

УДК 539.172.15; 539.172.17; 539.163.1; 539.173.7; 546.799; 621.384.611

**РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
В ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
им. Г. Н. ФЛЕРОВА**

М. Г. Иткис, Ю. Ц. Оганесян, А. Г. Попеко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова

СИНТЕЗ НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	170
ХИМИЯ ТРАНСАКТИНИДОВ	176
ДЕЛЕНИЕ И КЛАСТЕРНАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ	178
РЕАКЦИИ ПОЛНОГО СЛИЯНИЯ И РАСПАД ГОРЯЧИХ ЯДЕР ЯДРА ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ СТАБИЛЬНОСТИ. СЕПАРАТОР СОМВАС	183
РЕАКЦИИ С ПУЧКАМИ РАДИОАКТИВНЫХ ИОНОВ. СЕПА- РАТОР АКУЛИНА	184
ДИНАМИКА НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ	187
ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ	191
ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ	195
УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ	197
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	200

УДК 539.172.15; 539.172.17; 539.163.1; 539.173.7; 546.799; 621.384.611

РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

им. Г. Н. ФЛЕРОВА

М. Г. Иткис, Ю. Ц. Оганесян, А. Г. Попеко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова

В течение прошедших пяти лет в Лаборатории ядерных реакций (ЛЯР) были созданы уникальные исследовательские установки: кинематические сепараторы, 4π -спектрометры заряженных частиц, детекторы нейтронов и γ -квантов. Основой экспериментальной базы стали изохронные циклотроны У-400 и У-400М. Благодаря высокой эффективности получения пучков ^{48}Ca была начата не имеющая аналогов в мире программа синтеза сверхтяжелых элементов в районе предсказанных сферических оболочек $Z \approx 114$ и $N \approx 184$. Выполнены первые эксперименты по синтезу ядер с $Z = 112, 114$ и 116 в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, $^{48}\text{Ca} + ^{242,244}\text{Pu}$ и $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$. Исследование химических свойств новых элементов является традиционным направлением программы исследований ЛЯР. Были получены новые данные о химических свойствах элементов резерфордий и сиборгий. В экспериментах по исследованию вынужденного и спонтанного деления изучалось влияние ядерных оболочек на динамику процесса деления. При помощи фрагмент-сепаратора COMBAS на ускорителе У-400М с использованием пучков ^{12}Ca и ^{14}N при энергии до $50 \text{ A} \cdot \text{MeV}$ исследовались механизмы нуклон-нуклонных взаимодействий. В экспериментах по упругому рассеянию и в реакциях передачи ^6He на водороде и гелии на сепараторе АКУЛИНА были обнаружены проявления структуры ^6He . Изучались также прямые реакции ^8He с водородом. Выполнены измерения масс и изучалась структура уровней нейтронно-обогатенных изотопов легких элементов ^{7-10}He , $^{10,11}\text{Li}$, $^{13,14}\text{Be}$ и ^{16}B . Развитие ускорительной техники в последние годы в основном было связано с реализацией проекта DRIBs — получением пучков радиоактивных ионов на циклотронах ЛЯР.

During the past 5 years a unique research base with modern set-ups (kinematic separators, 4π -spectrometers of charged particles, detectors of neutrons and γ -quanta) has been created at the FLNR on the basis of the U-400 and U-400M isochronous cyclotrons. Due to the high efficiency of the ^{48}Ca beam production a world-level competitive program on the synthesis of superheavy elements in the region of predicted spherical shells with $Z \approx 114$ and $N \approx 184$ has been launched. First experiments aimed at the synthesis of the nuclei with $Z = 112, 114$ and 116 have been carried out using $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, $^{48}\text{Ca} + ^{242,244}\text{Pu}$ and $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ reactions. The investigation of chemical properties of new elements is one of the traditional FLNR research programs. New results on the properties of Rf and Sg have been obtained. New evidence of the shell influence on the nuclear fission dynamics has been obtained in the research of spontaneous and induced fission carried out recently. A number of experiments devoted to the study of reaction mechanisms in nucleus-nucleus collisions were carried out at a fragment-separator COMBAS using the ^{12}Ca and ^{14}N ion beams of up to $50 \text{ A} \cdot \text{MeV}$ in energy at the U-400M cyclotron beam line. Manifestations of the ^6He -nucleus structure in elastic scattering and transfer reactions between ^6He and hydrogen and helium nuclei were observed. Direct reactions between the $26 \text{ A} \cdot \text{MeV}$ ^8He beam and hydrogen have been also studied at the separator ACCULINA. The mass measurements and the level structure studies of very

neutron-rich isotopes of light elements ${}^7\text{--}{}^{10}\text{He}$, ${}^{10,11}\text{Li}$, ${}^{13,14}\text{Be}$, ${}^{16}\text{B}$ have been performed. The development of the accelerator technique is connected with the realization of the project DRIBs — production of radioactive ion beams at FLNP cyclotrons.

Физика тяжелых ионов в последние десятилетия является наиболее динамично развивающейся областью ядерной физики низких и промежуточных энергий. Именно здесь были получены наиболее впечатляющие результаты. Например, в области трансфермиевых элементов ($Z > 100$) за последние шесть лет были открыты пять новых элементов и синтезированы около тридцати новых изотопов, обнаружено стабилизирующее влияние нейтронной «подоболочки» $N = 162$, получены указания на существование «острова стабильности» сверхтяжелых элементов с $Z \approx 114$ и $N \approx 184$, получены данные о химических свойствах элементов вплоть до $Z = 108$. В области легких ядер ($Z < 20$) синтезированы около пятидесяти новых изотопов, среди них наблюдались такие экзотические, как ${}^4\text{H}$ и ${}^5\text{H}$, а также «динейтронная» конфигурация ${}^6\text{He}$.

В Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова исследования традиционно проводятся по трем основным направлениям физики тяжелых ионов. Они включают эксперименты по синтезу тяжелых и экзотических ядер, изучение механизма ядерных реакций и развитие ускорительной техники. В последние годы интенсивно развивается новое направление — изучение реакций с радиоактивными ионами.

В течение прошедших пяти лет были созданы уникальные исследовательские установки: кинематические сепараторы, 4π -спектрометры заряженных частиц, детекторы нейтронов и γ -квантов. Основой экспериментальной базы стали изохронные циклотроны У-400 и У-400М, оснащенные ЭЦР-источниками ионов.

Исследования выполняются в широкой международной кооперации как на ускорителях лаборатории, так и в других научных центрах.

В этом кратком обзоре мы не пытаемся привести полный перечень экспериментов, выполненных в Лаборатории ядерных реакций в период 1995–2000 гг. Остановимся лишь на тех работах, которые, как мы полагаем, в наибольшей мере иллюстрируют достижения лаборатории.

СИНТЕЗ НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Фундаментальным следствием макро-микроскопической теории явилось предсказание «острова стабильности» сверхтяжелых элементов вблизи $Z = 114$ и $N \approx 184$. Эта интригующая гипотеза была предложена около 35 лет назад и интенсивно развивалась в последующие годы.

Важным достижением лаборатории на пути к «острову стабильности» явилось экспериментальное подтверждение значительного повышения ста-

бильности сверхтяжелых ядер по отношению к спонтанному делению вблизи нейтронной подоболочки с $N = 162$.

В рамках сотрудничества Дубна–Ливермор (США) на ускорителе У-400 (ЛЯР) в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{248}\text{Cm}$ были синтезированы два новых изотопа элемента Sg ($Z = 106$) и в реакции $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ — новый изотоп элемента Hs ($Z = 108$) с $A = 267$. В результате экспериментов по синтезу элемента 110 в реакции $^{34}\text{S} + ^{244}\text{Pu}$ был получен его изотоп с числом нейтронов $N = 163$ [1]. В совместных экспериментах, выполненных на ускорителе UNILAC (GSI, ФРГ), в реакциях холодного слияния $^{62,64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$, $^{64}\text{Ni} + ^{209}\text{Bi}$ и $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$ были открыты элементы с $Z = 110, 111$ и 112 [2].

Эти исследования подтвердили предсказания макро-микроскопической теории о существенном стабилизирующем влиянии деформированной подоболочки в тяжелых деформированных ядрах вблизи $Z = 108$, $N = 162$ и показали, что в реакциях наиболее тяжелых мишеней Pu и Cm с ускоренными ионами ^{48}Ca можно достигнуть границы области, где становится заметным влияние оболочек $Z = 114$ и $N = 184$.

Использование ионов ^{48}Ca в качестве бомбардирующих частиц для синтеза наиболее тяжелых элементов представляет особый интерес. Значительное обогащение нейтронами этого ядра позволяет получать составные ядра с числами нейтронов, наиболее близкими к предсказанному магическому числу $N = 184$. В противоположность реакциям «холодного» слияния в реакциях с ионами кальция, вследствие значительной асимметрии во входном канале ($A_p/A_t \approx 0,2$; $Z_p \cdot Z_t \approx 1880$), не ожидается существования динамических запретов на слияние взаимодействующих ядер. С другой стороны, как следствие значительного дефекта массы ^{48}Ca , энергия возбуждения составного ядра при энергии взаимодействия вблизи кулоновского барьера ожидается ~ 30 МэВ. Это обстоятельство должно заметно повысить вероятность выживания составных ядер в сравнении с реакциями «горячего слияния».

Поскольку ожидаемое сечение образования сверхтяжелых элементов даже в максимуме функции возбуждения должно было быть близким к 1 пб, непременным условием проведения экспериментов являлось получение стабильных высокоинтенсивных пучков изотопа ^{48}Ca при минимальном расходе материала. После модернизации ускорителя У-400 удалось обеспечить среднюю интенсивность пучка ионов ^{48}Ca на мишени $\approx 3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ при расходе рабочего вещества $\sim 0,3$ мг/ч. Впервые в экспериментах использовался режим непрерывного пучка.

Для комплексного тестирования ЭЦР-источника ионов, ускорителя У-400 и сепараторов в длительных экспериментах, нацеленных на синтез наиболее тяжелых элементов, были выбраны реакции $^{206,208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, xn)$. На сепараторе ВАСИЛИСА изучалось образование изотопов No в диапазоне энергии бомбардирующих ионов $205 \div 235$ МэВ. Полученные значения сечений обра-

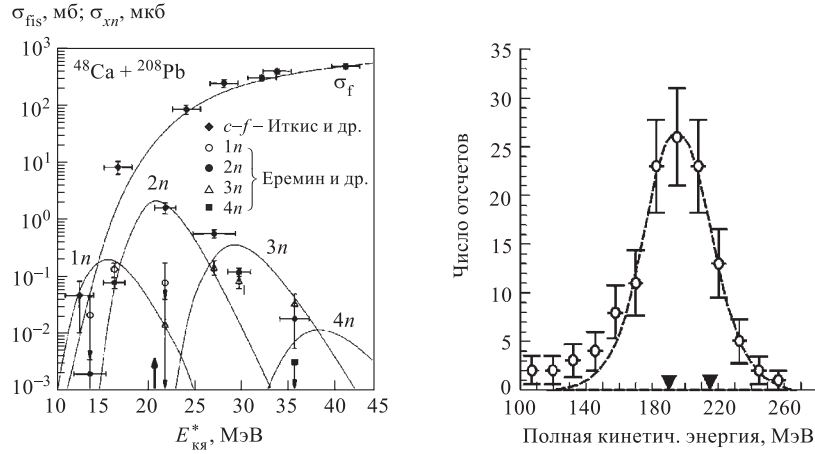


Рис. 1. Зависимость от энергии сечения образования изотопов нобелия в реакциях $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, xn)^{254-x}\text{No}$

Рис. 2. Распределение полной кинетической энергии осколков деления ^{252}No , образовавшегося в реакции $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)$

зования показаны на рис. 1. Распределение полной кинетической энергии осколков деления ^{252}No (s. f.) (рис. 2) изучалось в реакции $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)$ [3].

Благодаря высокой эффективности получения ионов ^{48}Ca была начата не имеющая аналогов в мире программа синтеза сверхтяжелых элементов.

Эксперименты выполнялись на циклотроне тяжелых ионов ЛЯР У-400 и сепараторах ВАСИЛИСА и ГНС в рамках сотрудничества с GSI (Дармштадт, Германия), LLNL (Ливермор, США), RIKEN (Саитама, Япония), Университетом Коменюса (Братислава, Словакия) и Университетом Мессины (Италия).

Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Дата	Ми- шень	Энергия возб. E^* , МэВ	Доза пучка, 10^{18}	Наблюдае- мое ядро	Сечение, пб
Март 1998	^{238}U	31,0	3,5	$^{283}112$	5
Ноябрь–дек. 1998	^{244}Pu	35,0	5,2	$^{289}114$	1
Март 1999	^{242}Pu	33,5	7,5	$^{287}114$	2,5
Июнь–окт. 1999	^{244}Pu	35,3	10	$^{288}114$	1
Июнь 2000–дек. 2001*	^{248}Cm	33,1	23*	$^{292}116$	0,7*

*Эксперимент продолжается.

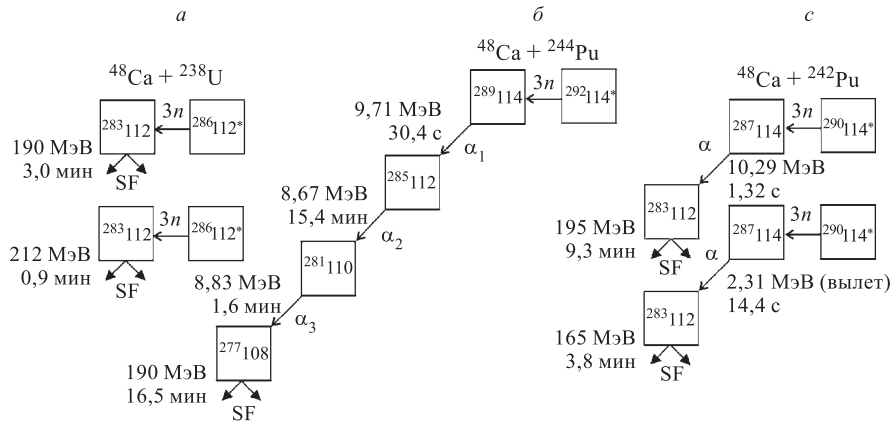


Рис. 3. Позиционно-коррелированные цепочки распадов: а) $^{283}_{112}$, образующегося в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$; б) $^{289}_{114}$, образующегося в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$; в) $^{287}_{114}$, образующегося в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$

Первые положительные результаты были получены на сепараторе ВАСИЛИСА весной 1998 г. после облучения мишени ^{238}U потоком ионов ^{48}Ca $3,5 \cdot 10^{18}$ [4]. В этом эксперименте наблюдались два события спонтанного деления с полной энергией ТКЕ, близкой к 190 и 212 МэВ. Эти события были приписаны распаду нового изотопа элемента 112, образовавшегося в реакции $^{238}\text{U}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{283}_{112}$ (см. рис. 3, а) с сечением $\sigma_{3n} \approx 5$ пб.

Первые эксперименты с целью синтеза сверхтяжелого ядра с $Z = 114$ в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ были выполнены в рамках сотрудничества ЛЯР–Национальная ливерморская лаборатория им. Лоуренса (США). Эксперименты выполнялись на дубненском газонаполненном сепараторе. Мишень состояла из обогащенного изотопа ^{244}Pu (98,6%). Энергия бомбардирующих частиц в середине мишени была выбрана равной 236 МэВ, при этом энергия возбуждения составного ядра должна была находиться в пределах от 34 до 38,5 МэВ. В этих условиях были выполнены два эксперимента.

В первом эксперименте [5] была зарегистрирована цепочка последовательных распадов, начинавшаяся имплантируемым атомом, затем следовали три α -частицы, и заканчивавшаяся спонтанным делением. Все события коррелируют по позициям в детекторе (рис. 3, б). Высокие средние энергии α -частиц вместе с длительными интервалами времени между распадами и спонтанное деление, завершающее цепочку, указывают на распад ядер с высокими атомными номерами. Хорошим кандидатом в качестве исходного ядра, породившего эту цепочку α -распадов, является изотоп $^{289}_{114}$, образовавшийся в $3n$ -испарительном канале с поперечным сечением ~ 1 пб.

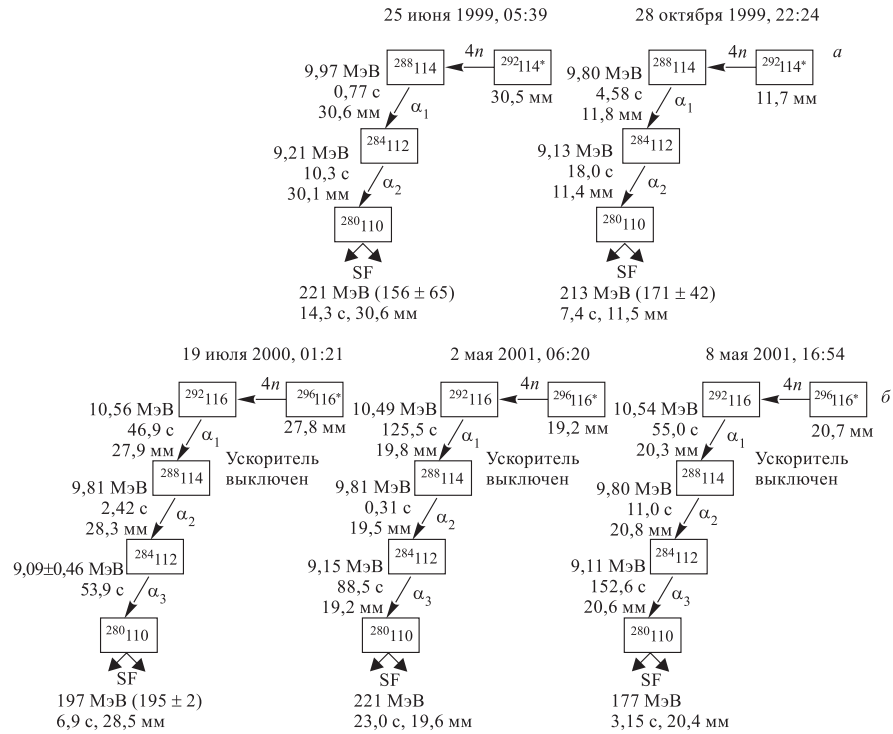


Рис. 4. а) Цепочки распадов $^{288}_{114}$, наблюдавшиеся в реакции $^{244}_{94}\text{Pu}(^{48}_{20}\text{Ca}, 4n)$; б) последовательности событий, наблюдавшиеся в цепочках распада $^{292}_{116}$

Во втором эксперименте [6], проведенном в июне–октябре 1999 г., наблюдались две цепочки α -распадов, завершавшихся спонтанным делением (рис. 4, а). Энергия ионов пучка соответствовала энергии возбуждения составных ядер $^{292}_{116}$, равной $E_x = (38 \pm 2)$ МэВ. При этой энергии наибольшую вероятность имел канал с испарением 4 нейтронов, приводивший к образованию изотопа $^{288}_{114}$.

В марте–апреле 1999 г. мишень $^{242}_{94}\text{Pu}$ была облучена ионами $^{48}_{20}\text{Ca}$ на сепараторе ВАСИЛИСА [7]. В этой реакции ожидалось образование изотопа элемента 114 с $N = 173$ — $^{287}_{114}$. Этот изотоп должен испытывать α -распад, приводящий к образованию дочернего ядра $^{283}_{112}$, которое ранее было синтезировано в реакции $^{48}_{20}\text{Ca} + ^{238}_{92}\text{U}$. Условия проведения эксперимента были практически идентичны условиям проведения экспериментов по синтезу изотопа $^{283}_{112}$. Энергия бомбардирующих ионов $^{48}_{20}\text{Ca}$ составляла 235 МэВ. Наблюдались две цепочки α -распада, завершавшиеся спонтанным делением с

периодом полураспада $T_\alpha = 5,5_{-2}^{+10}$ с (рис. 3, *е*). Сечение образования нового изотопа $^{287}114$ составило ~ 2 пб.

В июне 2000 г. была начата серия экспериментов по синтезу сверхтяжелого элемента с $Z = 116$ в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ [8]. Предполагалось, что в реакциях полного слияния после испарения 3 или 4 нейтронов и последующего α -распада будут образовываться уже известные изотопы $^{288}114$ и $^{289}114$. К июню 2001 г. были выполнены 4 серии экспериментов с суммарной дозой пучка $2,3 \cdot 10^{19}$ ионов. Всего наблюдались три цепочки распадов (см. рис. 4, *б*). После имплантации тяжелого ядра отдачи наблюдалось испускание α -частиц с $E_{\alpha 1} \approx 10,5$ МэВ, ускоритель выключался и сигналы от α_2 , α_3 и SF регистрировались практически в бесфоновых условиях. Из сравнения рис. 4, *а* и 4, *б* видно, что первый α -распад приводит к последовательности распадов, соответствующей изотопу $^{288}114$, что позволяет приписать исходные цепочки распаду изотопа $^{292}116$.

Свойства наиболее тяжелых изотопов Hs $^{292}116$ представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Изотоп	Вид распада	E_α , МэВ	ТКЕ _{изм} , МэВ	$T_{1/2}$
^{277}Hs	SF		170	11 мин
$^{280}110$	SF		210	7,6 с
$^{281}110$	α	8,83		1,1 мин
$^{283}112$	SF		190	3 мин
$^{284}112$	α	9,17		44,3 с
$^{285}112$	α	8,67		11 мин
$^{287}114$	α	10,29		5 с
$^{288}114$	α	9,83		2,6 с
$^{289}114$	α	9,71		21 с
$^{292}119$	α	10,56		52,5 мс

Обобщая результаты экспериментов с пучком ^{48}Ca после набора интегральной дозы $\approx 5 \cdot 10^{19}$ ионов, можно сделать следующие заключения [9]:

— реакции полного слияния ^{48}Ca с актинидными мишенями при энергиях вблизи кулоновского барьера с наибольшей вероятностью протекают с испарением 3 или 4 нейтронов, эмиссия заряженных частиц (протонов и α) сильно подавлена;

— для цепочек последовательных α -распадов, завершающихся спонтанным делением, энергии Q_α и периоды полураспада T_α следуют фундаментальному закону Гейгера–Неттола и указывают на распад ядер с большими атомными номерами ($Z = 110 \div 116$);

— спонтанное деление с ТКЕ ~ 200 МэВ связано с распадом тяжелых долгоживущих ядер ($T_{\text{SF}} \sim 10 \div 1000$ с) и ядер с $Z \geq 106$, образующихся как дочерние продукты α -распада более тяжелых ядер;

— увеличение времени жизни у $^{281}110$ по сравнению с известным изотопом $^{273}110$ более чем в $5 \cdot 10^5$ раз и у $^{285}112$ по сравнению с известным $^{277}112$ более чем в $1,4 \cdot 10^6$ раз является указанием на наличие ядерной оболочки при еще больших числах нейтронов;

— период полураспада изотопа $^{287}114$ оказался короче, чем у более тяжелых изотопов $^{289}114$ и $^{288}114$, такая тенденция ожидается при уменьшении числа нейтронов по мере удаления от замкнутой нейтронной оболочки;

— сравнивая времена жизни $^{292}116$ ($T_{1/2} = 33$ мс) и его дочернего ядра $^{288}114$ ($T_{1/2} = 1,8$ с), можно предположить, что $Z = 114$ является протонной оболочкой.

Полученные результаты являются прямым указанием на существование «острова стабильности» сверхтяжелых элементов вблизи $Z = 114$ и $N > 174$.

Дальнейшие эксперименты будут нацелены на синтез ядер с $Z = 110 \div 118$ в реакциях ^{232}Th , $^{236,238}\text{U}$, ^{237}Np , $^{242,244}\text{Pu}$, $^{241,243}\text{Am}$, $^{246,248}\text{Cm}$, $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$. Обсуждается возможность проведения исследований с ионами ^{36}S , ^{50}Ti , ^{58}Fe и радиоактивными пучками. Планируются эксперименты по определению масс сверхтяжелых ядер, образующихся в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{236,238}\text{U} \rightarrow ^{284,286}112^*$.

Продолжаются работы по модернизации газонаполненного сепаратора ГНС (электронная и детектирующая системы) и сепаратора ВАСИЛИСА (установка нового отклоняющего магнита, электронная и детектирующая системы).

ХИМИЯ ТРАНСАКТИНИДОВ

Исследование химических свойств новых элементов является традиционным направлением программы исследований ЛЯР.

На установке ХИПТИ совместно с химиками из Швейцарии, Германии и Польши была выполнена серия экспериментов по изучению свойств резерфордия. Сравнительное изучение (оксо)хлоридов и бромидов ^{261}Rf ($T_{1/2} = 78$ с), образующихся в реакции $^{248}\text{Cm}(^{18}\text{O}, 5n)$, и ^{165}Hf ($T_{1/2} = 76$ с) проводилось методами изотермической хроматографии. Было показано, что соединения Rf более летучи, чем соединения Hf [10].

