

8. Экспериментальные исследования на циклотронах У-400 и У-400М

СПРАВКА: академик Юрий Цолакович Оганесян — выдающийся российский физик в области экспериментальной ядерной физики, физики ускорителей, прикладной ядерной физики.

Научная деятельность Ю.Ц.Оганесяна неразрывно связана с Лабораторией ядерных реакций ОИЯИ, в которой он прошел путь от младшего научного сотрудника до директора ЛЯР. Руководить лабораторией ему пришлось в наиболее трудные для ОИЯИ годы: с 1988 по 1997. Ю.Ц.Оганесян сумел сохранить не только замечательные традиции, заложенные Г.Н.Флёровым, и высокий научный потенциал, но и получить новые научные данные мирового уровня. Наиболее значимые его научные результаты связаны с физикой деления ядер тяжелыми ионами, разработкой метода холодного синтеза тяжелых ядер, синтезом сверхтяжелых элементов с атомными номерами от 110 до 118. По его инициативе были также развернуты работы по изучению экзотических изотопов легчайших элементов.

Все это сделало Ю.Ц.Оганесяна несомненным лидером коллектива ЛЯР и с 1997 года Ю.Ц.Оганесян занимает пост ее научного руководителя.

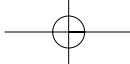
Международный авторитет Ю.Ц.Оганесяна способствует активному сотрудничеству ЛЯР с ведущими мировыми центрами ядерной физики. Под его председательством проходили все крупные международные конференции, организованные лабораторией.

Ю.Ц.Оганесян — лауреат Государственной премии СССР, премии им. И.В.Курчатова АН СССР, премии им. Г.Н.Флёрова, премии им. Лизы Майтнер и многочисленных премий ОИЯИ. В 1990 году Ю.Ц.Оганесян избирается членом-корреспондентом, а в 2003 году — академиком Российской академии наук.

8.1. Реакции холодного слияния. Синтез элементов 107–110

До 1973 года в опытах различных лабораторий с пучками очень тяжелых ионов — от Ag до Ge — не удавалось в реакциях полного слияния получить элементы с Z больше 84 (Po). Такие частицы вносят в составное ядро высокой делимости большую энергию возбуждения, что требует испарения не менее 4–5 нейтронов. В 1973 году Ю.Ц.Оганесян с сотрудниками предпринял проверку серьезности этого ограничения для очень тяжелых ионов и роли энергии возбуждения в высокочувствительных опытах по облучению ^{208}Pb и более легких изотопов Pb ионами Ag. В продуктах были зарегистрированы с заметным выходом короткоживущие изотопы Fm. Анализ показал, что при энергиях ионов вблизи кулоновского барьера, благодаря плотной упаковке дважды магического ^{208}Pb , энергия возбуждения составного ядра ^{248}Fm не превышает 20 МэВ и для его девозбуждения достаточно испарить 2–3 нейтрона. Это резко уменьшало вероятность мгновенного деления составного ядра и соответственно повышало сечение образования ядер — испарительных остатков, так как сечение слияния необходимо «умножить» на (всегда низкое) отношение вероятности испарения нейтрона к вероятности мгновенного деления для каждого испаряемого нейтрона.

При облучении ^{208}Pb ионами $^{48,49,50}\text{Ti}$ были получены новые изотопы элемента 104 с массовыми числами 255–258. Наблюдались реакции с испарением из составно-



го ядра одного, двух нейтронов и даже радиационный захват иона. Следовательно, именно энергия возбуждения составного ядра является решающим фактором для выхода новых ядер. Реакции синтеза тяжелых элементов с использованием в качестве мишеней ^{208}Pb , ^{209}Bi (и некоторых соседних нуклидов) и ускоренных ионов с массой 40 и выше получили название «реакции холодного слияния». Они сыграли важную роль в синтезе трансактиноидных элементов. Фактически все элементы с номерами от 106 до 112 впервые синтезированы в реакциях холодного слияния.

В ЛЯР в реакциях холодного слияния были синтезированы изотопы 106, 107 и 108-го элементов и проведены опыты по синтезу элементов 109 и 111. Использовались пучки вплоть до ^{64}Ni .¹ Опыты проводились на внутреннем пучке циклотрона У-400. Детектировалось или спонтанное деление короткоживущих нуклидов, или долгоживущие внучатые продукты из цепочек альфа-распадов.

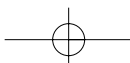
Группа Вилкинсона по трансуранам (см. выше) отметила большое значение метода холодного слияния, реализованного впервые в ЛЯР на примере изотопов элемента 106, для дальнейшего прогресса в открытии элементов 107–109. С начала 1980-х метод используется в ГСИ Дармштадт, где он-лайн масс-сепаратор SHIP на пучке ускорителя UNILAC позволял проследить длинные цепочки альфа-распадов материнских ядер; это давало надежную идентификацию вновь полученных элементов. Признан конкретный вклад Дубны в открытие элемента 108. Основная же заслуга принадлежит ГСИ Дармштадт, где в реакциях холодного слияния были синтезированы нуклиды с атомными номерами от 107 до 112.

Изучение путей и закономерностей холодного синтеза однозначно привело к выводу, что сферические сверхтяжелые ядра следует синтезировать с использованием ионов ^{48}Ca , а в качестве мишеней – тяжелых изотопов актиноидных элементов. В этом случае один из партнеров реакций обладает повышенным масс-дефектом, что снижает минимально достижимую энергию возбуждения составного ядра.

8.2. Электростатический сепаратор ВАСИЛИСА и проведенные на нем исследования

В начале 1980-х годов в ЛЯР приступили к созданию современного кинематического сепаратора на пучках тяжелых ионов. Он должен был использоваться в опытах по синтезу и изучению свойств радиоактивного распада новых, даже очень короткоживущих изотопов трансурановых элементов, по измерению сечений образования продуктов реакций полного слияния и по изучению образования и выживания высоковозбужденных тяжелых компаунд-ядер. Была выбрана схема трехступенчатой электростатической очистки исследуемых ядер – продуктов полного слияния. Они отделялись от частиц пучка и продуктов ядерных реакций других типов, являющихся нежелательным фоном. Части сепаратора были изготовлены в 1983–1985 годах в ОП ОИЯИ и на предприятиях Савёлова и Челябинска. В 1987 году установка ВАСИЛИСА начала использоваться в экспериментах на пучках ускорителя У-400. Ее схема представлена на рис. 4. Она включает устройство с вращающейся мишенью,

¹ Oganessian Yu. Ts., Hussonnois M., Demin A. G., Kharitonov Yu. P., Bruchertseifer H., Constantinescu O., Korotkin Yu. S., Tretyakova S. P., Utyonkov V. K., Shirokovsky I. V., Estevez J. Experimental studies of the formation and decay of isotopes with $Z = 104-105$ // Radiochim. Acta. 1984. V. 37. P. 113–120.



