слияния с ускоренными ионами $^{48}_{20}\text{Ca}$. Массовые числа изотопов определялись по функциям возбуждения $3n$ - и $4n$ -каналов испарения нейтронов в реакциях $^{238}_{92}\text{U}$, $^{242}_{94}\text{Pu}$, $^{248}_{98}\text{Cm} + ^{48}_{20}\text{Ca}$ и $3n$ - $5n$ -каналов в реакции $^{244}_{94}\text{Pu} + ^{48}_{20}\text{Ca}$.

На основании экспериментальных данных можно прийти к заключению, что сечения образования продуктов испарения в реакциях полного слияния с $^{48}_{20}\text{Ca}$ определяются выживаемостью ядер и зависят, в основном, от их барьеров деления. Ожидаемое повышение барьеров деления при приближении к нейтронной оболочке с $N = 184$ приводит не только к увеличению стабильности ядер по отношению к различным видам распада, но также обуславливает увеличение сечений их образования.

В 2005 г. были продолжены исследования образования компаунд-ядер с $Z = 118$ и 116 с мишенями $^{249}_{98}\text{Cf}$ и $^{245}_{98}\text{Cm}$. Облучения этих мишеней выполнялись в феврале–марте и мае–июне соответственно.

Были изучены свойства распада изотопов $^{290,291}_{116}$ и $^{294}_{118}$, а также зависимости сечения их образования от энергии возбуждения составных ядер $^{293}_{116}$ и $^{297}_{118}$. В реакции $^{249}_{98}\text{Cf}(^{48}_{20}\text{Ca}, 3n)^{294}_{118}$ в дополнение к цепочке распада, наблюдаемой в

2002 г., были зарегистрированы еще два случая распада изотопа $^{294}\text{118}$ при энергии возбуждения $E^* = 32,1 - 36,6$ МэВ, которая несколько выше, чем в предыдущем эксперименте.

Свойства распада дочерних ядер четно-четного изотопа $^{294}\text{118}$ ($E_\alpha = (11,65 \pm 0,06)$ МэВ, $T_\alpha = 0,89^{+1,07}_{-0,31}$ мс) вполне согласуются со свойствами изотопов $^{290}\text{116} \xrightarrow{\alpha} ^{286}\text{114} \xrightarrow{\alpha/\text{SF}} ^{282}\text{112} \xrightarrow{\text{SF}}$, наблюдавшихся ранее в перекрестных реакциях $^{245}\text{Cm}(^{48}\text{Ca}, 3n)$, $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 4n)$ и $^{238}\text{U}(^{48}\text{Ca}, 4n)$.

В настоящих экспериментах в реакции $^{245}\text{Cm}(^{48}\text{Ca}, 3n)$ при повышенных энергиях воз-

буждения $E^* = 35,9 - 39,9$ и $40,7 - 44,8$ МэВ были синтезированы девять ядер изотопа $^{290}\text{116}$ ($E_\alpha = (10,84 \pm 0,08)$ МэВ, $T_\alpha = 7,1^{+3,3}_{-1,7}$ мс). Кроме того, при энергии возбуждения составного ядра $E^* = 35,9 - 39,9$ МэВ в канале реакции $^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ с испарением двух нейтронов была зарегистрирована новая цепочка распада изотопа $^{291}\text{116}$ ($E_\alpha = (10,74 \pm 0,07)$ МэВ, $T_\alpha = 18^{+22}_{-6}$ мс). Эта цепочка состояла из шести последовательных α -распадов изотопов $^{291}\text{116}$, $^{287}\text{114}$, $^{283}\text{112}$, ^{279}Ds , ^{275}Hs и ^{271}Sg , которая заканчивалась спонтанным делением ^{267}Rf . Максимальные сечения каналов испарения x нейтронов в реакции $^{245}\text{Cm}(^{48}\text{Ca}, xn)^{293-x}\text{116}$ составляли: $\sigma_{2n} = 0,9^{+2,0}_{-0,7}$ пб, $\sigma_{3n} = 3,7^{+3,6}_{-1,8}$ пб и $\sigma_{4n} \leq 1$ пб; а для реакции $^{249}\text{Cf}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{294}\text{118}$: $\sigma_{3n} = 0,5^{+1,6}_{-0,3}$ пб. Измеренные сечения реакций слияния-испарения ^{245}Cm , $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$, приводящие к образованию изотопов элементов 116 и 118, показаны вместе с расчетными значениями сечений xn -каналов на рис. 1.

Свойства распада изотопов $^{294}\text{118}$, $^{290,291}\text{116}$, синтезированных в реакциях ^{249}Cf , $^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ и их дочерних продуктов, хорошо согласуются с оценками свойств этих ядер, выполненными на основании макро-микроскопических расчетов, а также расчетов с использованием методов Сkirма-Хартри-Фока-Боголюбова и релятивистского среднего поля. Удовлетворительное согласие теории с экспериментом наблюдается также и для спонтанно делящихся изотопов, прерывающих цепочки распадов сверхтяжелых ядер.

Химия трансактинидов и сепаратор MASHA

В 2005 г. была проведена подготовка к двум экспериментам.

- **Синтез и изучение химических свойств элементов 112 и 114.** Были разработаны мишенные узлы с вращающейся и неподвижной мишенями для проведения экспериментов по синтезу элементов 112 и 114 в реакциях $^{238}\text{U}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)$ и $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)$.