Систематически изучалось поведение короткоживущих изотопов Mo и W, аналогов Sg. Сорок атомов элемента 106 были выделены в форме SgO_2Cl_2 методами термохроматографии и зарегистрированы по спонтанному делению на кварцевой поверхности. Установлено, что химическое поведение элемента 106 и короткоживущих изотопов Mo и W идентично. Сравнительный анализ полученных данных и данных по химии Sg позволил установить формулы химических соединений этого элемента [11].

Значительные времена жизни изотопов с $Z = 108 \div 114$, синтезированных в реакциях с ^{48}Ca , позволяют планировать эксперименты по изучению химических свойств этих элементов. Проблема может быть сформулирована следующим образом: являются ли эти элементы гомологами тяжелых металлов Os \div Pb. Химические свойства тяжелых элементов определяются релятивистскими эффектами, и их изучение относится к фундаментальным проблемам современной химии.

Предполагается, что элемент 108 (хассий) будет являться гомологом Ru и Os. Благодаря уникальному групповому химическому свойству Ru, Os и Hs образовывать летучие стабильные тетроксиды типа Os(Ru)O₄, хассий может быть успешно отделен от актинидов и трансактинидов с $Z < 108$. В модельных опытах с короткоживущими α -активными изотопами $^{171-174}\text{Os}$, получавшимися в реакции $^{158}\text{Dy} + ^{20}\text{Ne}$ [12], при помощи смеси газов — носителей Ar/O₂ — термализованные атомы отдачи переносились в горячую ячейку кварцевой термохроматографической колонки установки КИТ (рис. 5).

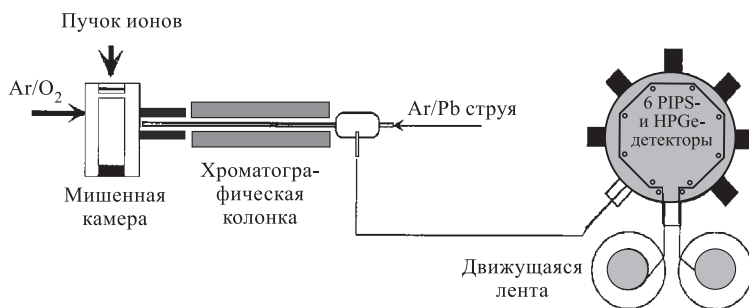


Рис. 5. Схема модернизированной установки КИТ

При добавлении в газ аэрозолей свинца удавалось переносить OsO₄ в помещение для измерения активности на расстояние 10 метров за несколько секунд. Аэрозоли высаживались на ленту, которая каждые 20 с перемещалась на один шаг. Полный выход изотопов $^{171-174}\text{Os}$, включая вынос из реакционной камеры, транспорт и осаждение, составил 50–60%. Достигнутая эффективность аппаратуры достаточна для полномасштабных экспериментов по химии хассия.

С целью поиска долгоживущих продуктов распада элемента 110 проводились облучения ториевой мишени внутренним пучком ионов ^{48}Ca . Методами быстрой химии из облученной мишени извлекалась фракция, содержавшая Sg, и в последующих измерениях проводился поиск α -распада долгоживущего изотопа ^{268}Sg и спонтанного деления ^{264}Rf [13]. В этих измерениях были отработаны методы разделения образующихся изотопов, а также изучены фоновые условия.

Изотоп $^{283}112$ с временем жизни ~ 3 мин образуется с сечением примерно 5 пб. Элемент 112 должен принадлежать к группе ПВ Zп–Cd–Hg, поэтому в качестве первого шага в этом направлении были разработаны методики выделения и детектирования Hg. Для экспериментов с короткоживущими изотопами ртути на циклотроне У-400 была разработана специальная детектирующая проточная камера (рис. 6), в которой располагалась пара прямоугольных (2×2 см) PIPS-детекторов.

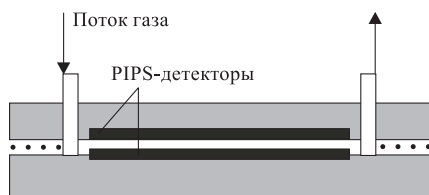
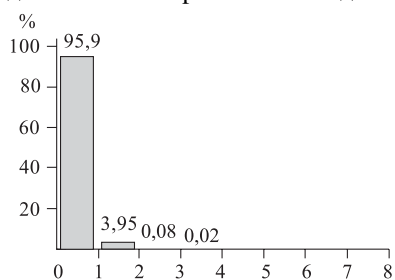


Рис. 6. Схема детекторной камеры

Первые эксперименты по химической идентификации элемента 112 проводились на циклотроне У-400 ЛЯР в январе 2000 г. [14]. Мишень из $^{238}\text{U}_3\text{O}_8$ толщиной 2 мг/см^2 содержала также около 100 мкг естественного Nd. Мишень была нанесена на 2-мкм пленку сплава НАVAR. При облучении мишени ядра отдачи тормозились в чистом гелии и через капилляр длиной 25 м переносились к детектирующей аппаратуре. Восемь детектирующих проточных камер располагались последовательно. Поверхности детекторов в камерах 1–6 были покрыты Au, а в последних двух камерах — Pd. Камеры располагались внутри детектора нейтронов. Абсорбция атомов Hg, образующихся в реакциях $\text{Nd}(^{48}\text{Ca}; xn)$, контролировалась по α -частицам ^{185}Hg (5,65 МэВ).

За 10 дней облучения была набрана интегральная доза ионов ^{48}Ca $6,9 \cdot 10^{17}$. Распределение Hg в детекторных камерах приведено на рис. 7. События спонтанного деления не были зарегистрированы. Этот эксперимент продемонстрировал возможность изучения химических свойств элементов, образующихся с сечениями в диапазоне нескольких пикобарн. Для следующих экспериментов мы планируем модернизировать детектирующую систему с целью обеспечения возможности регистрировать α -активность и спонтанное деление в газе, прошедшем через все камеры, а также значительно увеличить дозу пучка.

Рис. 7. Распределение ртути, абсорбированной в детекторных камерах



ДЕЛЕНИЕ И КЛАСТЕРНАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Новые важные физические результаты были получены при изучении спонтанного деления и деления слабозбужденных составных ядер.

При исследованиях массовых и энергетических распределений осколков спонтанного деления ^{244}Cm и деления слабозбужденного составного ядра $^{242m}\text{Am}(n, f)$ была выявлена компактная область повышенного выхода осколков вблизи фрагментов с магическим числом нейтронов $N = 50$. Наблюдавшееся явление может быть связано с существованием сверхбыстрой цепочки распадов на три кластера примерно равной массы и с $Z = 31 \div 32$ ($2 \cdot 10^{-5}$ от полного числа делений) [15]. Аналогичная структура, которая, возможно, также определяется кластерной конфигурацией, наблюдалась и при изучении спонтанного деления ^{252}Cf при низких энергиях возбуждения [16]. Эти данные указывают на значительное влияние оболочек на динамику спонтанного и вынужденного деления.

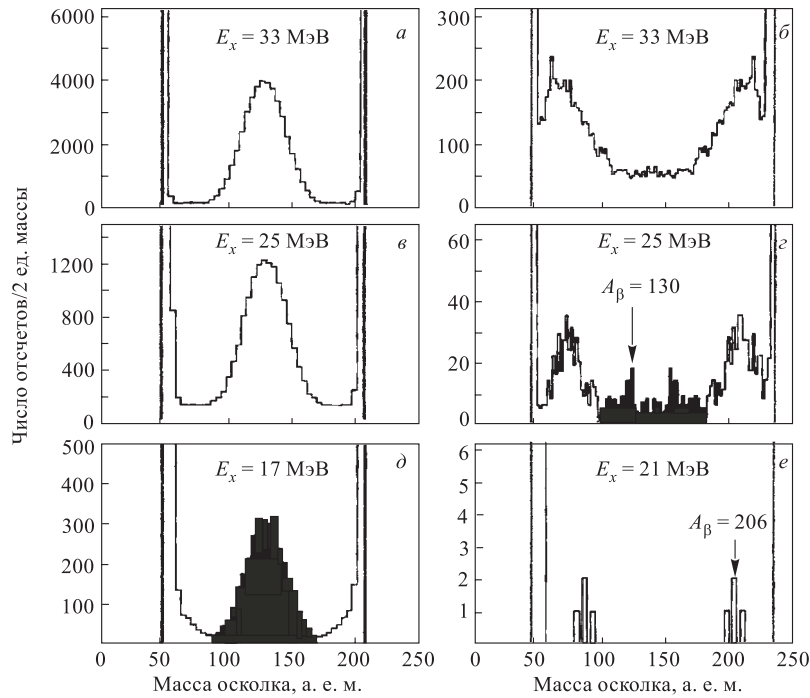
В подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия) с помощью полиэтилентерефталатных трековых детекторов изучалась кластерная радиоактивность и спонтанное деление ^{232}Th . Установлена нижняя граница парциального периода полураспада при эмиссии наиболее вероятного кластера ^{26}Ne : $T_{1/2\text{cl}} > 5 \cdot 10^{21}$ лет. Измеренный период спонтанного деления составил: $T_{1/2\text{sf}} = (1,2_{-0,3}^{+0,5}) \cdot 10^{21}$ лет [17].

Интерес к изучению деления сверхтяжелых ядер в реакциях с тяжелыми ионами связан, в первую очередь, с возможностью получения информации, необходимой для синтеза новых элементов и оценки сечения образования компаунд-ядер при энергии возбуждения $\approx 15 \div 30$ МэВ. Кроме того, ядра из области At–Th и сверхтяжелые ядра с $Z \geq 100$ представляют значительный интерес для изучения собственно феномена деления.

Для получения информации о характеристиках деления ядер в трех областях — доактинидной, промежуточной и трансфермиевой — применялся 4π -детектор нейтронов DEMON и триггер осколков деления CORSET [18]. Спектрометр предназначен для регистрации осколков деления в корреляции с пред- и послеразрывными нейтронами и γ -квантами. Модернизация спектрометра позволила реализовать метод «нейтронных часов» для изучения характеристик процесса образования и распада сверхтяжелых ядер, образующихся в реакциях с тяжелыми ионами [19]. С использованием единого подхода были получены экспериментальные данные о массовых и энергетических распределениях, пред- и последельительных нейтронах, а также корреляционные спектры угловых и энергетических распределений нейтронов в совпадениях с осколками выделенной массы и энергии.

Выполнена серия экспериментов по изучению деления составных ядер ^{220}Ra , ^{226}Th , ^{256}No , ^{270}Sg и $^{286}112$, образующихся в реакциях с ионами ^{12}C , ^{18}O , ^{22}Ne и ^{48}Ca при энергиях возбуждения в диапазоне от 12 до 60 МэВ (рис. 8) [20, 21].

Продемонстрирован многомодовый характер деления нейтронодефицитных изотопов Th при низких энергиях возбуждения. При переходе от ^{220}Th

Рис. 8. Распределение масс осколков деления в реакциях ионов ^{48}Ca

к ^{233}Th наблюдался переход от симметричного к асимметричному делению. Эти эксперименты выполнялись в сотрудничестве ЛЯР с INFN (Италия), ISN (Франция), Брюссельским Университетом, Техасским Университетом и ИЯФ (Казахстан).

Испускание нейтронов и γ -квантов в корреляции с осколками деления сверхтяжелых компаунд-систем при энергиях возбуждения вблизи кулоновского барьера до настоящего времени практически не изучалось. Подобные исследования могут быть исключительно полезны для идентификации процессов слияния–деления и квазиделения и определения вклада каждого из этих процессов в выход осколков деления. Кроме того, знание множественности нейтронов, испускаемых осколками деления, может быть использовано для идентификации сверхтяжелых элементов в экспериментах по их синтезу.

Впервые в реакциях $^{204,208}\text{Pb}(^{16}\text{O}, f)$ и $^{208}\text{Pb}(^{18}\text{O}, f)$ при энергиях вблизи кулоновского барьера были изучены многомерные корреляции (масса–энергия–угол) для осколков деления в совпадении с γ -квантами [22]. Энергии возбуждения составных ядер $^{220,224,226}\text{Th}$ в седловой точке изменялись в пределах $E_{\text{сп}}^* = 16 \div 40$ МэВ. При низких энергиях возбуждения наблюдались

две различные моды деления: симметричная и асимметричная. Для этих мод деления были оценены характерные времена коллективного движения. Экспериментально полученные характеристики оказались в хорошем согласии с предсказаниями макро-микроскопической теории.

Характеристики вынужденного деления ядер с $Z > 100$ были измерены при весьма низких энергиях возбуждения, при которых существенную роль играют оболочечные эффекты, приводящие к новым неожиданным свойствам. Важно отметить, что полученные данные о массовых и энергетических распределениях осколков деления, а также о сечениях слияния–деления ядер позволяют предсказывать свойства сверхтяжелых ядер и более точно планировать будущие эксперименты.