Главные узлы сепаратора ВАСИЛИСА для исследования тяжелых ядер

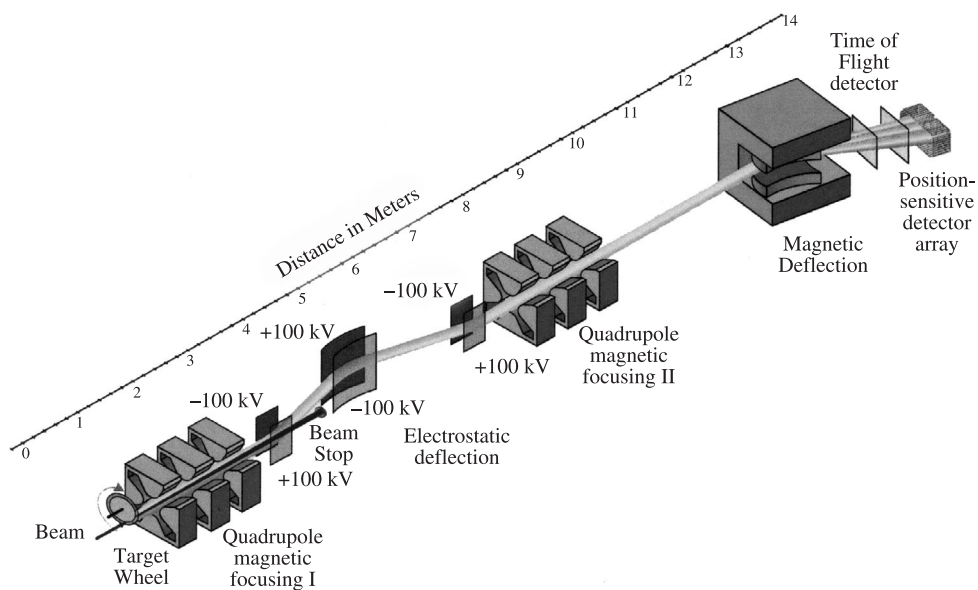
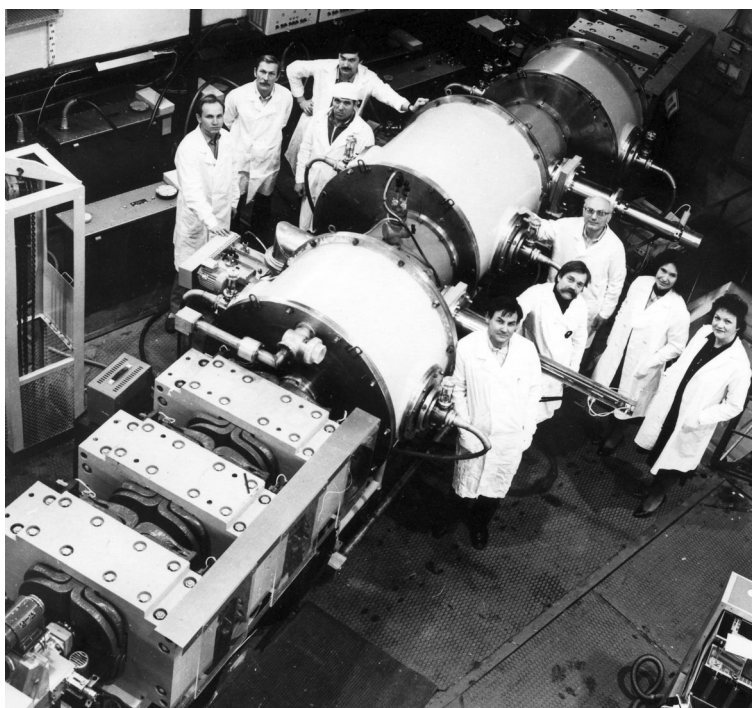


Рис. 4. Принципиальная схема сепаратора ВАСИЛИСА для изучения сверхтяжелых нуклидов

систему сепарации из трех электростатических конденсаторов, систему фокусировки из двух триплетов квадрупольных линз и приемное устройство с детекторами, регистрирующими ядра отдачи и продукты их радиоактивного распада.

Установка ВАСИЛИСА используется для изучения сечений образования и свойств радиоактивного распада ядер отдачи, образующихся в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами. Исследования проводятся в широких диапазонах масс-асимметрии во входном канале реакций ($0,07 \leq A_{\text{ион}}/A_{\text{миш}} \leq 0,3$) и энергий возбуждения ($20 \text{ МэВ} \leq E^* \leq 150 \text{ МэВ}$) компаунд-ядра. В 1997 году в фокальной плоскости сепаратора была установлена новая детектирующая система, состоящая из пяти многостриповых детекторов, образующих «колодец». Фокальный детектор, образующий дно «колодца», имеет позиционную чувствительность вдоль стрипов. Дипольный магнит, отклоняющий ядра отдачи на 37° , был установлен в 2001–2002 годах. Он улучшает очистку от фоновых продуктов ионов пучка, позволяет анализировать ядра отдачи по массе.

Сепаратор создавался для изучения реакций полного слияния с тяжелыми ионами массой $A \leq 50$, в основном $^{16,18}\text{O}$, $^{20,22}\text{Ne}$, $^{24,26}\text{Mg}$, ^{27}Al , ^{31}P , ^{35}Cl , ^{40}Ar и $^{40,44,48}\text{Ca}$. В некоторых экспериментах использовался и пучок ^{86}Kr . Интенсивность пучка на мишени сепаратора (10 мм в диаметре) была $(0,3–10,0) \cdot 10^{12}$ ионов в секунду при энергетическом разрешении 1–1,5%. При измерениях функций возбуждения энергия ионов могла изменяться с шагом 3–6 МэВ.