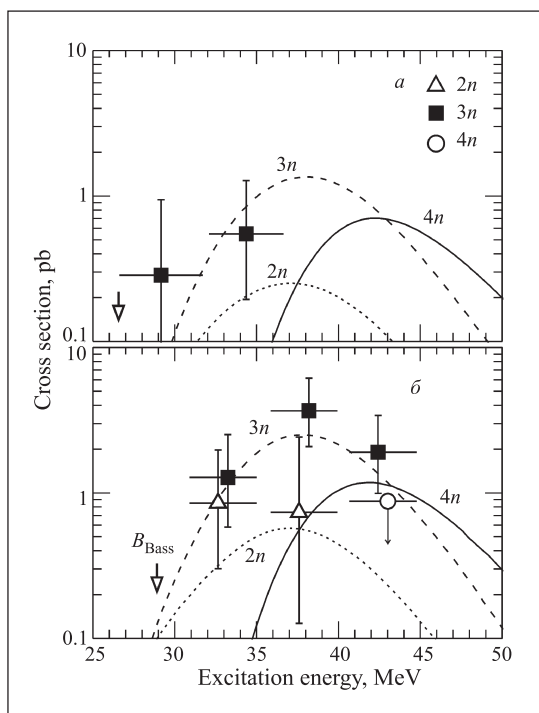


Рис. 1. Функции возбуждения 2n- (Δ), 3n- (\blacksquare) и 4n-каналов (\circ) испарения нейтронов реакций полного слияния $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$ (а), $^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ (б). Линии показывают результаты расчетов

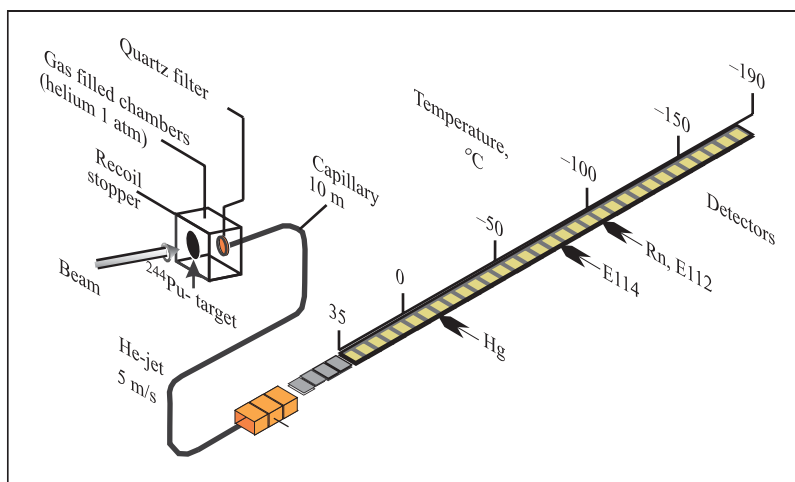


Рис. 2. Криодетекторная система для изучения химических свойств элементов 112 и 114

Планируется синтезировать изотопы $^{284}112$ (SF; 0,1 с), $^{285}112$ (α ; 34 с), $^{288}114$ (α ; 0,6 с), $^{289}114$ (α ; 2,7 с) и в соответствии с предсказанной повышенной летучестью регистрировать распад ядер элемента 112 в криодетекторе (рис. 2). Подготовлена и испытана соответствующая система очистки и осушения газопереносчика. Предполагается использовать смесь газов He (70 %) и Ar (30 %) при остаточном давлении водяных паров не более 10^{-7} %. Совместный с PSI (Швейцария) эксперимент будет проведен в апреле 2006 г..

• **Синтез элемента 115.** Два предыдущих эксперимента по изучению реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ (август 2003 и июнь 2004 г.) предоставили независимые данные, доказывающие существование элемента с $Z = 115$. Зарегистрированные цепочки распадов состояли из пяти последовательных α -распадов и завершались спонтанным делением нуклида, характеризующегося высоким энерговыделением и временем жизни около суток. Дополнительные данные, позволившие определить атомные номера нуклидов, входящих в цепочку распадов изотопа $^{288}115$, получены в химическом эксперименте (июнь 2004 г.). В этом эксперименте было установлено, что долгоживущая активность, приписываемая спонтанному делению ^{268}Db (15 событий), обусловлена распадом изотопа элемента, относящегося к пятой группе Периодической таблицы Д. И. Менделеева. Масса этого нуклида будет определена при помощи масс-сепаратора

MASHA. С этой целью исходные образцы для помещения в ЭЦР-источник сепаратора должны переводиться в летучие формы.

В модельных экспериментах был протестирован метод селективного и количественного выделения элементов пятой группы Nb и Ta из сборника выбиваемых продуктов ядерных реакций при помощи катионообменной смолы. Процедура разделения основана на разности в устойчивости комплексов MF_6^- . Разработанная методика позволяет также выделять Zr- и Hf-комплексы, что важно для сравнительного изучения химических свойств Db и Rf.

Деление ядер

Эксперименты по изучению реакций слияния-деления, приводящих к образованию составного ядра $^{294}116$ в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{246}\text{Cm}$ и $^{50}\text{Ti} + ^{244}\text{Pu}$, были выполнены в 2005 г. на времяпролетном спектрометре CORSET. Были изучены массово-энергетические распределения осколков деления и функции возбуждения указанных реакций.

Наиболее тяжелый элемент, который может быть синтезирован в реакциях с ^{48}Ca , — это элемент с $Z = 118$ (при использовании мишени из калифорния). Для синтеза более тяжелых элементов необходимо использовать бомбардирующие частицы с более высоким Z . В предыдущих экспериментах с ионами ^{48}Ca было показано, что в области сверхтяжелых