В этой связи в ЛЯР были выполнены эксперименты по делению тяжелых ядер в реакциях $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{256}\text{No}$, $^{238}\text{U} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{286}112$, $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{292}114$, $^{208}\text{Pb} + ^{86}\text{Kr} \rightarrow ^{294}118$ [23, 24]. Выбор этих реакций был связан с экспериментами по синтезу изотопов $^{283}112$, $^{287}114$, $^{289}114$ в Дубне и изотопа $^{293}118$ в Беркли (США) [25].

Эксперименты выполнялись на выведенном пучке ионов ^{48}Ca и ^{86}Kr циклотрона У-400 с помощью времяпролетного спектрометра CORSET, 24 модулей нейтронного спектрометра DEMON и 4-кристального сцинтилляционного детектора множественности γ -квантов.

На рис. 9 представлены двумерные матрицы ТКЕ-М для исследованных реакций с ионами ^{48}Ca при $E_{\text{lab}} = 233$ МэВ и ^{86}Kr при $E_{\text{lab}} = 453$ МэВ, которые соответствовали энергиям возбуждения $E^* \approx 33$ МэВ для компаунд-ядер ^{256}No (а), $^{286}112$ (б) и $^{292}114$ (в), а для ядра $^{294}118$ (г) $E^* \approx 15$ МэВ. Из рисунка хорошо видно, что матрица ТКЕ-М между пиками упругого рассеяния коренным образом изменяется при переходе от ^{256}No к сверхтяжелым ядрам. Для ^{256}No она имеет треугольную форму, которая характерна для деления составного ядра, и только на краях видны события, которые могут быть приписаны квазиделению. При переходе к ядру $^{286}112$ процесс квазиделения становится доминирующим.

Для ядра $^{292}114$ картина опять изменяется. Можно видеть, что отношение выхода фрагментов квазиделения по отношению к выходу осколков в области симметричного деления существенно отличается от их отношения для $^{286}112$. Эта тенденция более отчетливо видна в нижней части рис. 10, где показаны выходы масс для двух реакций: $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ (а, в) и $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ (б, г).

В табл. 3 представлены результаты исследований реакций с ^{48}Ca и реакции $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$.

В случае реакции $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ в области симметричного массового распределения ($A/2 \pm 30$) процесс квазиделения преобладает. В этом заключается коренное отличие реакции $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ от реакции $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ и особенно от $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$, в которых в той же области масс преобладает вклад деления компаунд-ядра.

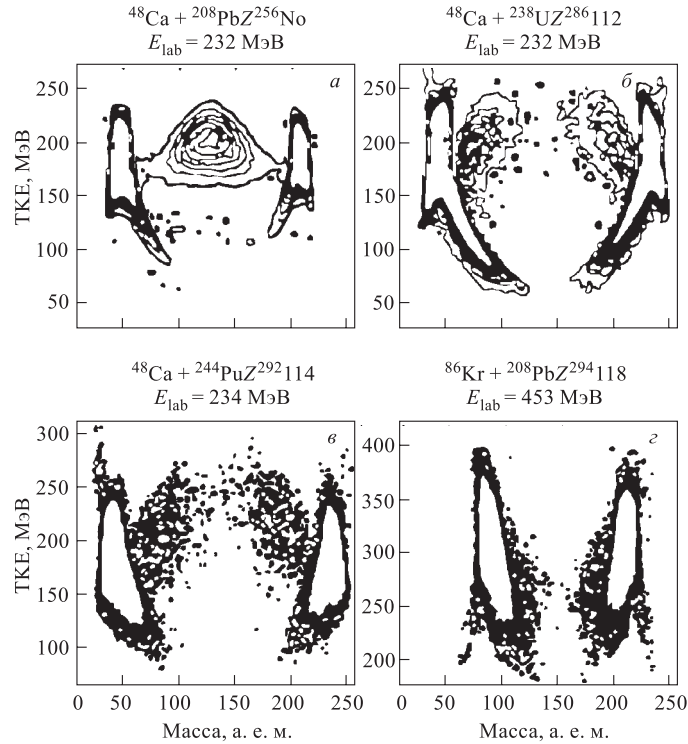


Рис. 9. Двумерные матрицы ТКЕ-М для продуктов указанных реакций

Таблица 3.

Реакция	E_{lab} , МэВ	E^* , МэВ	σ_{fis}	$\sigma_{\text{fis}}/\sigma_{\text{cap}}$, %	$\langle \text{ТКЕ} \rangle$, МэВ
$^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$	230	33	350 мб	96	193
$^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$	232	33	6 мб	3	215
$^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$	233,5	33	4 мб	9	220
$^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$	486	28	~ 6 мкб	$\geq 10^{-3}$	260
$^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$	453	15	≥ 500 нб	—	260

Полученные распределения масса–энергия однозначно указывают на переход от симметричного деления компаунд-ядер ^{256}No к более асимметричному делению ядер $^{286}\text{112}$ и $^{292}\text{114}$. Асимметрия деления сверхтяжелых ядер может быть объяснена оболочечными эффектами в легком осколке. В случае $^{294}\text{118}$ процесс квазиделения представляется преобладающим даже в области симметричного деления [26].

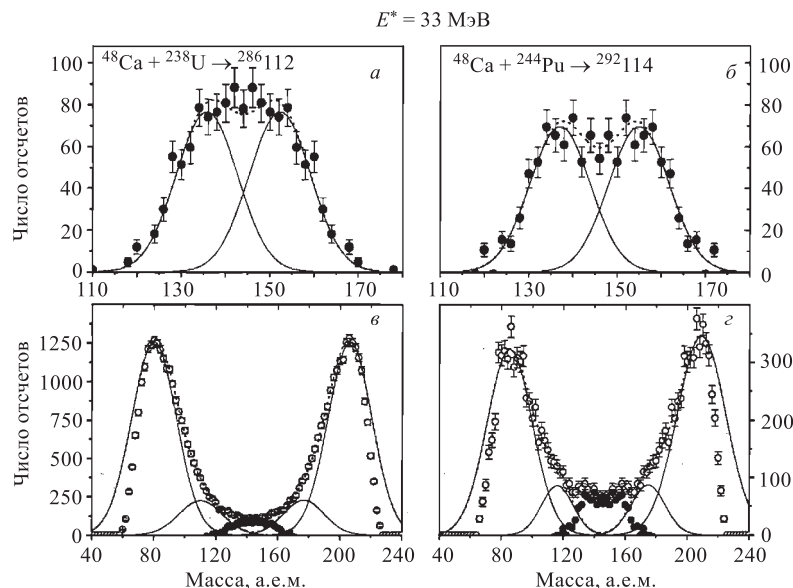


Рис. 10. *а, б*) Извлеченные компоненты деления компаунд-ядра, представленные двумя гауссианами. *в, г*) Массовые распределения продуктов реакций. Светлые кружки соответствуют экспериментальным данным, темные — извлеченным компонентам при делении компаунд-ядра

С использованием 4 π -мультidetекторного спектрометра нейтронов DEMON и триггера осколков деления CORSET планируется изучить в совпадении с нейтронами и γ -квантами дифференциальные характеристики массовых и энергетических распределений осколков деления компаунд-систем с $Z = 102 \div 122$, образующихся при подбарьерных энергиях в реакциях с ионами ^{22}Ne , ^{40}Ar , ^{48}Ca , ^{50}Ti , ^{58}Fe и ^{86}Kr . Планируется также продолжить изучение влияния оболочечных эффектов на динамику спонтанного деления ^{252}Cf .

РЕАКЦИИ ПОЛНОГО СЛИЯНИЯ И РАСПАД ГОРЯЧИХ ЯДЕР

На электростатическом сепараторе ядер отдачи ВАСИЛИСА исследовалось испарение протонов, α -частиц и большего числа (до 15) нейтронов из составных ядер с энергиями возбуждения до 160 МэВ. Получена информация о конкуренции различных каналов распада при температурах ядер до 2,5 МэВ.

Обнаружена повышенная стабильность сильновозбужденных ядер по отношению к спонтанному делению. Теоретический анализ показал, что каналы

испарения частиц доминируют ($\Gamma_{n,p,\alpha}/\Gamma_{\text{tot}} \approx 0,8 \div 0,9$) в диапазоне энергий возбуждения от 50 до 160 МэВ. Деление возбужденных ядер начинает преобладать лишь при низких энергиях возбуждения. Этот факт указывает на значительное время деления сильновозбужденных ядер: $\tau \sim (3 \div 6) \cdot 10^{-20}$ с [27, 28].

Высокая чувствительность и селективность сепаратора ВАСИЛИСА позволяют синтезировать и идентифицировать целый ряд нейтронодефицитных изотопов $^{213,214}\text{Pa}$, ^{219}U , $^{228,229}\text{Pu}$ и определить характеристики их α -распада [29].

ЯДРА ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ СТАБИЛЬНОСТИ. СЕПАРАТОР COMBAS

Полностью завершились сборка, настройка и испытания фрагмент-сепаратора COMBAS (рис. 11) на пучке ускорителя У-400М. Сепаратор оснащен комплексом управляющей и контрольной аппаратуры. В качестве детектора используется полупроводниковый ΔE_1 , ΔE_2 , ΔE_3 , ΔE_4 -телескоп-спектрометр [30].

Комплексное тестирование установки проводилось с пучками ионов ^{12}C и ^{14}N с энергией до 50 А·МэВ. Были выполнены первые эксперименты по изучению выхода тяжелых изотопов Ве в реакции $^{18}\text{O}(35 \text{ А·МэВ}) + ^9\text{Ве}$ (рис. 12) [31].

Выходы изотопов в реакциях срыва нуклонов с большими отрицательными значениями Q_{gg} хорошо описываются простой экспоненциальной аппроксимацией в рамках Q_{gg} -систематики (рис. 13). Через экспериментальные точки, относящиеся к нейтроноизбыточным изотопам ^6He и ^8He , проведена экспонента, для изотопов с $2 \leq Z \leq 10$ аппроксимация получена сдвигом экспоненты для изотопов гелия. Изменения механизма периферических реакций не были обнаружены при промежуточных энергиях в сравнении с реакциями при низких энергиях.

В реакциях между ^{18}O (35 А·МэВ), $^9\text{Ве}$ (легкая мишень) и ^{181}Ta (тяжелая мишень) измерялись инклюзивные выходы экзотических изотопов ^9Li , ^{11}Li , ^{11}Be , ^{12}Be и ^{14}Be , которые могут использоваться как вторичные радиоактивные пучки ядер, имеющих структуру гало (табл. 4).

Таблица 4.

Вторичные пучки, с ⁻¹				
^9Li	^{11}Li	^{11}Be	^{12}Be	^{14}Be
$5 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^2$

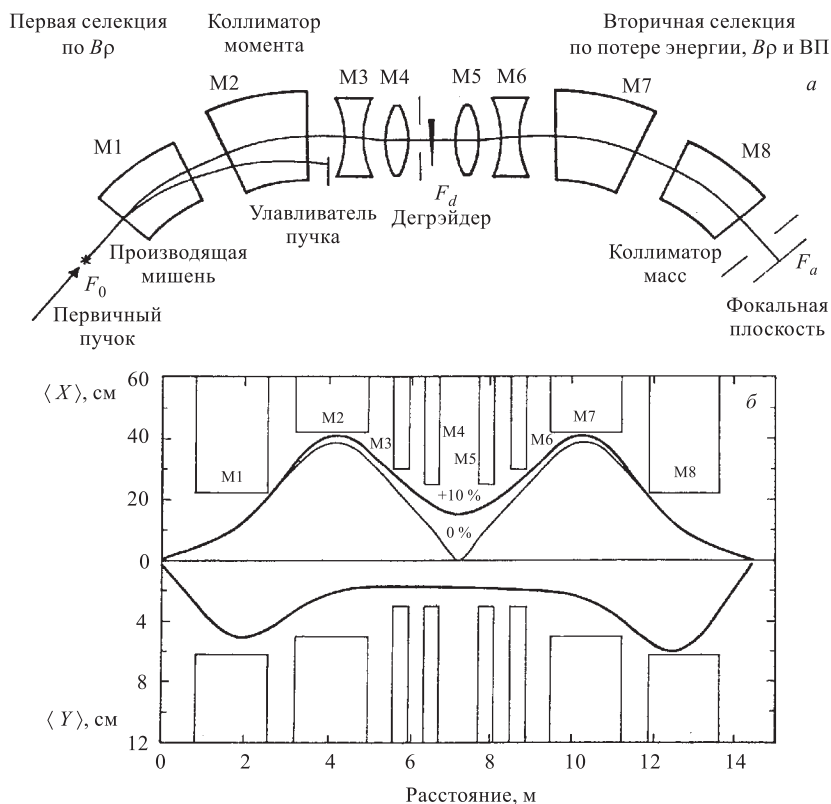


Рис. 11. Схема сепаратора COMBAS

В реакциях $^{22}\text{Ne} + ^9\text{Be}$ (^{181}Ta) при энергиях вблизи границы Ферми (45 А·МэВ) изучалось образование изотопов с массами $4 \leq A \leq 30$ и атомными номерами $2 \leq Z \leq 13$ (рис. 13). В этих экспериментах не было найдено указаний на какие-либо серьезные изменения механизма реакций по сравнению с реакциями, протекающими в диапазоне меньших энергий (менее 20 А·МэВ) [32].