На сепараторе были получены новые данные об эффективных сечениях образования – продуктов испарения в реакциях «горячего» слияния, образующихся при испарении из составного ядра до 14 нейтронов. Изучалась вероятность выживания сильно возбужденных компаунд-ядер, в том числе сильно делящихся, то есть имеющих жидкокапельный барьер деления, близкий к нулю. Исследовались ограничения во входном канале реакций полного слияния в зависимости от Z и A мишени и тяжелого иона, влияние структуры атомных ядер на вероятности слияния, а затем и выживания составных ядер, свойства радиоактивного распада вновь синтезируемых изотопов элементов с $Z \geq 92$.

С использованием сепаратора был выполнен большой объем исследований закономерностей образования и вероятностей выживания высоковозбужденных компаунд-ядер с атомными номерами в области $82 \leq Z \leq 100$, изучались свойства новых нейтронодефицитных изотопов элементов U–No, исследовались сечения образования и делимость компаунд-ядер трансфермиевых нуклидов в реакциях «горячего» слияния, а также проводились эксперименты по синтезу и изучению свойств сверхтяжелых элементов ($Z \geq 110$) в реакциях «теплого» слияния ($E^* \sim 30 \text{ МэВ}$), в которых использовались ионы ^{48}Ca . В частности, более 30 комбинаций налетающий ион – ядро мишени были исследованы для ядер – остатков испарения с атомными номерами $83 \leq Z \leq 94$. Эксперименты проводились в диапазоне реакций полного слияния от $^{40}\text{Ca} + ^{151}\text{Eu} \rightarrow ^{191}\text{Bi}^*$ и до $^{26}\text{Mg} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{234}\text{Pu}^*$.

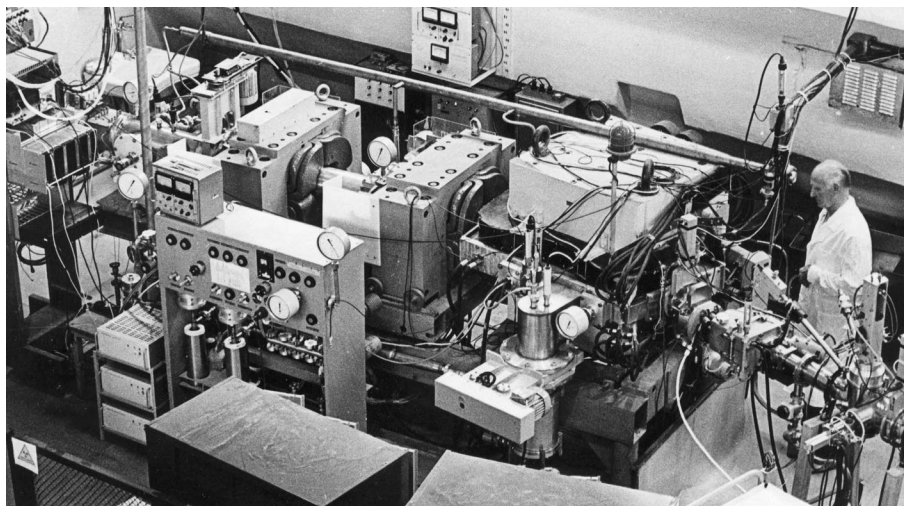
В частности, были синтезированы и изучены характеристики α -распада 14 новых изотопов U, Np и Pu. Для ряда известных изотопов Ac–Pa были уточнены данные об энергиях и относительных интенсивностях α -переходов и периодах полураспада. Данные о свойствах таких нейтронодефицитных нуклидов позволяют оценить, насколько точно существующие модели и формулы могут предсказать энергии и пери-

оды α -распада при значительном изменении числа нейтронов и, что особенно важно, вблизи и при пересечении сферической нейтронной оболочки $N = 126$. Это имеет существенное значение для опытов по синтезу и изучению свойств сверхтяжелых нуклидов, число нейтронов в которых приближается к следующей, предсказанной, сферической оболочке $N = 184$.

Одним из важнейших направлений экспериментальных работ был синтез изотопов 112- и 114-го элементов в реакциях с пучками ^{48}Ca и мишенями из изотопов урана и плутония. Их результаты включены в итоговый рисунок ниже в пп. 8.4, посвященном открытию СТЭ. Авторами создания сепаратора и проведенных исследований являются: Г.М.Тер-Акопян, Д.Д.Богданов, А.В.Еремин, А.Г.Попеко, А.П.Кабаченко, О.И.Малышев, В.А.Горшков, В.И.Чепигин и др.

8.3. Газонаполненный сепаратор продуктов ядерных реакций

Установка ГНС (рис. 5) была создана в 1989 году; к этому времени в ЛЯР работал ускоритель У-400 с рекордными по интенсивности пучками ионов. Тяжелые ядра — остатки испарения в основном отделяются от других продуктов облучения и от бомбардирующих ионов при движении через объем с разреженным водородом, на который наложено магнитное поле. Частицы различной природы и скорости при этом приобретают различные равновесные заряды и, в конечном счете, магнитную жесткость. Этот сепаратор продуктов ядерных реакций с высокой эффективностью сбора ядер и степенью очистки от фоновых продуктов открыл новые перспективы для исследования стабильности тяжелых и сверхтяжелых атомных ядер, синтеза новых нуклидов, изучения структуры и свойств ядер, а также механизмов их образования в ядерных реакциях. В создании сепаратора под руководством Ю.Ц.Оганесяна принимали участие: В.В.Бехтерев, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбемян, Ю.В.Лобанов, В.Н.Мельников, А.Г.Попеко, Х.Риголь, Ю.П.Харитонов, Ю.С.Цыганов и др.



Газонаполненный сепаратор продуктов ядерных реакций — основная установка для синтеза и изучения СТЭ