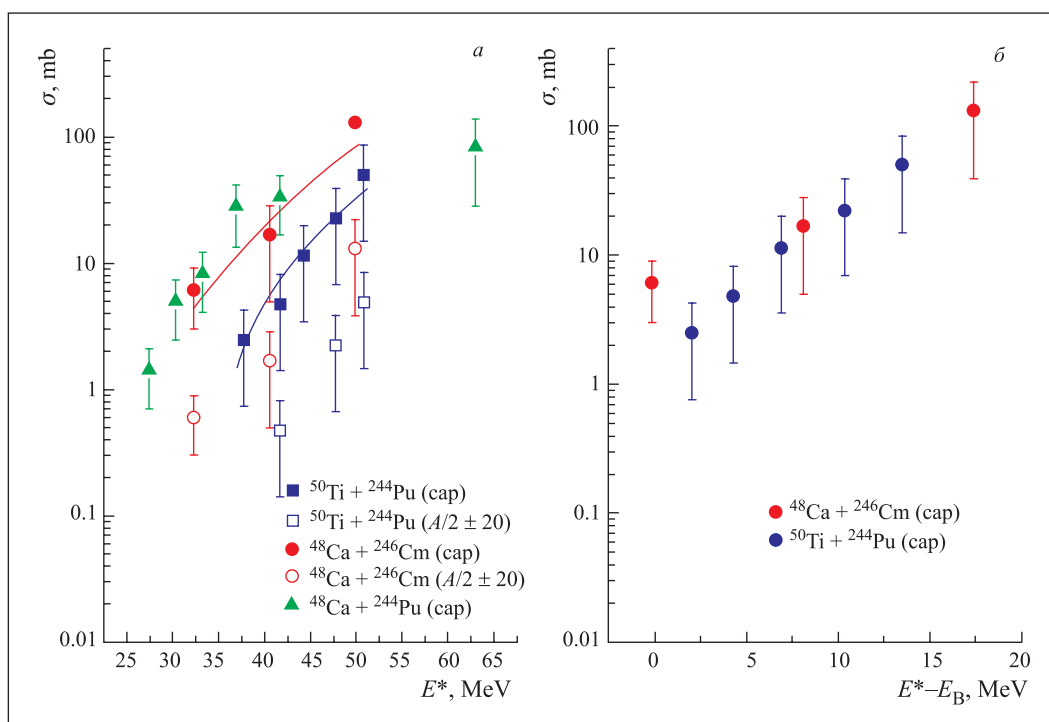


Рис. 3. Сечения захвата (σ_{cap}) и слияния-деления ($\sigma_{A/2 \pm 20}$) в зависимости от энергии возбуждения составного ядра E^* (а) и σ_{cap} в зависимости от энергии возбуждения над барьером $E^* - E_B^*$ для реакций с ионами ^{48}Ca и ^{50}Ti (б)

элементов с $Z = 112-116$ вклад компоненты квазиделения (QF) в полное сечение реакции $\sigma_{QF}/\sigma_{сар}$ примерно постоянен и превышает 90%. Было также установлено, что соотношение между вероятностями мгновенного деления (FF) и квазиделения существенно зависит от масс-асимметрии, деформаций, ориентаций и оболочечных эффектов во входном канале реакции.

Для случаев образования составного ядра $^{294}116$ в реакциях «теплого» слияния с ионами ^{48}Ca и ^{50}Ti при энергиях вблизи кулоновского барьера формы массовых распределений осколков деления оказываются схожими и отношения сечений $\sigma_{FF}/\sigma_{сар}$ примерно одинаковы для обеих реакций (рис. 3).

Предварительные результаты экспериментов показали, что при переходе от ^{48}Ca к ^{50}Ti сечение захвата, а следовательно, и сечение слияния-деления, уменьшается примерно втрое при $E^* = 45-50$ МэВ. В то же время зависимости сечений захвата $\sigma_{сар}$ от энергий возбуждения над барьером ($E^* - E_B^*$) весьма близки для обеих реакций. Это наблюдение обосновывает перспективность использования ^{50}Ti для синтеза сверхтяжелых элементов. Для более детального изучения конкуренции процессов слияния-деления и квазиделения необходимо проведение экспериментов с большей статистикой.

Проблемы динамики деления в настоящее время далеки от разрешения. Ожидается, что мульти-модальный анализ позволит понять природу происхождения различных мод деления и конкуренции между ними. В подобных исследованиях свойства суперасимметричной моды (для $A_F < 80$ а. е. м.) представляют особый интерес. Новые экспериментальные данные помогут прояснить особенности образования экстремально нейтронообогащенного дважды «магического» ядра ^{78}Ni в процессе деления.

Сепаратор ВАСИЛИСА

Серия экспериментов с использованием детектирующей системы GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the Electromagnetic Analyzer) была выполнена в сентябре–октябре 2005 г.

В этих экспериментах изотопы $^{253,255}\text{No}$ и ^{255}Lr синтезировались при взаимодействии высокоинтенсивных пучков ионов ^{48}Ca с вращающимися мишенями из $^{207,208}\text{Pb}$ и ^{209}Bi .

В случае распада изотопов $^{253,255}\text{No}$ γ -излучение и электроны конверсии регистрировались в мгновенных совпадениях с α -частицами. Благодаря этому впервые удалось надежно определить спины и четности уровней ядра ^{249}Fm , заселяемых при α -распаде ^{253}No . У ядра ^{255}No была наблюдаема задержанная эмиссия γ -квантов и электронов после α -распада (рис. 4).

Первые сообщения о возможном наблюдении изомерного состояния у ^{251}Fm появились в 1971 г. Однако в дальнейшем эти данные не были подтверждены. Из наших данных следует, что время жизни изомерного состояния составляет 26,8 мкс. На основании данных о задержанных γ - β -совпадениях можно сделать вывод о том, что этот изомерный уровень девозбуждается при высококонвертированном $M2$ -переходе с испусканием γ -квантов с энергией 198 кэВ, что удовлетворительно объясняет наблюдаемое время жизни изомерного состояния.

Изомерное состояние с временем жизни 43,5 мкс и распадающееся также при конвертированном $M2$ -переходе было обнаружено у ядра ^{253}No .

Сравнение экспериментальных данных с самосогласованными расчетами выявило систематические расхождения в положениях низколежащих одночастичных уровней у изотон с $N = 151$. В настоящее время обработка экспериментальных данных продолжается.