Показано, что в реакциях легкого иона (^{22}Ne), как с легкой (^9Be), так и с тяжелой мишенью (^{181}Ta), в районе границы Ферми преобладают реакции срыва-подхвата и обмена нуклонами. Для изотопов, близких к линии стабильности, зарегистрирован заметный вклад от процессов девозбуждения. Экспоненциальная аппроксимация распределений изотопов с использованием Q_{gg} -систематики подтверждает бинарный характер реакций и позволяет корректно предсказывать выходы неизвестных изотопов на границе стабильности.

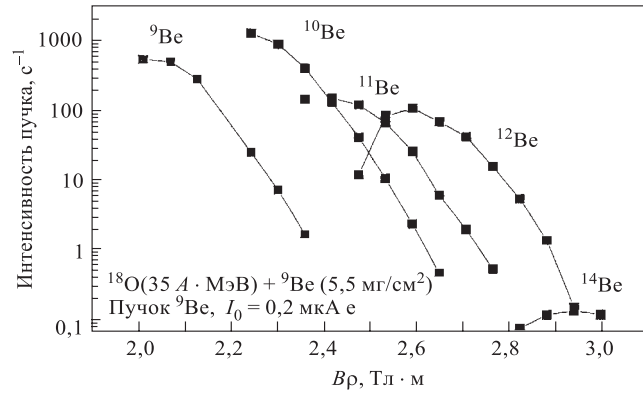


Рис. 12. Выходы тяжелых изотопов Be в реакции $^{18}\text{O}(35 \text{ А} \cdot \text{МэВ}) + ^9\text{Be}$

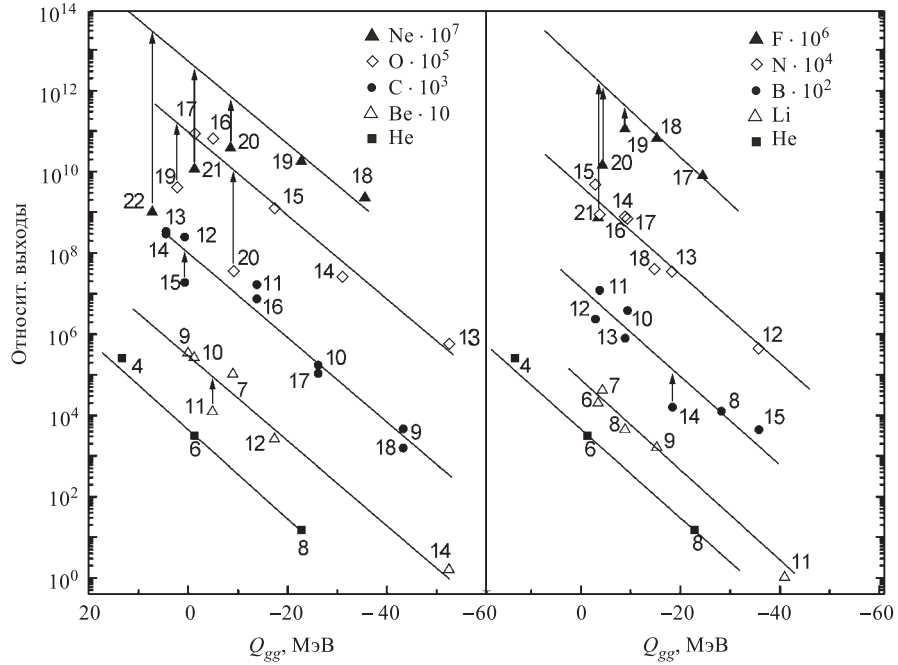


Рис. 13. Выходы изотопов с $2 \leq Z \leq 10$ в зависимости от величин Q_{gg} . Стрелки около точек, соответствующих изотопам O, F и Ne, указывают понижение выходов. Цифры около точек обозначают множители для экспериментальных выходов

Планируются исследования выходов и свойств тяжелых изотопов кислорода в реакциях ^{36}S , $^{40}\text{Ar}(20 \div 60 \text{ A} \cdot \text{MэВ}) + ^9\text{Be}$, Та. Для этих целей будет использован трековый детектор на базе многослойной пропорциональной камеры.

РЕАКЦИИ С ПУЧКАМИ РАДИОАКТИВНЫХ ИОНОВ. СЕПАРАТОР АКУЛИНА

Для реализации физической программы исследований реакций с радиоактивными пучками был разработан и создан сепаратор АКУЛИНА [33].

Вторичные пучки ионов $^{6,8}\text{He}$, $^{9,11}\text{Li}$, $^{12,14}\text{Be}$, ^8B с энергиями 25–35 МэВ/А производились при помощи первичных пучков ионов ^7Li , ^{11}B , ^{13}C , ^{15}N и ^{18}O . Получены интенсивности $1,5 \cdot 10^6$ и $7 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$, соответственно, для пучков ^6He и ^8He с энергией 25 МэВ/А при облучении мишеней с площадью 0,3–0,5 см². Вторичный пучок имел разброс по энергии на уровне 5% (FWHM).

В настоящее время установка АКУЛИНА полностью укомплектована реакционными камерами, системами диагностики вторичных пучков, криогенной газовой мишенью и детектирующей системой для выполнения экспериментов с радиоактивными пучками.

Многопроволочные ионизационные камеры, установленные в пучке, обеспечивают позиционное разрешение 1,5 мм и угловое разрешение 0,15° в режиме детектирования каждой налетающей частицы вторичного пучка. Детектирующая система установки схематически показана на рис. 14.

Выполнены измерения угловых распределений продуктов реакций передачи и упругого рассеяния для системы $^6\text{He} + p$ в обратной кинематике с радиоактивным пучком ^6He . Это редко встречающийся случай процесса передачи, в котором участвуют ядра, содержащие и не содержащие нейтронное гало. Используя соответствующие данные для системы $^6\text{Li} + p$, можно сравнить влияние структурных параметров на изучаемый процесс. Угловые распределения продуктов упругого рассеяния и продуктов передачи $1n$ и $2n$ были получены при измерениях энергий совпадающих продуктов реакции [34].

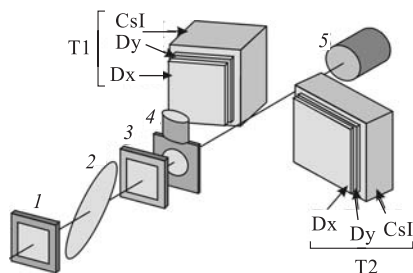


Рис. 14. Детектирующая система. Каждый телескоп T1 и T2 состоит из 400-стрипового Si-детектора Dx и Dy и толстого кристалла CsI. По ходу пучка установлены: мишень (4), две многопроволочные пропорциональные камеры (1, 3) и пластиковые сцинтилляционные детекторы (2, 5)

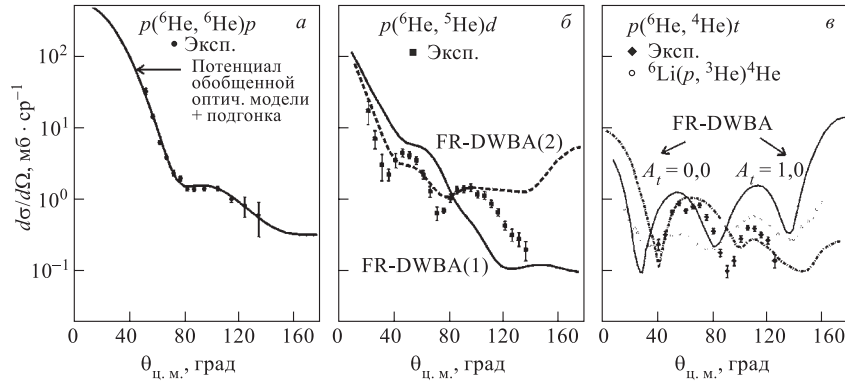


Рис. 15. Угловые распределения продуктов реакций передачи и упругого рассеяния для системы ${}^6\text{He} + p$: а) упругий канал; б) ${}^5\text{He} + d$ -канал; в) $\alpha + t$ -канал

Обобщенные результаты трех серий экспериментов представлены на рис. 15. Указанные на рисунке погрешности включают в себя статистические погрешности и неточности в определении трансмиссии установки.

Проявления структуры ядра ${}^6\text{He}$ изучались в процессах упругого рассеяния и передачи ядер ${}^6\text{He}$ с энергией 150 МэВ на ядрах водорода и гелия. Впервые было измерено дифференциальное сечение упругого рассеяния ${}^6\text{He}$ на ${}^4\text{He}$ в диапазоне углов $25 \div 160^\circ$ в с. ц. м. [35]. Подъем сечения, наблюдавшийся при рассеянии назад, был интерпретирован в соответствии с волновыми функциями ${}^6\text{He}$, предсказываемыми существующими теориями. Эти исследования явились первым экспериментальным подтверждением «динейтронной» конфигурации нейтронного гало в ${}^6\text{He}$, предсказанной теорией.

Впервые были измерены сечения упругого рассеяния и реакций передачи одного и двух нейтронов в системе ${}^6\text{He} + p$ при энергии взаимодействия 150 МэВ в диапазоне углов $40 \div 140^\circ$ в с. ц. м. Результаты анализировались в рамках теории DWBA. Выходной канал $\alpha + t$ представляет особый интерес, поскольку оба процесса — передача $2n$ и t — вносят вклад в полное сечение. Полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что амплитуда двухритонного состояния в ${}^6\text{He}$ пренебрежимо мала. Анализ показывает высокую величину (близкую к единице) спектроскопического фактора «динейтронной» конфигурации нейтронного гало в ${}^6\text{He}$.

Значительный интерес представляет изучение реакций передач между налетающими частицами ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ и ядрами-мишенями — водородом и гелием [36]. В случае ядра-мишени ${}^4\text{He}$ могла происходить передача двух или четырех нейтронов для ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$, т. е. обменный процесс, который можно было бы наблюдать в с. ц. м. как упругое рассеяние в обратном направлении. Пере-

дача двух нейтронов между ядрами ${}^6\text{He}$ и ${}^1\text{H}$ могла бы быть хорошим тестом для теоретических предсказаний, сделанных на базе трехтельной модели ${}^6\text{He}$.

Успешно завершилась серия экспериментов, направленная на обнаружение резонанса ${}^5\text{H}$ (основного состояния) [37]. Резонанс ${}^5\text{H}$ возбуждался в реакции ${}^6\text{He} + p \rightarrow {}^5\text{H} + 2p$. Условия двухчастичной кинематики в этой реакции реализуются благодаря виртуальному взаимодействию двух протонов. Резонансное состояние, которое находится примерно на 2 МэВ выше порога распада $t + n + n$, было обнаружено в спектре полной энергии коррелированных протонов, испускаемых в выходном канале реакции. Ширина этого пика, в основном, определяется аппаратным разрешением. Реальная ширина резонанса ${}^5\text{H}$ оценивается как 1/10 часть от ширины пика, показанного на рис. 16. Распределение остальных событий вне резонанса хорошо объясняется в терминах фазового объема, описывающего реальную детекторную сборку и обрезающего спектр с правой стороны, что также показано на рис. 16.

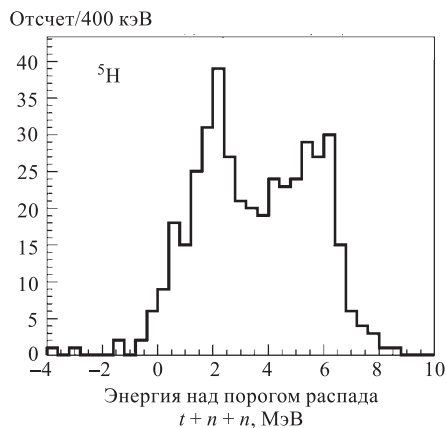


Рис. 16. Энергетический спектр пространственно-коррелированных двухпротонных пар, детектируемых в реакции ${}^6\text{He} + p \rightarrow {}^3\text{H} + 2p + n + n$ при энергии ${}^6\text{He}$, составляющей 36 А·МэВ

Завершены эксперименты по изучению резонансных состояний в ${}^7\text{He}$, заселяемых при передаче одного нейтрона на ${}^6\text{He}$ от дейтериевой мишени. В настоящее время данные анализируются с целью извлечь информацию о структуре резонанса $p3/2$ в основном состоянии ${}^7\text{He}$ и, возможно, о другом резонансе $p1/2$.