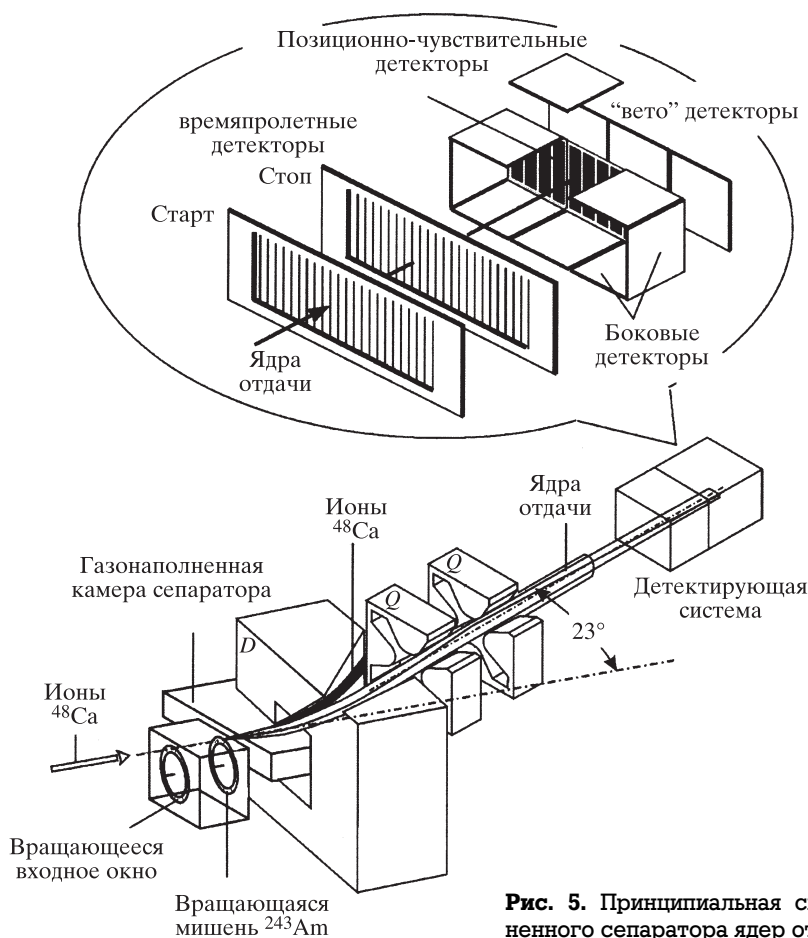
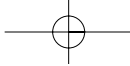


Рис. 5. Принципиальная схема газонаполненного сепаратора ядер отдачи

8.4. Открытие сверхтяжелых элементов

Эффекты ядерных оболочек имеют место как в сферических, так и в деформированных ядрах. Наиболее сильно они проявляются для сферических ядер, содержащих магические числа протонов и нейтронов, таких как ядро ^{208}Pb с $Z = 82$ и $N = 126$. Однако уже у деформированных трансурановых ядер, макроскопическая стабильность которых относительно спонтанного деления быстро падает с ростом Z , и времена жизни во все большей мере определяются именно оболочечными эффектами. Это особенно ярко проявилось вблизи $Z = 100$ и $N = 152$, и к концу 80-х годов теории пришли к заключению, что на подходах к «острову» сферических СТЭ вокруг $Z = 114$ и $N = 184$ может существовать также область повышенной стабильности в районе $Z = 108$ и $N = 162$. Первые эксперименты на ГНС были нацелены на исследование именно этой области ядер. В 1993–1995 годах в сотрудничестве с группой из Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, США, на циклотроне У-400 были впервые синтезированы нуклиды ^{262}Rf , ^{265}Sg , ^{266}Sg , ^{267}Hs и $^{273}110$. Свойства ядер ^{266}Sg



и ^{262}Rf выявили сильное повышение стабильности по мере приближения к $Z = 108$ и $N = 162$. Впервые наблюдалось увеличение периодов полураспада четно-четных ядер относительно спонтанного деления с ростом Z при постоянном N . Единственным объяснением этого факта могло быть приближение к расположенной рядом протонной оболочке $Z = 108$.

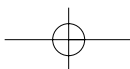
С 1998 года на ГНС в сотрудничестве с Ливерморской лабораторией проводятся опыты по синтезу и исследованию СТЭ. Опыты по синтезу новых тяжелых ядер в реакциях ^{208}Pb и ^{209}Bi с ионами ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{64}Ni , ^{70}Zn , а также тяжелых актинидов с ионами от ^{22}Ne до ^{34}S показали, что для получения СТЭ чувствительность опытов должна быть повышена еще на несколько порядков. В ЛЯР впервые синтезированы наиболее тяжелые изотопы ^{262}Rf ($Z = 104$), $^{265,266}\text{Sg}$ ($Z = 106$), ^{267}Hs ($Z = 108$) и $^{273}110$.

В 1998–1999 годах на ГНС с использованием новой сборки детекторов с повышенной эффективностью регистрации ядер были проведены эксперименты по синтезу изотопов 114-го элемента в реакции слияния ^{244}Pu с ионами ^{48}Ca с чувствительностью почти на три порядка выше, чем во всех предыдущих попытках. Впервые синтезированы два ядра нового элемента с $Z = 114$. Времена жизни новых дочерних ядер 112- и 110-го элементов оказались на 4–5 порядков больше, чем у полученных в реакциях холодного слияния нуклидов $^{277}112$ и $^{273}110$, имеющих на 8 нейтронов меньше. Столь значительное повышение стабильности ядер с увеличением числа нейтронов могло быть обусловлено влиянием сферической нейтронной оболочки $N = 184$, что можно рассматривать как экспериментальное доказательство существования области сферических сверхтяжелых элементов.

Дальнейшие исследования были нацелены на синтез элемента 116 в реакции слияния ^{48}Ca с ^{248}Cm ; последний тяжелее ранее использованного ^{244}Pu на одну α -частицу. Поэтому α -распад материнских ядер должен был приводить к нуклидам, ранее полученным при облучении ^{244}Pu . Были зарегистрированы три цепочки α -распада ядра $^{293}116$, при этом свойства дочерних ядер полностью совпали со свойствами ядер, полученных напрямую в «дочерней» реакции $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$. Это значительно повышает достоверность результатов по синтезу 114-го элемента. Сечение образования ядра $^{293}116$ составило 0,5 пикобарна, что на три порядка лучше чувствительности экспериментов 1980-х годов (см. пп. 8.5). Авторами работ направлена заявка в IUPAC о признании приоритета в открытии элементов 114 и 116.

В 2002 году проведены опыты по синтезу 118-го элемента в реакции $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$. Получены пучки ^{48}Ca высокой интенсивности – $6 \cdot 10^{12} \text{ c}^{-1}$ при экономном (0,3 мг/ч) расходе ^{48}Ca . Наблюдалось одно событие, состоящее из сигнала от имплантации тяжелого ядра в детектор, двух последовательных α -распадов и спонтанного деления с большим энерговыделением, коррелированных по позиции и времени. Энергии и времена α -распадов материнского и дочернего ядер оказались в согласии с ожиданием для $^{294}118$ и его дочернего ядра $^{290}116$, которые должны образоваться после испарения трех нейтронов из составного ядра $^{297}118$.