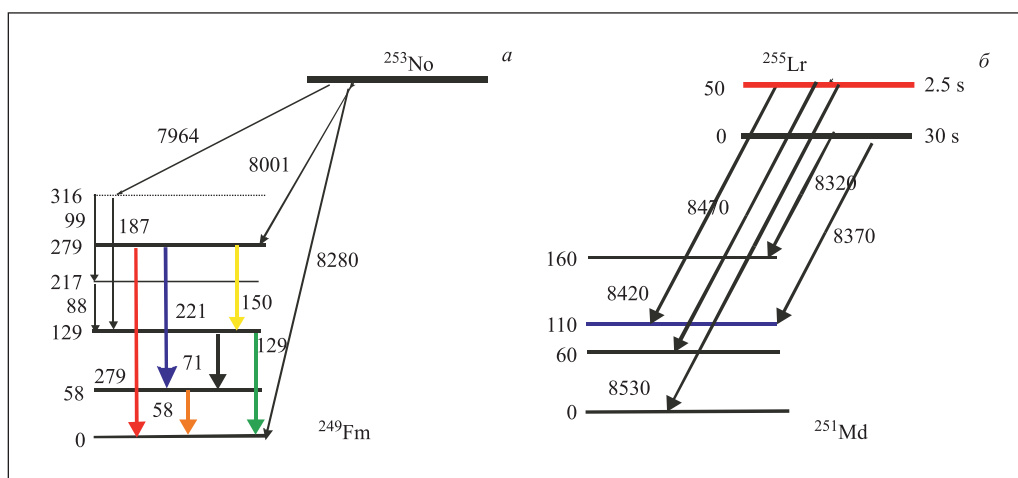


Рис. 4. Схемы распада ^{253}No (а) и ^{255}Lr (б), синтезированных в реакциях ионов ^{48}Ca с мишенями из $^{207,208}\text{Pb}$ и ^{209}Bi

Канал высокого разрешения АКУЛИНА

Выполненный в 2005 г. полный анализ данных из двух серий экспериментов по получению ${}^5\text{H}$ -системы в реакции $t + t$ однозначно подтвердил обнаружение резонансных состояний в этом нуклиде. Параметры резонанса, определенные для ${}^5\text{H}$: энергия $E_{\text{res}} \approx 1,8$ МэВ и ширина $\Gamma_{\text{res}} \approx 1,3$ МэВ — позволяют предположить, что в соответствующем образом поставленном эксперименте может быть наблюден более низко расположенное и узкое основное состояние ${}^7\text{H}$.

В случае обнаружения ${}^7\text{H}$ это ядро должно проявить необычное свойство — распад на пять тел — $t + 4n$ — единственная мода распада, разрешенная законом сохранения энергии. Поэтому обнаружение ${}^7\text{H}$ не только предоставит возможность наблюдать ядерную систему с необычно высоким числом нейтронов, но также позволит изучить динамику необычной моды распада на пять тел.

В декабре 2005 г. был выполнен эксперимент, в котором для заселения резонансного основного состояния гипотетического ${}^7\text{H}$ использовалась реакция

передачи одного протона в реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$. Пучок ионов ${}^8\text{He}$ с энергией 23 МэВ/нуклон, получаемый на сепараторе АКУЛИНА, бомбардировал криогенную мишеньную ячейку, заполненную газообразным дейтерием. Ядра гелия-3, движущиеся в переднем направлении, детектировались в совпадении с тритонами, испускаемыми при распаде резонанса в ${}^7\text{H}$ (см. рис. 5). Геометрия детектирующей системы была оптимизирована для изучения реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$ с испусканием в диапазоне углов 4–24° в системе центра масс. В этом эксперименте был достигнут предел чувствительности 5 мкб/ср для случая наблюдения одного события образования и распада ${}^7\text{H}$. В настоящее время проводится анализ полученных экспериментальных данных.

Комбинация бомбардирующая частица — мишень, использовавшаяся при изучении ${}^7\text{H}$, оказалась весьма перспективной также и для изучения ядра ${}^9\text{He}$, имеющего исключительное значение для понимания свойств легчайших нейтроноизбыточных ядер. Это ядро может быть получено в реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, p){}^9\text{He}$.

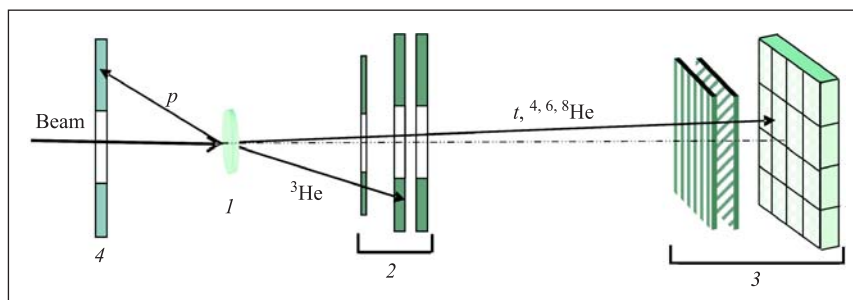


Рис. 5. Схема мишени и детекторной сборки. 1 — дейтериевая мишень; 2 — телескоп кольцевых детекторов для регистрации ядер ${}^3\text{He}$, испускаемых в реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$; 3 — детекторная сборка (пара Si-стриповых детекторов с расположенными за ними кристаллами CsI) для тритонов и ядер гелия; 4 — кольцевой Si-стриповый детектор для регистрации протонов, испускаемых в реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, p){}^9\text{He}$