В серии экспериментов были исследованы прямые реакции, протекающие между ${}^8\text{He}$ и водородом при энергии 26 А·МэВ [38]. Сечения упругого рассеяния, передачи одного и двух нейтронов на основное состояние ${}^6\text{He}$, а также передача двух нейтронов на 2^+ -состояние ${}^6\text{He}$ были измерены в диапазонах углов $35 \div 142^\circ$, $33 \div 143^\circ$, $15 \div 135^\circ$ и $13 \div 138^\circ$ (рис. 17).

В отличие от других слабосвязанных ядер, упругое рассеяние ${}^8\text{He}$ удовлетворительно описывается в рамках глобальной оптической модели без какой-либо подгонки. Данные, полученные для реакций передачи, были проанализированы методом искаженных волн DWBA. Тестированию подверглись спектроскопические амплитуды для ${}^7\text{He}(3/2^-) + n^-$, ${}^6\text{He}(0^+) + 2n^-$ и ${}^6\text{He}(2^+) + 2n^-$ -кластеризации ${}^8\text{He}$, предсказанные трансляционной инвариантной оболочеч-

ной моделью (TISM). При этом были найдены потенциалы оптической модели для различных выходных каналов. В случае передачи двух нейтронов,

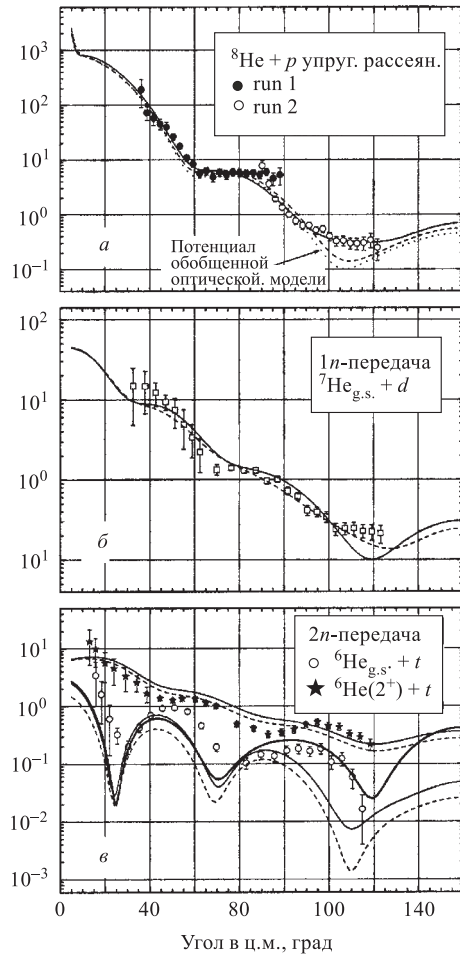


Рис. 17. Сечения для упругого рассеяния ${}^8\text{He}$ (а), передачи $1n$, $2n$ на основное состояние ${}^6\text{He}$ (б), передачи $2n$ на состояние 2^+ в ${}^6\text{He}$ (в)

рассеяния «в задние углы» получены низкие значения граничных сечений, можно утверждать, что одноразовая передача $4n$ не наблюдается. Вычисления сечений реакций, выполненные методом искаженных волн, предсказывают еще

приводящей к состоянию ${}^6\text{He}(2^+)$, полученные данные указывают на большой среднеквадратичный (rms) радиус для двухтельной волновой функции ${}^8\text{He} = {}^6\text{He}(2^+) + 2n$, который превосходит соответствующую величину, предсказываемую COSMA-моделью. Напротив, вычисления, выполненные при минимальном числе свободных параметров и со спектроскопическими амплитудами, извлеченными при помощи TISM, занижают величину сечения выходного канала ${}^6\text{He}(0^+) + t$ по сравнению с экспериментом. Имеющиеся данные указывают на высокую вероятность ${}^5\text{H} + t$ -кластеризации в ${}^8\text{He}$.

В другой серии экспериментов измерялись угловые распределения ионов ${}^8\text{He}$ с энергией 26 А·МэВ, упруго рассеянных на газообразной гелиевой мишени в диапазоне углов в системе центра масс $20 \div 70^\circ$ [39]. Данные по рассеянию в передние углы анализировались при помощи микроскопической и феноменологической оптических моделей. Значительная величина полного сечения реакции, полученная при анализе, указывает на аномалию в структуре ${}^8\text{He}$.

Для диапазона углов в системе центра масс $130 \div 165^\circ$ были получены граничные сечения от 5 до $0,8 \text{ мкб} \cdot \text{ср}^{-1}$. Поскольку для рассеяния

более низкую вероятность этого процесса. Эти вычисления показывают, что двухступенчатая передача двух нейтронов более вероятна, чем одноступенчатая передача четырех нейтронов.

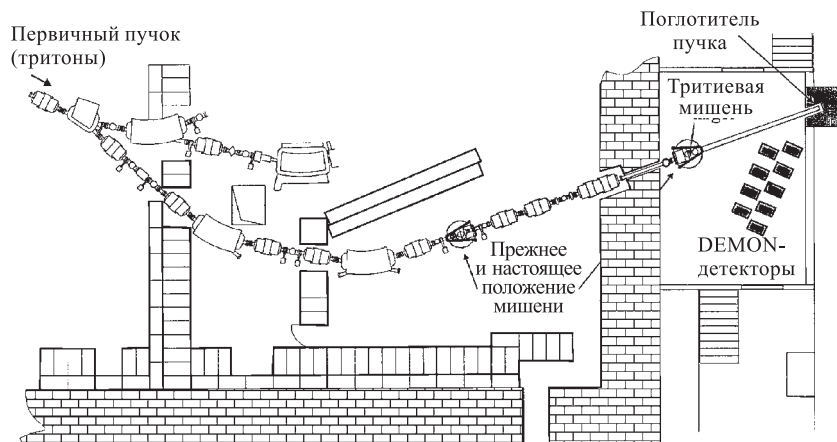


Рис. 18. Сепаратор АКУЛИНА после модернизации для экспериментов с криогенной тритиевой мишенью

При реконструкции сепаратора АКУЛИНА в 2000 г. линия транспорта пучка была продолжена за двухметровую бетонную стену зала ускорителя к новому экспериментальному павильону, где была смонтирована реакционная камера с криогенной тритиевой мишенью (рис. 18). Система мониторинга пучка и детекторы были оптимизированы для условий эксперимента по изучению ${}^5\text{H}$ в реакции $t + t$ при энергии пучка тритонов 51 МэВ. В реакционной камере были смонтированы усовершенствованные телескопы для детектирования продуктов реакций. Для регистрации нейтронов установлены модули детектора DEMON.

Результаты, накопленные на установке АКУЛИНА, будут применяться для получения пучков радиоактивных ионов на ускорителе У-400М.

ДИНАМИКА НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для изучения характеристик ядерных реакций со стабильными и радиоактивными пучками, а также для изучения экзотических ядер, образующихся в реакциях с пучками радиоактивных ионов, в сотрудничестве с ЛЯП ОИЯИ, LAMPF (США)–IPN (Чехия)–PI (Армения) на пучке циклотрона У-400М был создан спектрометр MULTI [40]. Спектрометр (рис. 19) состоит из многослойных сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов, позиционно-

чувствительных пропорциональных камер и ВГО-сцинтилляционных годоскопов [41]. Спектрометр обладает высоким временным, позиционным и энергетическим разрешением и способен регистрировать характеристики одновременно нескольких частиц. Благодаря этим свойствам могут выполняться сложные корреляционные эксперименты по изучению реакций с экзотическими протонно-обогащенными ядрами ${}^8\text{B}$, ${}^{10}\text{Ne}$, ${}^{20}\text{Na}$ и др.

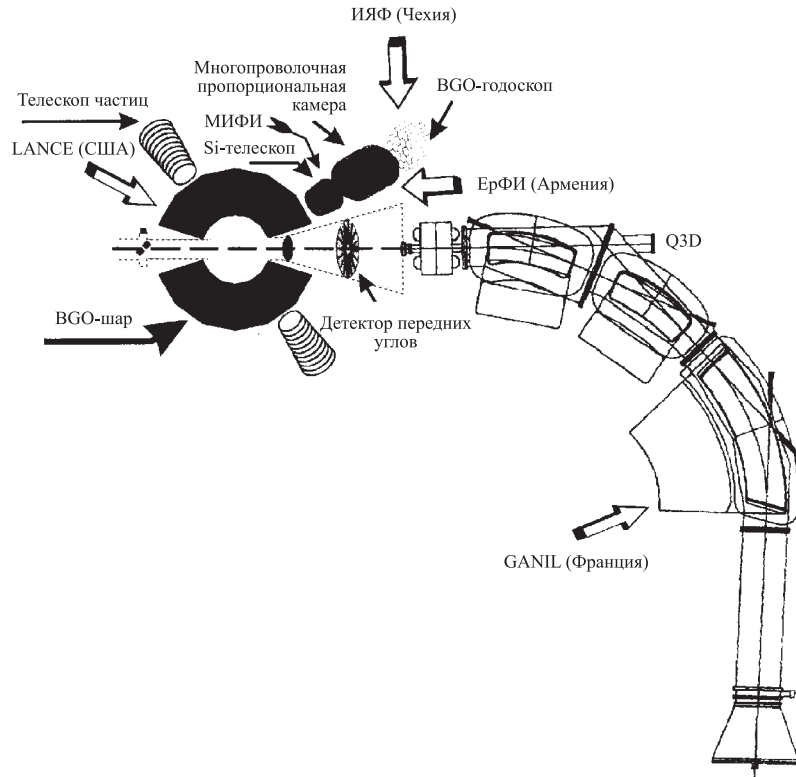


Рис. 19. Схема спектрометра MULTI

На установке MULTI были проведены первые эксперименты по изучению протонного гало в ядре ${}^8\text{B}$. В реакции ${}^{14}\text{N}(40 \text{ МэВ}/n)+{}^{181}\text{Ta}$ с помощью сферического ВГО-спектрометра получены новые данные о выходах высоко-возбужденных фрагментов и о подбарьерной генерации π -мезонов [42].

В совместных с GANIL экспериментах на спектрометре MULTI с использованием пучков ${}^{36}\text{S}$ и ${}^{48}\text{Ca}$ были измерены массы и деформации более чем 20 ядер, расположенных между нейтронными оболочками $N = 20$ и $N = 28$

[43, 44]. Получены данные о ядерной нестабильности ^{28}O . Измерены периоды β -распада ядер $^{27,29}\text{F}$ и ^{30}Ne .

В рамках проекта MULTI в 2000 г. был модернизирован канал транспорта пучка ускорителя У-400М и на его основе создан Q4DQ-спектрометр (рис. 20).

В реакции $^7\text{Li} + \text{Xe}$ был получен пучок ядер ^6He с интенсивностью $10^5 \cdot \text{c}^{-1}$ (при интенсивности пучка ^7Li , равной 1 мкА). Достигнута очистка от других продуктов ядерных реакций 98%. С использованием спектрометра Q4DQ на вторичных пучках ^6He были проведены эксперименты по измерению энергетической зависимости сечения деления составного ядра ^{215}At , образующегося в реакции $^6\text{He} + ^{209}\text{Bi}$. Была также измерена функция возбуждения для канала распада составного ядра с испусканием 4 нейтронов $^6\text{He}(^{209}\text{Bi}, 4n)^{211}\text{At}$. На рис. 21 представлены функции возбуждения канала деления составного ядра ^{215}At и испарения 4 нейтронов, измеренные в этих экспериментах.