В начале 2003 года подтверждена обоснованность этих результатов. Мишенью теперь служил ^{245}Cm , отличающийся на одну α -частицу от ^{249}Cf . Зарегистрированы три цепочки распада изотопа 116-го элемента, свойства которого совпадают со свойствами ядра, наблюдавшегося после α -распада изотопа $^{294}118$ в реакции $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$. Таким образом, синтез изотопа $^{290}116$ подтвердил результаты опытов по элементу 118.



Кроме того, были зарегистрированы два события распада еще одного изотопа 116-го элемента — $^{291}\text{116}$.

В других опытах 2003 года были измерены сечения образования изотопов 114-го элемента в реакции $^{244}\text{Pu}+^{48}\text{Ca}$ и последующего испарения от 3 до 5 нейтронов из возбужденного составного ядра $^{292}\text{114}$ в зависимости от энергии ионов. Это имело существенное значение для продолжения исследований СТЭ благодаря тому, что в одной реакции были синтезированы сразу три изотопа 114-го элемента. Свойства одного из них, $^{289}\text{114}$, подтвердили результаты 1999–2001 годов. Кроме того, были получены два других изотопа, $^{288}\text{114}$ и $^{287}\text{114}$, причем $^{287}\text{114}$ ранее наблюдался после α -распада изотопа $^{291}\text{116}$, синтезированного в реакции $^{245}\text{Cm}+^{48}\text{Ca}$. Были также определены энергии ионов ^{48}Ca , при которых выходы различных изотопов 114-го эле-



Коллектив исследователей сверхтяжелых элементов

мента максимальны. Оказалось, что сечение может достигать пять пикобарн, что в 10 раз превосходит значение, измеренное в 1999 году, когда энергия ^{48}Ca была ниже оптимальной. Результаты этого эксперимента существенно расширили представления о механизме реакций полного слияния. Ранее считалось, что сверхтяжелые ядра могут выживать только при энергиях ^{48}Ca вблизи барьера слияния и что сечения таких реакций едва ли могут превысить один пикобарн.

Однако при облучении более легкого изотопа ^{242}Pu ионами ^{48}Ca также образовывались ядра 114-го элемента с сечениями до четырех пикобарн при энергиях ^{48}Ca на 10–15 МэВ выше барьера слияния. В этой реакции были синтезированы изотопы $^{286}114$ и $^{287}114$. Оба они ранее наблюдались после α -распадов ядер $^{290}116$ и $^{291}116$ в реакции $^{245}\text{Cm}+^{48}\text{Ca}$, а $^{287}114$ был зарегистрирован и в реакции $^{244}\text{Pu}+^{48}\text{Ca}$.

Измеренные функции возбуждения для реакций полного слияния ядер и последующего испарения нескольких нейтронов позволили с большей определенностью выбрать энергии ионов ^{48}Ca в следующем эксперименте – по синтезу 115-го элемента в реакции $^{243}\text{Am}+^{48}\text{Ca}$. При двух энергиях ^{48}Ca были получены два изотопа $^{287}115$ и $^{288}115$. Причем впервые в одном эксперименте были синтезированы сразу два новых СТЭ, поскольку изотопы 113-го элемента, $^{283}113$ и $^{284}113$, образовывались после α -распадов ядер $^{287}115$ и $^{288}115$.

Результаты открытия СТЭ и их изотопов подытожены на рис. 6.

Таким образом, в течение последних пяти лет на дубненском газонаполненном сепараторе ядер отдачи впервые синтезированы пять новых сверхтяжелых элементов, изучены радиоактивные свойства 27 новых нуклидов. При этом многие ядра получе-

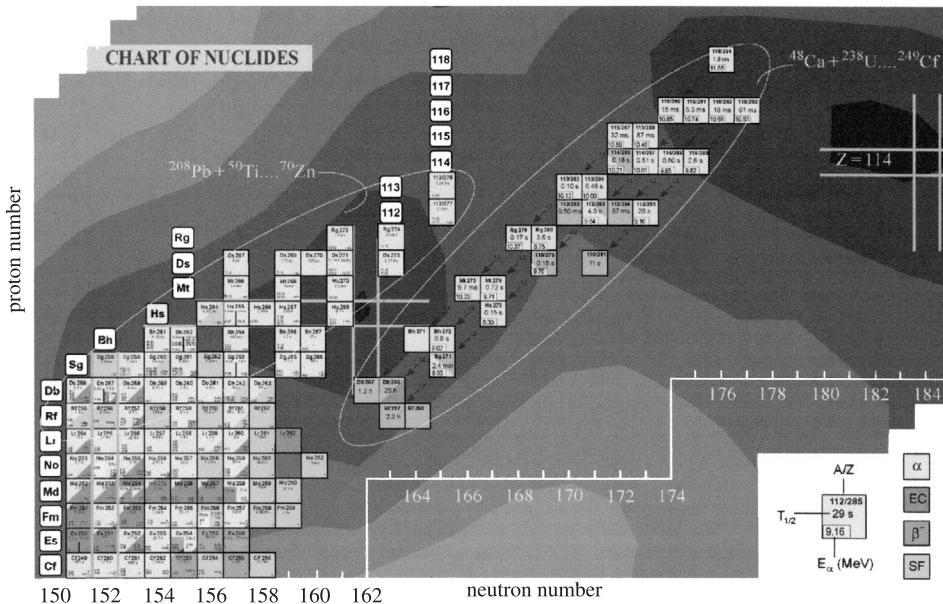


Рис. 6. Современное состояние карты нуклидов в области самых тяжелых элементов. Нуклиды и цепочки распада в области сверхтяжелых элементов открыты в исследованиях ЛЯР на установках ГНС и ВАСИЛИСА

ны в различных (перекрестных) реакциях, и измерены сечения образования ядер при различных энергиях ионов ^{48}Ca (функции возбуждения). Оба этих метода чрезвычайно важны для надежной идентификации атомного и массового чисел (A и Z) синтезированных нуклидов. Радиоактивные свойства новых нуклидов (энергии и времена их α -распадов) указывают на то, что α -распады сверхтяжелых ядер являются разрешенными, что характерно для сферических ядер. Для изотопов более легких элементов, дочерних продуктов α -распадов сверхтяжелых ядер, наблюдается повышение запретов на α -распад. Этот факт указывает на то, что в процессе последовательных α -распадов изначально сферическое ядро постепенно принимает все более деформированную форму. Таким образом, ядра в процессе α -распадов переходят из сферической области в деформированную, что убедительно подтверждает предсказания теории о существовании области повышенной стабильности сферических сверхтяжелых ядер.