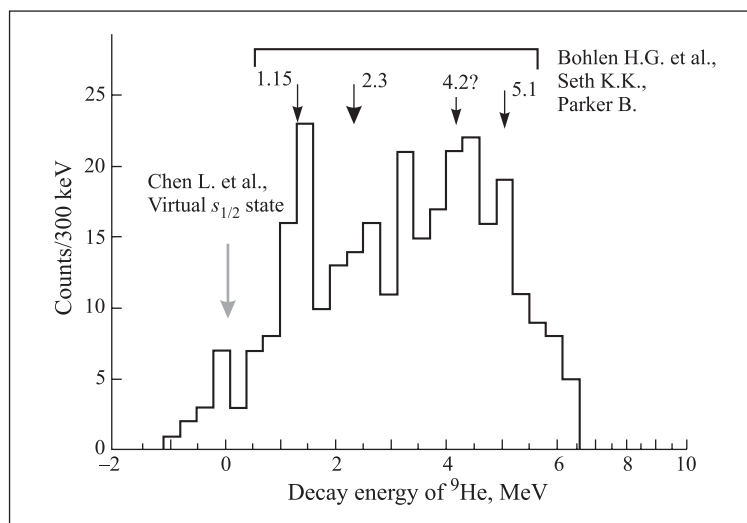


Рис. 6. Предварительные результаты для спектра недостающей массы для ${}^9\text{He}$, полученные в реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, p){}^9\text{He}$

В этой реакции могут быть однозначно установлены квантовые числа и определены спектроскопические факторы трех узких однейтронных резонансов, наблюдавшихся в ${}^9\text{He}$. При изучении этого ядра особое внимание должно быть уделено предсказываемому виртуальному состоянию кора ${}^8\text{He}$ и $2s$ -нейтрона. Такие внедренные состояния известны для ядер ${}^{10}\text{Li}$ и ${}^{11}\text{Be}$, имеющих один нейтрон сверх заполненной $p_{3/2}$ -оболочки. Реакция ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, p){}^9\text{He}$ представляется наилучшей для получения ясной информации об этом виртуальном состоянии.

Спектр недостающей массы для ${}^9\text{He}$, полученный после обработки части полученных экспериментальных данных, представлен на рис. 6. В нашем случае энергетическое разрешение 500 кэВ в спектрах недостающей массы является наилучшим по сравнению с данными других экспериментов по изучению ${}^9\text{He}$. Узкое состояние при 1,15 МэВ хорошо видно в спектре. Ширина известного резонанса при энергии 2,3 МэВ составляет 700 кэВ.

Полностью проанализированы данные для реакции ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, 2\alpha)2n$. Эти данные были получены при облучении гелиевой газовой мишени пучком ионов ${}^6\text{He}$ с энергией 25 МэВ/нуклон. Поперечные сечения реакции квазисвободного α , 2α -рассеяния (QFS) в диапазоне углов 60 – 120° анализировались в терминах импульсного приближения плоских волн (PWIA) с использованием волновой функции, полученной теоретическими методами для ${}^6\text{He}$ в трехтелном приближении.

Экзотические моды распада. 4 π -детектор FOBOS

В прошедшем году было продолжено изучение эффекта коллинеарного кластерного распада на три частицы (ССТ), обнаруженного в предыдущих экспериментах на установке FOBOS. Сравнительный анализ массово-массовых распределений осколков спонтанного деления ${}^{252}\text{Cf}(\text{SF})$ позволил подтвер-

дить правильность механизма, предложенного ранее для объяснения этого процесса. Новые данные были получены в экспериментах, выполненных независимо на трех спектрометрах «время пролета» — энергия (TOF-E) в ЛЯР и JYFL (Ювяскюля, Финляндия). Обнаруженная область повышенного выхода продуктов ССТ-процесса показана на рис. 7, а.

Некоторые особенности этой двумерной области обнаруживаются при фильтрации данных по второй производной или методами, используемыми в поиске пиков при обработке γ -спектров. Вершины пиков, найденные таким способом в некоторых сечениях $M_a = \text{const}$, отвечают значениям полных масс $M_{\text{tot}} = \text{const}$, равным 204, 208 и 212 а.м.е. соответственно. Таким образом, широкий максимум, видимый на рис. 7, а и б, состоит из трех перекрывающихся «хребтов», ориентированных вдоль линий $M_{\text{tot}} = \text{const}$. Эти хребты (выделенные пунктирными линиями) проходят через точки пересечения, соответствующие различным комбинациям двух осколков с «магическими» числами нуклонов (отмеченными штрихпунктирными стрелками). Эти выделенные точки могут быть соотнесены со значениями масс «магических» подсистем следующим образом: $204 \rightarrow {}^{70}\text{Ni} + {}^{134}\text{Te}$, $208 \rightarrow {}^{80}\text{Ge} + {}^{128}\text{Sn}$ и для $M_{\text{tot}} = 212 \rightarrow {}^{80}\text{Ge} + {}^{132}\text{Sn}$ или ${}^{78}\text{Ni} + {}^{134}\text{Te}$, или ${}^{68}\text{Ni} + {}^{144}\text{Ba}$. Отмеченные хребты пересекаются также с горизонтальным хребтом (виден как группирующиеся контурные линии на рис. 7, а). Этот эффект может быть связан с изотопами ${}^{68,70}\text{Ni}$, которые также являются «магическими». В нижней части рис. 7, а можно видеть хребет, который связан с дважды «магическими» изотопами ${}^{44-48}\text{Ca}$. Более того, в правом верхнем углу рис. 7, а в виде двух пиков (${}^{72,78}\text{Ni}/{}^{150}\text{Ce}$), содержащих 355 событий, отчетливо проявляется образование «магического» деформированного ядра ${}^{150}\text{Ce}$. Указанные свойства распределений уверенно воспроизводятся во всех трех упомянутых экспериментах.