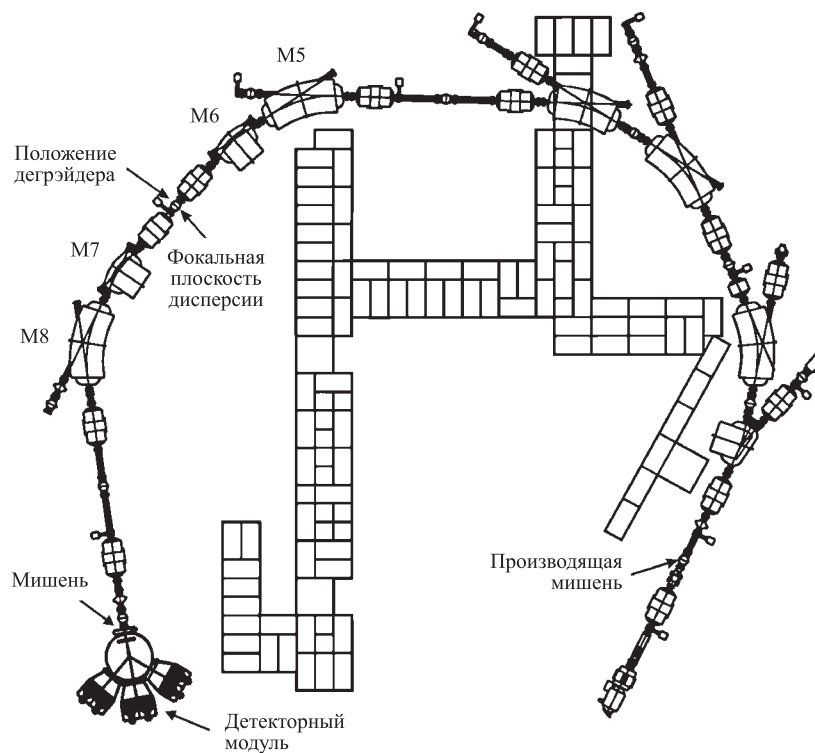


Рис. 20. Q4DQ-спектрометр для получения вторичных пучков

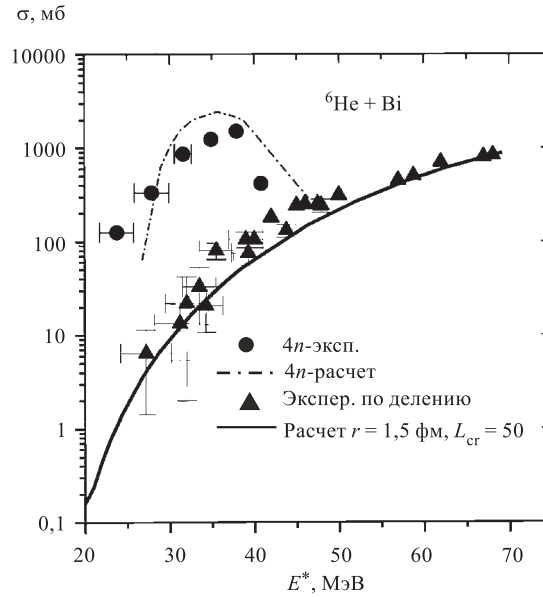


Рис. 21. Функции возбуждения реакций $^{209}\text{Bi}(^6\text{He}, f)$, $^{209}\text{Bi}(^6\text{He}, 4n)^{211}\text{At}$, измеренные на Q4DQ-спектрометре, и результаты расчетов

Полученные результаты для пучка ^6He сравнивались с аналогичными результатами для каналов слияния и деления с ионами ^4He , изученными в тех же экспериментах. Измерения проводились в широком диапазоне энергии бомбардирующих частиц $20 \leq E_b(^6\text{He}) \leq 170$ МэВ. Наблюдалось значительное увеличение сечения деления во всей области энергий для пучка ^6He по сравнению с ^4He . Полученные результаты сравнивались с расчетами, основанными на статистической модели с использованием программы ALICE-MP, в рамках которой варьировались параметры радиуса r_0 и критических угловых моментов L . С использованием этого же метода проводился анализ данных по функциям возбуждения в реакции $^4\text{He} + ^{209}\text{Bi}$, для которой были получены значения параметров $r_0 = 1,29$ фм и $L_{\text{cr}} = 35$. Для получения согласия с экспериментальными данными в реакции $^{209}\text{Bi} + ^6\text{He}$ необходимо было увеличить значения радиусов $r_0 = 1,5$ фм и $L_{\text{cr}} = 50-60$. Такое изменение параметров при переходе к ^6He можно объяснить влиянием других каналов реакции на процесс слияния.

Изучение структуры нейтронообогащенных ядер ^{7-10}He , $^{10,11}\text{Li}$, $^{13,14}\text{Be}$, ^{16}B , включающее измерение массы и структуры уровней, проводилось в сотрудничестве с РНЦ КИ (Россия), НМИ (Германия) на ускорителях ЛЯР и НМИ. В этих экспериментах была измерена деформация и гамма-переходы ядер в районе нейтронной оболочки $N = 20$ ($^{31,32,33}\text{Mg}$, ^{34}Si , $^{33,34}\text{Al}$) [45]

и обнаружена сильная деформация ($\beta \approx 0,3$) этих ядер. Полученные данные исключительно важны для понимания кластерной структуры, исследований нейтронного гало и исследований стабильности нейтронообогащенных легких ядер [46].

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В лазерной группе были проведены измерения сверхтонкого расщепления оптических линий в атомных спектрах изотопов Eu с $A = 151 \div 155$ [47]. Использовался метод резонансной лазерной флуоресценции в параллельном пучке атомов Eu. Из проведенных измерений определены константы сверхтонкого расщепления и получены значения магнитного дипольного и электрического квадрупольного моментов, которые позволяют судить о нуклонных конфигурациях и о квадрупольной деформации указанных изотопов Eu.

В оптических спектрах изотопов Eu наблюдалась сверхтонкая магнитная аномалия — отклонение отношений констант сверхтонкого расщепления от отношений магнитных моментов для сравниваемых изотопов. Наибольшее отклонение ($\sim 5\%$) наблюдалось для пары изотопов ^{151}Eu и ^{152}Eu , что указывает на сильное изменение нуклонной структуры при переходе от сферических ядер (^{151}Eu) к деформированным (^{152}Eu).

При помощи методов лазерной спектроскопии высокого разрешения были изучены изотопные сдвиги оптических переходов в изотопах Ti с массами $46 \div 50$. Впервые были определены разницы зарядовых радиусов ядер, располагающихся между замкнутыми оболочками $20 \leq Z, N \leq 28$. Сравнение зависимостей зарядовых радиусов от числа нейтронов было выполнено для изотопов Ti и Ca. Было установлено, что в противоположность Ca, где при $N = 24$ наблюдается излом зависимости, в случае изотопов Ti зарядовые радиусы плавно возрастают при убывании массового числа [48].

Методами резонансной флуоресценции были измерены отношения магнитных дипольных моментов для пар изотопов лантанидов и актинидов. Получены новые данные о пространственном распределении электрических токов. Среди изученных изотопов наибольшее различие отношений магнитных дипольных моментов наблюдалось для пары ^{233}U – ^{235}U ($\approx 1\%$). Подготовлена новая установка для «on-line»-экспериментов с использованием лазерного излучения.

ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Надежная работа ускорителей ЛЯР являлась неременным условием успешного выполнения программы физических экспериментов и развития новых методик.

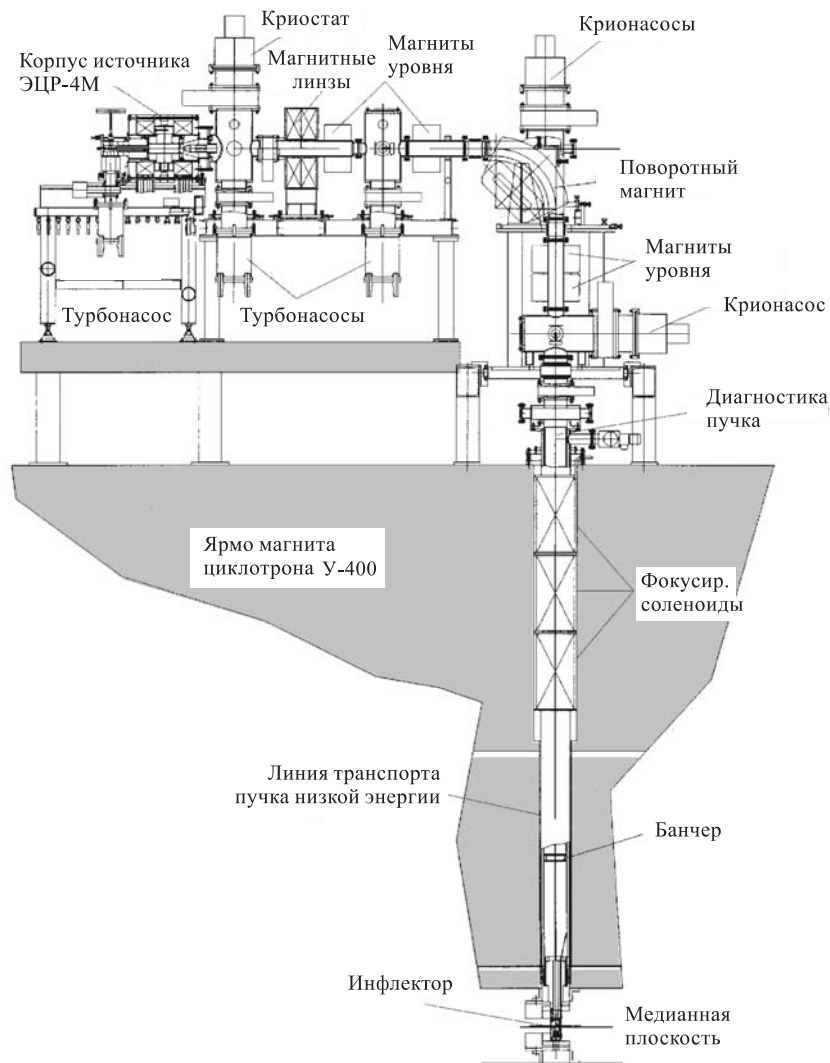


Рис. 22. Схема инъекции пучка ионов из источника ЭЦР-4М в циклотрон У-400

В настоящее время циклотроны У-400 и У-400М оснащены ЭЦР-источниками ионов DECRIS-14-2 и ECR4M, работающими на частоте 14 ГГц [49]. Эти источники эксплуатируются в течение трех лет, и благодаря им был достигнут существенный прогресс в экспериментах по синтезу тяжелых ядер, получении вторичных пучков и прикладных исследованиях.

Получение пучков ионов ^{48}Ca является, по-видимому, ключевой проблемой синтеза сверхтяжелых ядер. Было необходимо получить максимальные интенсивности пучков при минимальном расходе этого редкого и исключительно дорогого изотопа. Для решения этой задачи в 1995–1997 гг. на циклотронах У-400 и У-400М были установлены источники ионов ЭЦР-типа и системы аксиальной инжекции (рис. 22).

Наиболее стабильные и высокоинтенсивные пучки ионов были получены при использовании металлического кальция. Из $1,4 \cdot 10^{15}$ атомов Са, введенных в источник, получается около $6 \cdot 10^{13}$ ионов $^{48}\text{Ca}^{5+}$ из источника ECR4M. В результате при таком режиме работы источника удается обеспечить около 2500 часов облучения мишени, используя 1 г ^{48}Ca . ЭЦР-источник на циклотроне У-400 обеспечил увеличение эффективности использования рабочего вещества примерно в 100 раз по сравнению с источниками других типов [50].

Ионы газов He, N₂, O₂ и Ag успешно производятся источником DECRIS-14-2 и ускоряются на циклотроне У-400М. Этот источник показал высокую производительность, особенно для ионов средней зарядности (например, 600 мкА ионов Ag⁸⁺), а также надежную работу в длительных экспериментах.

Благодаря разработке специальной микропечи для испарения твердых веществ с максимальной температурой до 900 °С был достигнут существенный прогресс в получении ионов металлов. Эта микропечь в комбинации со специальным танталовым экраном позволила получать пучки ионов $^7\text{Li}^{2+}$ и $^{26}\text{Mg}^{3+}$ при токах до 200 мкА.

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Для получения на ускорительном комплексе тяжелых ионов У-400М + У-400 пучков легких радиоактивных ионов, таких как $^{6,8}\text{He}$, и пучков осколков деления, получаемых в реакциях фотоделения, на микротроне МТ-25 разработан и успешно реализуется проект DRIBs [51] (рис. 23).

Работы планируется разделить на две стадии, с тем чтобы после завершения первого этапа можно было приступить к экспериментам с радиоактивными пучками и параллельно продолжить работы по дальнейшему развитию всего комплекса.

1 стадия (2000–2001 гг.)

а) Получение радиоактивных пучков легких изотопов с помощью ускорителя У-400М, их сепарация и транспорт пучков низкой энергии в зал У-400, инжекция, ускорение, вывод и транспортировка радиоактивных пучков к физическим установкам. Запуск ускорительного комплекса будет начат с радиоактивными пучками ионов ^6He (13 МэВ/А) и ^8He (8 МэВ/А).