Исследования проведены под руководством Ю.Ц.Оганесяна, в них участвовали: В.К.Утенков, Ю.А.Лазарев, Ю.В.Лобанов, Ф.Ш.Абдуллин, А.Н.Поляков, И.В.Широкровский, Ю.С.Цыганов, А.Н.Мезенцев, К.Дж.Муди и др.

8.5. Перспектива прямого измерения массы изотопов СТЭ

Основной метод физической идентификации новых трансактиноидных нуклидов, синтезированных в реакциях холодного слияния, состоял принципиально в регистрации их α -распада и затем α -распада их дочерних, внучатых, ... ядер. Эти радиоактивные ряды всегда приводят к нуклиду с известными Z и A , по числу α -распадов в цепочке можно затем идентифицировать ее родоначальника. При синтезе СТЭ такой метод идентификации не мог быть использован: цепочки α -распадов приводят к спонтанно-делящимся нуклидам, Z и A которых ранее не были известны, так как эти нуклиды достижимы только этим «обходным» путем. Вместе с тем относительно продолжительные времена жизни полученных на сегодня СТЭ открывают принципиальную возможность прямого измерения массы сверхтяжелого ядра методами классической он-лайн спектрометрии. Ю.Ц.Оганесян предложил схему специализированного масс-спектрометра, ориентированного на решение этой чрезвычайно трудной задачи, и руководил созданием в ЛЯР установки MASHA (Mass Analyzer of Super Heavy Atoms), схема которой представлена на рис. 7.

Ядра отдачи из мишени вбиваются в горячий танталовый стоппер (~2300 К). За счет диффузии атомы оказываются на поверхности сборника, откуда атомы достаточно летучих металлов десорбируются и попадают в камеру ЭЦР ионного источника, работающего на частоте 2,45 ГГц. Однозарядные ионы экстрагируются из плазмы источника и формируются в пучок с энергией 40 кэВ, который после прохождения через сепарирующие магнитные и электростатические элементы попадает на детекторы в фокальной плоскости сепаратора на расстоянии 14 метров от источника ионов. Массовое разрешение анализатора $M/\Delta M \sim 1100$. Детекторы излучения продуктов реакций обладают позиционным разрешением 1 мм, что позволяет сохранить массовое разрешение. Установка дает чрезвычайно высокую степень «очистки» от бомбардирующих частиц, осколков деления и продуктов реакций передачи и доставляет на детекторы практически только ядра СТЭ. Элементы с номерами от 112 до 118 являются химическими аналогами Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At и Rn соответственно. Они все обладают намного более высокой летучестью (температурой кипения), чем более лег-

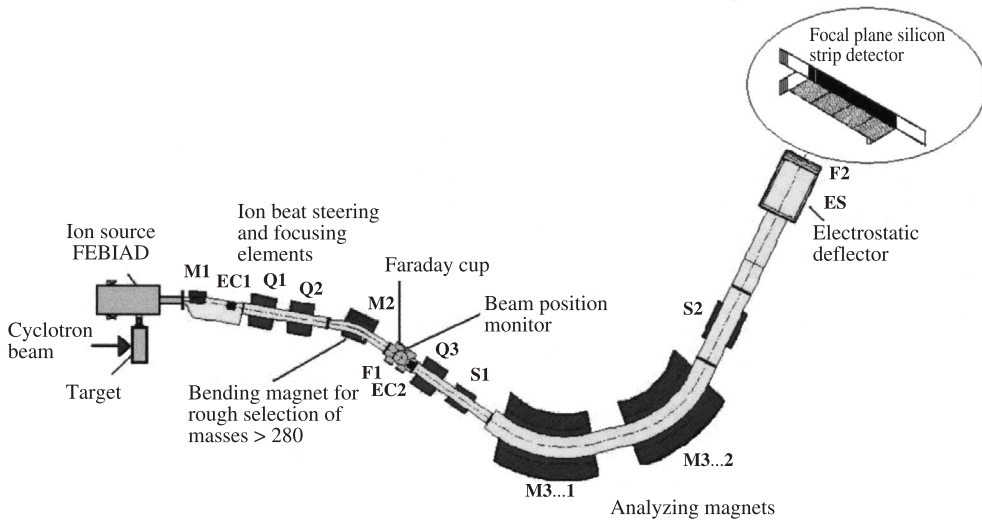
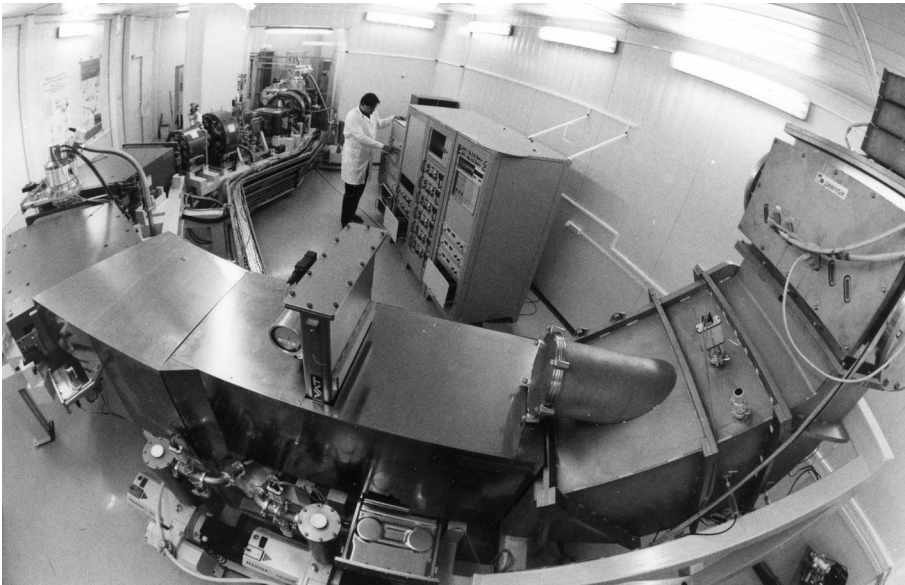
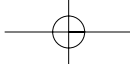


Рис. 7. Схема устройства он-лайн масс-сепаратора MASHA для идентификации массового номера СТЭ

кие трансактиноиды. Это свойство отражается и в повышенной скорости диффузии и способствует эффективности ионизации в источнике. Мишень в установке MASHA может быть раз в пять толще ($1,5-2,0 \text{ мг/см}^2$), чем в кинематических сепараторах, что позволяет перекрыть всю ширину функции возбуждения и получать одновременно



Масс-сепаратор MASHA для определения массовых чисел сверхтяжелых элементов в процессе наладки



два-три изотопа изучаемого элемента. От ЛЯР в создании установки MASHA приняли активное участие В.В.Бехтерев и сектор Э.М.Козулина.