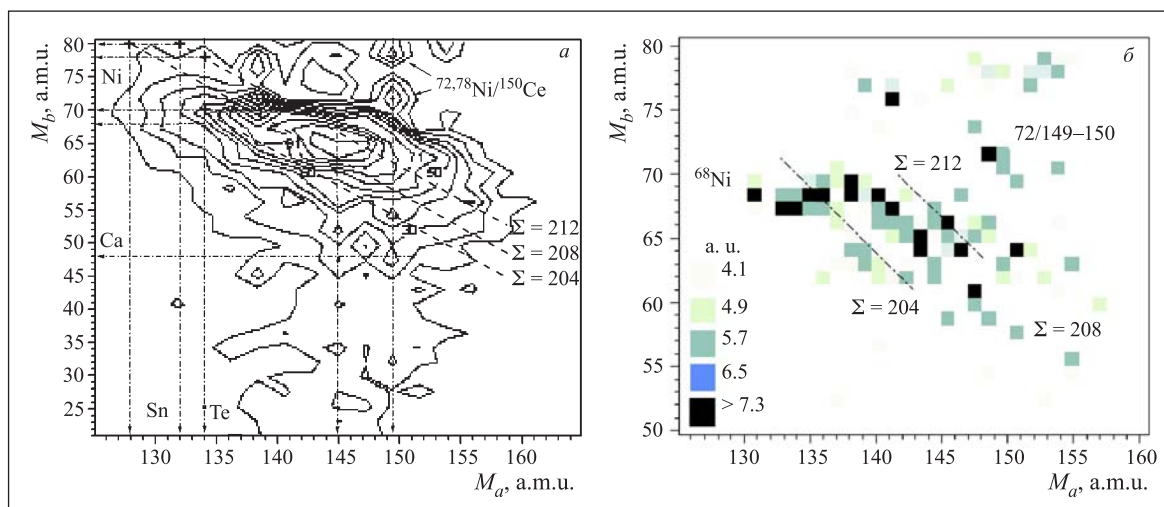


Рис. 7. а) Двумерная контурная карта области повышенного выхода продуктов ССТ при спонтанном делении ${}^{252}\text{Cf}(\text{SF})$. б) То же, что рис. а, после фильтрации по второй производной изображение обнаруживает присутствие двумерных структур

Реакции, вызываемые пучками ионов стабильных и радиоактивных изотопов легких элементов

Были проведены первые эксперименты на комплексе DRIBs с использованием пучка легких радиоактивных ядер ${}^6\text{He}$. Пучок ${}^6\text{He}$ имел энергию $(60,3 \pm 0,4)$ МэВ и интенсивность $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Ядра ${}^6\text{He}$ относятся к классу легких экзотических ядер с нейтронным гало — компактный кор из α -частицы, окруженный двумя нейтронами. Такая структура ядра ${}^6\text{He}$ должна проявлять необычные свойства при его взаимодействии с другими ядрами:

- увеличение полного сечения взаимодействия;
- усиление каналов реакций полного слияния в подбарьерной области энергий;
- повышение сечения реакций передачи нейтронов и др.

В проведенных с помощью прецизионного магнитного спектрометра МСП-144 измерениях импульсных распределений ядер ${}^4\text{He}$, образующихся в результате развала ядер ${}^6\text{He}$, были получены относительно небольшие ширины распределений ($\sigma \sim 28 \text{ МэВ}/c$) по сравнению с обычными ядрами ${}^6\text{Li}$ (рис. 8). Это позволило подтвердить существование протяженного распределения плотности ядерной материи за счет внешних нейтронов в ядре ${}^6\text{He}$ — нейтронного гало.

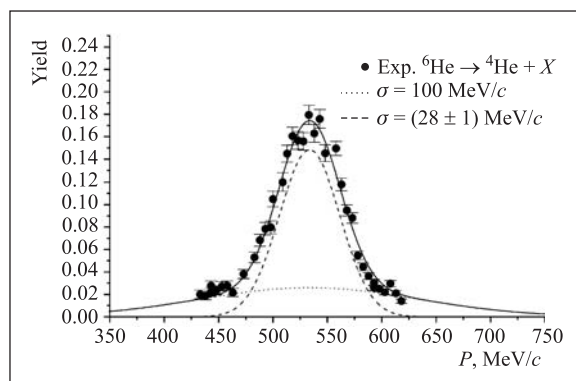


Рис. 8. Импульсное распределение ядер ${}^4\text{He}$, образовавшихся в результате развала ${}^6\text{He}$ на Au-мишени

На пучке ${}^6\text{He}$ были исследованы различные каналы реакции. Измерены функции возбуждения реакций слияния с последующим испарением нейтронов в широком диапазоне энергий вплоть до глубоководбарьерной области. Из результатов следует, что при взаимодействии ионов ${}^6\text{He}$ с ядрами Pb и Au происходит значительное увеличение сечения слияния в подбарьерной области энергий (рис. 9). Такое увеличение объясняется особенностью структуры ${}^6\text{He}$, которая позволяет осуществлять последовательный захват двух нейтронов с гало с последующим слиянием ядра остатка (${}^4\text{He}$) и образованием составного ядра. Также весьма значительно сечение реакций передачи

одного нейтрона от ${}^6\text{He}$ к ядру мишени ($\sigma \sim 1 \text{ б}$). Оно более чем на два порядка выше сечения реакций передачи двух нейтронов (см. рис. 9).