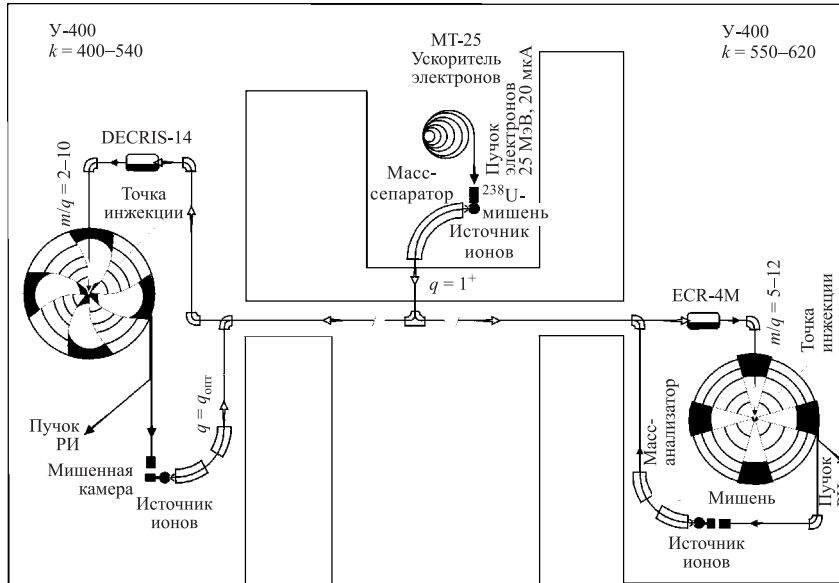


Рис. 23. Концепция получения радиоактивных пучков в ЛЯР

б) Получение низкоэнергичных пучков осколков деления ^{238}U в зале микротрона МТ-25.

в) Техническое проектирование зданий и установок, необходимых для получения низкоэнергичных пучков осколков деления и их ускорения на циклотроне У-400.

Сравнительные параметры пучков ионов He и ^{11}B приведены в табл. 5.

К концу 2000 г. были выполнены исследования и разработки большинства систем: блока производящей мишени, сепаратора ионов низкой энергии, каналов пучков, вакуумной системы, систем управления и диагностики. Закончено изготовление и начаты испытания ЭЦР-источника радиоактивных ионов ^6He и ^8He с рабочей частотой 2,45 ГГц.

Для полномасштабного моделирования условий получения легких радиоактивных изотопов мишени из бериллия (550 мг/см^2) облучались ионами лития при энергии $34 \text{ А} \cdot \text{МэВ}$ [52]. При температуре 1700 К практически 100% ядер ^6He улетучивались из мишени, тормозились в сборнике из карбида титана и затем детектировались в вакуумной камере. В специальных экспериментах с ^8He было установлено, что время извлечения изотопов гелия из блока производящей мишени составляло 50–100 мс. Были измерены энергетические, угловые распределения и абсолютные выходы ^6He из толстой бериллиевой мишени, бомбардируемой ионами ^7Li , ^{11}B и ^{15}N с энергиями 34, 32 и 48 А·МэВ соответственно.

Таблица 5.

		«On-line»	ISOL
		АКУЛИНА	DRIBs
${}^6\text{He}$ $T_{1/2} = 808 \text{ мс}$	RIB	$1,5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ 25 МэВ/ n	$9 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ $13 \div 8 \text{ МэВ}/n$
	Первичный пучок Мишень	${}^7\text{Li}$; 5 част. · мкА 32 МэВ/ n Be	${}^7\text{Li}$; 10 част. · мкА 32 МэВ/ n Be
${}^8\text{He}$ $T_{1/2} = 119 \text{ мс}$	RIB	$2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ 28 МэВ/ n	$3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ $6 \div 8 \text{ МэВ}/n$
	Первичный пучок Мишень	${}^{11}\text{B}$; 5 част. · мкА 34 МэВ/ n Be	${}^{11}\text{B}$; 10 част. · мкА 34 МэВ/ n Be
${}^{11}\text{Be}$ $T_{1/2} = 13,8 \text{ мс}$	RIB	$9 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ 36 МэВ/ n	$2 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ $4 \div 16 \text{ МэВ}/n$
	Первичный пучок Мишень	${}^{13}\text{C}$; 3 част. · мкА 42 МэВ/ n Be	${}^{13}\text{C}$; 10 част. · мкА 42 МэВ/ n Be

Физические эксперименты после завершения первого этапа проекта планируется начать в 2002 г.

II стадия (2001–2002 гг.)

- Получение пучков низкой энергии на ускорителе У-400М.
- Получение пучков ускоренных осколков деления на ускорителе У-400 и их транспортировка к физическим установкам.

Каналы транспорта пучков представлены схематически на рис. 23.

Для второй стадии проекта измерены выходы изотопов Хе с $A = 137 \div 143$ при фотоделении ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{238}\text{U}$ и ${}^{244}\text{Pu}$. Эксперименты проведены на тормозном излучении микротрона ЛЯР при энергии ускоренных электронов 25 МэВ. Вылетевшие из мишени осколки деления тормозились в аргоне и переносились по капилляру газовым потоком в криостат, где происходила конденсация ксенона. Идентификация массовых чисел изотопов Хе осуществлялась по их γ -спектрам и периодам полураспада. Получено распределение независимых выходов осколков Хе по их массовым числам. Параметры этого распределения — среднее массовое число 139, дисперсия распределения растет от 1,48 для ${}^{232}\text{Th}$ до 1,60 для ${}^{244}\text{Pu}$. Эти результаты указывают на перспективность получения нейтроноизбыточных изотопов Хе в реакции фотоделения для их последующего ускорения на циклотроне.

В рамках проекта DRIBs между существующими зданиями ЛЯР № 101 и 131 планируется создать лабораторию по изучению ядерных свойств и спектроскопии нейтроно- и протонобогащенных легких ядер и ядер средней

массы, которые могут получаться в прямых реакциях или в реакциях фрагментации.

Вторая стадия проекта — получение ускоренных осколков деления — должна быть реализована в 2002 г.

Исследовательские программы при реализации проекта DRIBs будут осуществляться при участии многих институтов, работающих с радиоактивными пучками как в области физики, так и в области технологии.

Более подробно полученные результаты описаны в научных отчетах ЛЯР за 1995–1996 [53], 1997–1998 [54] и 1999–2000 [55] гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оганесян Ю. Ц.* // ЯФ. 2000. Т. 63. С. 1391.
2. *Hofmann S., Münzenberg G.* // Rev. Mod. Phys. 2000. V. 72. P. 733.
3. *Yeremin A. V. et al.* // JINR Rapid Commun. 1998. № 6[92]. P. 21.
4. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Eur. Phys. J. A. 1999. V. 5. P. 63.
5. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 3154.
6. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2000. V. 62. P. 041604-1.
7. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Nature. 1999. V. 400. P. 242.
8. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2000. V. 63. P. 011301-1.
9. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Nucl. Phys. A. 2001. V. 682. P. 108c.
10. *Tuerler A. et al.* // J. Alloys Comp. 1998. V. 87. P. 271.
11. *Zvara I. et al.* // Radiochim. Acta. 1998. V. 81. P. 179.
12. *Yakushev A. B. et al.* // 1st Intern. Conf. Chem. and Phys. of the Transactinide Elements, Seeheim, Germany. Sept. 1999, Extended Abstracts. P-M-17.
13. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Proc. of the Fourth Intern. Conf. on Dynamical Aspects of Nuclear Fission, Casta-Papiernicka, Slovak Republic, Oct. 19–23, 1998. Singapore, 2000. P. 51.
14. *Yakushev A. B. et al.* // NRC-5 Ext. Abstr., Pontresina, Switzerland, Sept. 3–8, 2000. P. 233.
15. *Aleksandrov A. A. et al.* Preprint FZR-99. Rossendorf, 1995.
16. *Тер-Акопян Г. М. и др.* // Изв. РАН, сер. физ. 1996. Т. 60. С. 162.
17. *Третьякова С. П. и др.* // Изв. РАН, сер. физ. 1996. Т. 60. С. 87.
18. *Rudolf G. et al.* // Proc. of the 3rd Intern. Conf. «Dynamical Aspects of Nuclear Fission», Casta-Papiernicka, Slovak Republic, Aug. 30–Sept. 4, 1996. Dubna, 1997. P. 94.
19. *Kozulin E. et al.* // Proc. of the XVI Nuclear Physics Division Conf., European Physics Society, Padova, 1998. P. 18.
20. *Itkis M. et al.* Fusion-Fission of Weakly-Excited Neutron-Rich Nuclei $^{273}106$, $^{271}108$ and $^{270}106$ Produced in Reactions with ^{24}Mg and ^{16}O // Proc. of the XVI Nuclear Physics Division Conf., European Physics Society, Padova, 1998. P. 15.
21. *Itkis M. G. et al.* Fission of Heavy and Superheavy Nuclei at Low Excitation Energies // Nucl. Phys. A. 1999. V. 654. P. 870.

22. *Tretiakova S. P. et al.* // Proc. of the Intern. Conf. on Nuclear Physics, Dubna, April 21–24, 1999. Singapore, 1999. P. 151–155.
23. *Itkis M. G. et al.* // Proc. of the Second Intern. Conf. «Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei», St. Andrews, Scotland, 28 June–July 3, 1999. Singapore, 2000. P. 268.
24. *Itkis M. G. et al.* // Proc. of the Intern. Conf. on Experimental Nuclear Physics in Europe (ENPE-99), Facing the Next Millenium, Seville, Spain, June 21–26, 1999. AIP 495. N.Y., 1999. P. 153.
25. *Ninov V. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 1104.
26. *Itkis M. G.* // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Nucleus–Nucleus Collisions NN2000, Strasbourg, France, July 3–7, 2000. Singapore, 2000. P. 41.
27. *Andreyev A. N. et al.* // Nucl. Phys. A. 1995. V. 583. P. 153c.
28. *Sagaidak R. N. et al.* // J. of Phys. G. 1998. V. 24. P. 611.
29. *Yeremin A. V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 126. P. 329.
30. *Артюх А. Г. и др.* // Изв. РАН, сер. физ. 2001. Т. 65. С. 6.
31. *Артюх А. Г. и др.* // Изв. РАН, сер. физ. 2001. Т. 65. С. 9.
32. *Artukh A. G. et al.* JINR Preprint P7-2000-189. Dubna, 2000.
33. *Rodin A. M. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 126. P. 236.
34. *Wolski R. et al.* JINR Preprint E15-98-284. Dubna, 1998.
35. *Ter-Akopian G. M. et al.* // Phys. Lett. B. 1998. V. 426. P. 251.
36. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Phys. Rev. Lett. B. 1999. V. 82. P. 4996.
37. *Ter-Akopian G. M. et al.* // Proc of the Inten. Conf. on Nuclear Structure and Related Topics, Dubna, June 2000.
38. *Wolski R. et al.* // Submitted to «Nucl. Phys. A».
39. *Oganessian Yu. Ts. et al.* // Submitted to «Eur. Phys. J».
40. *Соболев Ю. Г. и др.* // ПТЭ. 1997. Т. 5. С. 6.
41. *Асатурян Р. А. и др.* // ПТЭ. 1999. Т. 42. С. 342.
42. *Alexakhin V. Yu. et al.* // Acta Phys. Slovaca. 1996. V. 46. P. 639.
43. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* // Proc. of the VI Intern. School-Seminar, Dubna, Sept. 1997. Singapore. P. 167.
44. *Reed A. T. et al.* // Phys. Rev. C. 1999. V. 60. P. 024311.
45. *Sarazin F. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 5062.
46. *Kalpakchieva R. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2000. V. 7. P. 451.
47. *Gangrsky Yu. P. et al.* // Eur. Phys. J. D. 2000. V. 11. P. 341.
48. *Гангрский Ю. П. и др.* // Изв. РАН, сер. физ. 2000. Т. 64. С. 899.
49. *Kutner V. B. et al.* // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71. P. 774.
50. *Kutner V. B. et al.* // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71. P. 960.
51. *Gulbekian G. G., Oganessian Yu. Ts.* // Proc. of the 49th Intern. Conf. on Nucl. Phys., Dubna, April 21–24, 1999. Singapore, 2000. P. 61.
52. *Bogdanov D. D. et al.* // Part. and Nucl., Lett. 2000. V. 5. P. 5
53. Flerov Laboratory of Nuclear Reactions. Scientific Report 1995–1996. Dubna, 1997.
54. Flerov Laboratory of Nuclear Reactions. Scientific Report 1997–1998. Dubna, 2001.
55. Flerov Laboratory of Nuclear Reactions. Scientific Report 1999–2001. Dubna, 2001.