8.6. Процессы деления и квазиделения в реакциях синтеза сверхтяжелых элементов

Для СТЭ деление и квазиделение становятся доминирующими ядерными процессами как при формировании составного ядра, так и при его девозбуждении. Оба этих процесса препятствуют синтезу СТЭ. Вместе с тем сечение деления несет важную информацию о сечении образования составного ядра, что помогает в выборе оптимальных комбинаций сталкивающихся ядер и энергии столкновения. Изучение особенностей процессов деления и квазиделения способствует успешному решению проблемы синтеза СТЭ. В ЛЯР в этом направлении велись интенсивные экспериментальные исследования на циклотроне У-400. Исследования проводились Э.М.Козулиным с сотрудниками под научным руководством М.Г.Иткиса в рамках большой международной коллаборации, включавшей научные институты Бельгии, Италии, России, США, Финляндии и Франции.

СПРАВКА: Михаил Григорьевич Иткис.

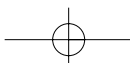
Научные исследования Михаила Григорьевича начались в 1966 году в Институте ядерной физики (ИЯФ) Академии наук Казахстана, куда он был направлен по окончании физического факультета МГУ. С 1966 по 1992 годы он прошел путь от молодого инженера до начальника крупнейшего научного отдела ИЯФ, защитил кандидатскую и докторскую диссертации, стал одним из признанных лидеров советской и мировой науки в области физики деления ядер. В 1988 году ему было присвоено звание профессора.

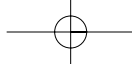
Научные интересы М.Г.Иткиса тесно переплетались с исследованиями, проводимыми в ЛЯР ОИЯИ, куда он и был приглашен на работу в 1992 году. В 1993 году Ученый совет ОИЯИ избирает М.Г.Иткиса на должность зам. директора, а в 1997 году — на должность директора ЛЯР ОИЯИ.

Большое внимание М.Г.Иткис уделяет совершенствованию ускорительной базы лаборатории, созданию принципиально новых экспериментальных установок, исследованиям ядерных процессов в области синтеза сверхтяжелых элементов, широкому международному научному сотрудничеству. Несмотря на все трудности этого периода, ЛЯР сохранила и усилила позицию ведущего международного научного центра в исследованиях по синтезу сверхтяжелых элементов, изучению механизмов реакций с наиболее тяжелыми ионами, получению и изучению свойств экзотических ядер легких элементов. ЛЯР организовала и провела серию крупных международных научных конференций, на которых были продемонстрированы выдающиеся научные достижения лаборатории.

- *Экспериментальная установка*

Использовавшаяся экспериментальная установка включала в себя три блока: спектрометр фрагментов — продуктов ядерных реакций CORSET, мультidetектор нейтронов ДЕМОИ и спектрометр множественности γ -квантов.





- *Массово-энергетические распределения фрагментов деления и квазиделения, множественность нейтронов и γ -квантов*

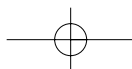
Процессы деления и квазиделения исследовали для тяжелых и сверхтяжелых составных ядер с атомными номерами от 82 до 122. Особое внимание уделяли ядерным реакциям, в которых были синтезированы ядра сверхтяжелых элементов (см. пп. 8.4.). На циклотроне У-400 мишени из Pb, Th и актиноидных элементов облучались ионами ^{48}Ca , ^{58}Fe , ^{64}Ni , ^{86}Kr , на других ускорителях использовались ионы ^{12}C , ^{22}Ne , ^{26}Mg и мишени из лантаноидных элементов. Энергия бомбардирующих ионов охватывала интервал около входного кулоновского барьера. Измеряли массово-энергетические распределения фрагментов деления и квазиделения, множественность нейтронов и γ -квантов.

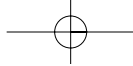
В результате этих экспериментов было установлено резкое изменение соотношения между каналами деления и квазиделения при переходе от 102-го элемента ($^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$) к 112–116 элементам (^{238}U , ^{244}Pu , $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$). При синтезе 102-го элемента в выходе фрагментов доминировал процесс слияния-деления, при синтезе 112–116 элементов доминирующим каналом было квазиделение: его сечение σ_{CF} на два порядка величины превосходило сечение слияния-деления σ_{ff} . Тем не менее в средней части массовых распределений фрагментов удалось выделить компоненту, которая определенно была связана с делением составного ядра. Массовое распределение в этой средней части спектра было асимметричным. Максимум выхода фрагментов лежал при массовом числе $A = 132, 134$. Это свидетельствовало о влиянии замкнутых протонной ($Z = 50$) и нейтронной ($N = 82$) оболочек на выход осколков деления ядер сверхтяжелых элементов. В квазиделении четко проявились эффекты от замкнутых протонной и нейтронной оболочек ядра ^{208}Pb : «свинцовый пик» мощно доминировал в массовом распределении фрагментов квазиделения. На протяжении многих лет считалось, что мгновенное деление возбужденного составного ядра является главным препятствием на пути синтеза новых трансурановых элементов. Проведенные исследования показали, что при синтезе СТЭ возникает дополнительное серьезное препятствие – квазиделение. Ядерная система из двух сливающихся ядер распадается на два ядра-фрагмента без образования составного ядра.

Измерения множественности нейтронов в совпадении с фрагментами показали, что при делении сверхтяжелого составного ядра число испущенных нейтронов в два раза больше, чем при квазиделении. Число испущенных нейтронов при делении ядра СТЭ близко к десяти, и этот фактор может быть использован как свидетельство образования ядра СТЭ. Число испущенных γ -квантов при делении ядра СТЭ в полтора раза превышает их число при квазиделении.