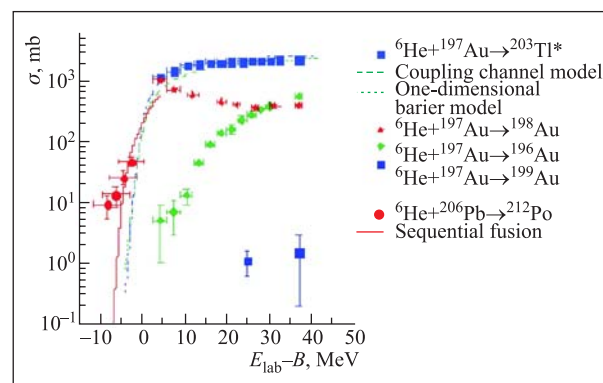


Рис. 9. Функции возбуждения реакций полного слияния и реакций передач. Сплошная линия — результат расчета в рамках модели последовательного слияния

Новые результаты были получены на установке МУЛЬТИ по полным сечениям реакций взаимодействия с ядром ${}^6\text{He}$. Эти данные сравнивались с данными для других легких ядер (${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$). Для ${}^6\text{He}$ в исследуемой области энергий (5–50 МэВ/А) полное сечение реакций существенно выше в сравнении с ядрами ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$. Кроме этого, при энергии 15 МэВ/А в функции возбуждения для ${}^6\text{He}$ наблюдается максимум с сечением $\sigma_n \sim 1,8 \text{ б}$. Все эти данные свидетельствуют о проявлении необычных свойств содержащего гало ядра ${}^6\text{He}$ при взаимодействии с другими ядрами, особенно в области подбарьерных энергий.

Эти результаты были получены с помощью прецизионного магнитного спектрометра МСП-144, имеющего высокое разрешение по импульсу и большой телесный угол. В экспериментах также использовалась широкоапертурная многопроволочная пропорциональная камера, созданная совместно с Ереванским физическим институтом. Камера позволяет детектировать и идентифицировать продукты ядерных реакций с высоким координатным разрешением при большой загрузке (до 10^6 с^{-1}).

Продолжались исследования выходов и свойств нейтроноизбыточных ядер — осколков деления в рамках проекта DRIBs-II. Проведены эксперименты по детектированию задержанной эмиссии двух нейтронов и осколков фотоделения ${}^{238}\text{U}$, получаемых на микротроне МТ-25 ЛЯР ОИЯИ. В эксперименте наблюдалась двухнейтронная активность с отношением к одиночным запаздывающим нейтронам $4,2 \cdot 10^{-4}$.

Теоретическая и компьютерная физика

Предложен новый подход к единому описанию сильносвязанных процессов глубоконеупругого рассеяния, слияния, деления и квазиделения при взаи-

модействиях тяжелых ионов. В этом подходе используются стандартные степени свободы ядерной системы — универсальный драйвинг-потенциал и универсальный набор динамических уравнений движения. Благодаря этому стал возможен полный (непрерывный) анализ эволюции тяжелой ядерной системы во времени, начиная со стадии сближения, с переходом к образованию составного ядра и последующему распаду на два конечных осколка деления. Расчетные массовые, зарядовые, энергетические и угловые распределения продуктов реакций хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными данными. Это позволяет надеяться на получение достаточно точных оценок вероятностей образования сверхтяжелых элементов в околобарьерных реакциях слияния.

Низкоэнергичные взаимодействия наиболее тяжелых ядер ($^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$, $^{232}\text{Th} + ^{250}\text{Cf}$ и $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$) проанализированы теоретически в рамках реалистической динамической модели, основанной на многомерных уравнениях Ланжевена. Найдено, что значительные передачи массы и заряда в процессе «обратного» квазиделения могут приводить к образованию выживающих долгоживущих сверхтяжелых ядер, обогащенных нейтронами. Во многих случаях время жизни композитной системы, состоящей из двух соприкасающихся ядер, оказывалось довольно большим, достаточным для спонтанного образования позитронов в сверхсильных электрических полях — фундаментальном процессе квантовой электродинамики.

Впервые для анализа процесса «последовательного слияния» тяжелых ядер при околобарьерных энергиях, в котором происходит промежуточная передача и коллективизация валентных нейтронов, были численно решены трехтельные трехмерные уравнения Шредингера с зависимостью от времени. Коллективизация нейтронов («размазывание» нейтронных волновых функций по объему обоих взаимодействующих ядер) начинается непосредственно перед приближением к кулоновскому барьеру и влияет на вероятность слияния. Промежуточное движение нейтронов и его влияние на подбарьерное слияние тяжелых ядер было проанализировано в деталях. Предложен ряд новых экспериментов для изучения реакций подбарьерного слияния слабосвязанных ядер.

Для расчетов многомерной адиабатической поверхности потенциальной энергии сильнодеформированных тяжелых ядерных систем, включая конфигурацию двух соприкасающихся ядер, была разработана новая двухцентровая оболочечная модель. Эта модель удовлетворительно описывает барьеры слияния тяжелых ядер и дает корректные значения масс двух отдельных ядер в основном состоянии. Учтена также разница в потенциальных энергиях во входном (слияние) и выходном (деление и квазиделение) каналах.

В 2005 г. web-версия базы знаний по ядерной физике низких энергий «Ядерные реакции — видео», размещаемая на web-сайте <http://nr.v.jinr.ru/nrv>, существенно расширена и усовершенствована. В базу знаний были включены несколько новых вычислительных программ для расчетов ядерной динамики. Эти программы снабжены анимационным интерфейсом для ввода исходных данных и представления результатов. Базы данных о реакциях слияния и выходах продуктов в них были дополнены несколькими сотнями новых экспериментально измеренных величин сечений. Все ресурсы базы знаний доступны on-line через стандартные Web-браузеры с использованием технологии CGI и Java-апплетов.

Взаимодействие ускоренных тяжелых ионов с полимерами

Разработан новый метод производства трековых мембран с профилированными каналами, обладающих повышенной эффективностью и селективностью фильтрации дисперсивных сред различной природы (рис. 10).

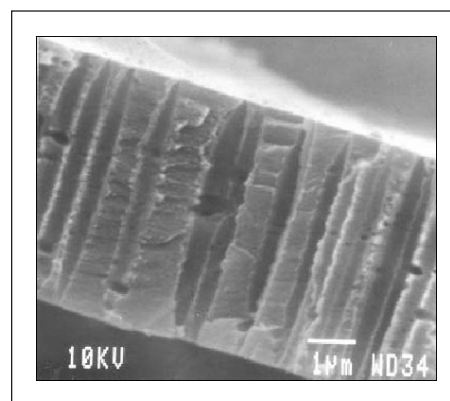


Рис. 10. Сечение ПЭТ-мембраны с порами, сужающимися к обоим концам

Выполнен цикл исследований толстых «впитывающих» мембран и мембран типа «колодец с пористым дном». Фильтры на основе исследованных структур весьма перспективны, например, для фиксации клеток при исследованиях клеточной активности.

Продолжены работы по созданию термочувствительных мембран. Данные исследования направлены на создание «умных» мембран с управляемыми свойствами.

Взаимодействие ускоренных тяжелых ионов с металлами и монокристаллами

Изменение свойств кристаллического кремния изучалось в процессе имплантации ионов В, Р, Ga, In и Bi с энергиями от 100 до 300 кэВ. При потоках

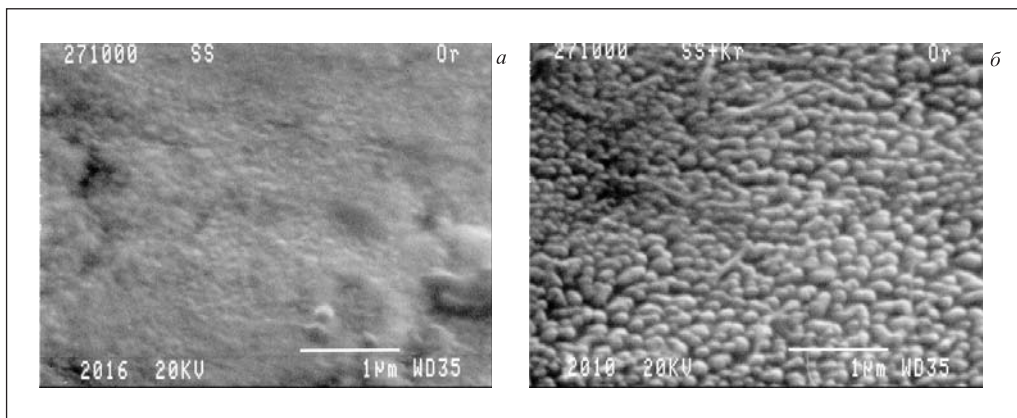


Рис. 11. Поверхность нержавеющей стали: исходная (а) и после облучения ионами ^{86}Kr с энергией 245 МэВ и потоком $2,6 \cdot 10^{15}$ ион/см 2 (б)

$10^{13} - 10^{14}$ ион/см 2 было обнаружено увеличение коэффициентов диффузии допантов. Этот результат может найти применение при разработке новых технологий для индустрии полупроводников.

Проводились исследования распыления металлов и сплавов при облучении тяжелыми ионами с высокими удельными потерями энергии. При помощи сканирующей электронной микроскопии определены коэффициенты распыления: для Ni ~ 500 атом/ион, для хромоникелевой стали ~ 100 атом/ион, для W ~ 1260 атом/ион.

При помощи сканирующей туннельной и атомной силовой микроскопии изучалась структура поверхности нержавеющей стали, Al_2O_3 , монокристаллического кремния и пиролитического графита после облучения ионами ^{86}Kr (245, 305, 440 и 750 МэВ), ^{136}Xe (605 МэВ) и ^{209}Bi (705 МэВ) (рис. 11).

Полученные результаты представляют интерес при выборе материалов для первой стенки термоядерных реакторов и для понимания физики взаимодействий тяжелых ионов с конденсированной материей.

Проведены исследования микроструктуры шпинели — MgAl_2O_4 , облученной ионами Kr, I и Xe с энергиями от 70 до 600 МэВ. Впервые показано, что при выборе перспективных материалов для инертной матрицы топлива ядерных реакторов необходимо принимать во внимание эффекты, связанные с высокими плотностями ионизации.

При помощи просвечивающей электронной микроскопии удалось наблюдать упорядочивание гелиевых пор в аморфном кремнии при облучении тяжелыми ионами. Зарегистрировано образование треков в кремнии при последовательном облучении ионами He с энергией 17 кэВ и Kr с энергией 210 МэВ. Полученные результаты важны для понимания механизмов образования дефектов в полупроводниковых материалах.

Развиты новые методические подходы к формированию металлических нанометрических проволок и субмикрометрических трубочек строго заданного размера, указывающие на перспективность использования трековых мембран в качестве шаблона для производства наноструктурных объектов, применительно к задачам микротехнологии в микроинженерии, микроэлектронике, оптоэлектронике, порошковой металлургии и т. д.

Производство сверхчистых радиоизотопов

Разработаны методы производства радиоизотопов ^{99m}Tc (^{99}Mo) и ^{225}Ac на ускорителе электронов MT-25 в реакциях (γ, n) . Были также разработаны радиохимические методы экстракции ^{149}Tb , образующегося в реакции $^{142}\text{Nd}(^{12}\text{C}, xn)^{149}\text{Dy}$ 4,1 мин \rightarrow ^{149}Tb ($x = 5-7$).

Физика и техника ускорителей тяжелых ионов

В настоящее время Лаборатория ядерных реакций располагает четырьмя циклотронами тяжелых ионов: У-400, У-400М, У-200 и DC-40, которые обеспечивают проведение фундаментальных и базовых исследований. Суммарное время работы ускорителей составляет примерно 10000 ч в год.

Запуск первой очереди ускорительного комплекса радиоактивных пучков (проект DRIBs) позволил увеличить интенсивности пучков ^6He и ^8He до 10^{10} част./с и 10^8 част./с соответственно.

В 2005 г. была проведена модернизация циклотрона DC-40, которая позволила получать интенсивные пучки ионов криптона с энергией 1,2 МэВ/нуклон для облучения различных полимерных материалов.