- *Сечение захвата и сечение образования составного ядра*

Слияние-деление и квазиделение – основные каналы реакций, используемых для синтеза СТЭ. Сечение захвата σ_c может быть определено по выходу всех фрагментов, образовавшихся в процессах слияния-деления и квазиделения. Сечение формирования составного ядра σ_{ff} определяется выходом фрагментов в средней части массового распределения. Проведенный анализ показал, что в реакциях синтеза 112–116 эле-





ментов (^{238}U , ^{244}Pu , $^{248}\text{Cm}+^{48}\text{Ca}$) при энергии возбуждения составного ядра 25–40 МэВ σ_{ff} примерно на два порядка величины меньше σ_{ff} . Для продвижения к СТЭ с большим значением Z можно было бы использовать более тяжелые, чем ^{48}Ca , бомбардирующие ионы: ^{56}Fe , ^{64}Ni . Были проведены измерения σ_{df} и σ_{ff} в реакциях $^{248}\text{Cm}+^{56}\text{Fe}$ и $^{242}\text{Pu}+^{64}\text{Ni}$, ведущих к образованию СТЭ с атомным номером 122 и числом нейтронов, соответственно, 182 и 184. Полученные результаты обнадеживают: σ_{ff} в этих двух реакциях оказались близкими к σ_{ff} в реакциях ^{244}Pu , $^{248}\text{Cm}+^{48}\text{Ca}$. Напротив, в реакции $^{208}\text{Pb}+^{86}\text{Kr}$, которую пытались использовать в Беркли для получения ядер 118-го элемента, σ_{ff} оказалось в сотни раз меньше, чем при горячем синтезе 114- и 116-го элементов. Это означает, что для продвижения к большим Z новых СТЭ следует использовать мишени из тяжелых изотопов актиноидных элементов и бомбардирующие ионы ^{56}Fe и ^{64}Ni . Реакции холодного слияния, в которых в качестве мишени используется ^{208}Pb и которые дали возможность синтезировать новые тяжелые элементы с атомными номерами от 107 до 112, уже не позволяют войти в область сферических СТЭ. Главная причина этого ограничения – мощный рост интенсивности квазиделения в реакциях с более массивными тяжелыми ионами, которые необходимо использовать для получения ядер сферических СТЭ в реакциях холодного слияния.

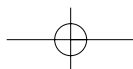
В этих экспериментах от ЛЯР участвовали: М.Г.Иткис, А.А.Богачев, Ю.М.Иткис, М.Яндель, Я.Климан, Г.Н.Княжева, Н.А.Кондратьев, Э.М.Козулин, Л.Крупа, Ю.Ц.Оганесян, И.В.Покровский, Е.В.Прохорова, Р.Н.Сагайдак, В.М.Воскресенский, В.И.Загребаев.

8.7. Концепция двойной ядерной системы для процесса полного слияния ядер

Полное слияние ядер с формированием составного ядра – один из основных ядерных процессов в столкновениях двух ядер с энергией до 20 МэВ на нуклон. Он успешно использовался для синтеза трансурановых и сверхтяжелых элементов, получения ядер с большим спином и ядер сильно обедненных нейтронами. Вместе с тем сам механизм формирования составного ядра оставался открытой научной проблемой. Открытие и изучение реакций глубококонепругих передач (РГНП) позволили сформулировать новый более реалистический подход к интерпретации механизма полного слияния ядер. Он был предложен в ЛЯР В.В.Волковым и получил название концепции двойной ядерной системы (КДЯС). В отличие от полного слияния РГНП – открытые ядерные реакции. Их изучение дало уникальную информацию о том, как взаимодействуют два ядра, оказавшиеся в тесном контакте после полной диссипации кинетической энергии столкновения. Именно эта информация и была использована для раскрытия механизма формирования составного ядра.

Основным содержанием процесса слияния ядер согласно КДЯС является формирование двойной ядерной системы (ДЯС) на стадии захвата и ее эволюции к составному ядру, протекающей путем передачи нуклонов от более легкого к более тяжелому ядру. Важная черта этой эволюции – сохранение индивидуальности ядер, входящих в ДЯС, на протяжении всего процесса эволюции, что обусловлено оболочечной структурой ядер.

КДЯС выявила две важные особенности в слиянии массивных ядер: существование потенциального барьера на пути эволюции ДЯС к составному ядру и конкуренцию между каналами полного слияния и квазиделения. На основании КДЯС были



разработаны модели этой конкуренции для симметричных и асимметричных ядерных реакций. Рассчитанные с помощью этих моделей вероятности формирования составного ядра после реализации стадии захвата позволили удовлетворительно воспроизвести экспериментальные сечения образования трансактиноидных и сверхтяжелых элементов, синтезированных в реакциях холодного и горячего слияния. Было установлено, что в реакциях холодного слияния квазиделение является главным фактором, определяющим падение сечения образования тяжелого элемента с ростом его атомного номера. Была выявлена бесперспективность использования симметричных ядерных реакций для продвижения в область сверхтяжелых элементов. В рамках КДЯС удалось описать оптимальную энергию возбуждения составного ядра в реакциях холодного синтеза трансактиноидных элементов. КДЯС выявила особую роль α -кластерной конфигурации ДЯС, формирующейся на заключительной стадии ее эволюции и проявляющую себя в явлении квазиэмиссии α -частиц. КДЯС позволила интерпретировать оболочечные эффекты в массовом распределении продуктов квазиделения и создать модель для их описания.

В целом КДЯС и созданные на ее основе модели позволяют описать все наиболее важные характеристики ядерных реакций между массивными ядрами, в том числе реакций, используемых для синтеза трансактиноидных и сверхтяжелых элементов. Это позволяет утверждать, что КДЯС дает наиболее реалистическое представление о процессе полного слияния ядер и механизме формирования составного ядра в реакциях с тяжелыми ионами.

В разработке КДЯС участвовали: Г.Г.Адамян, Н.В.Антоненко, В.В.Волков, А.К.Насиров, Е.А.Черепанов, В.Шайд.

8.8. Экспериментальные исследования структуры легчайших экзотических ядер (установка АКУЛИНА)

Интерес к изучению свойств нейтроноизбыточных легких ядер, в том числе и квазистабильных, вызван открытием нейтронного гало у ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$ и др. Гало — это ядерное вещество в состоянии с экстремально низкой плотностью и стабильность таких ядер обусловлена особенностями взаимодействия кора и гало на больших расстояниях (по меркам короткодействующих ядерных сил). Современные теоретические расчеты описывают свойства легчайших ядер с высокой точностью и очень важна экспериментальная проверка предсказаний теории.

Изучение реакций передачи нуклонов и ядерных кластеров дает исключительные возможности для получения сведений о структуре ядер. Для изучения структуры легких нейтроноизбыточных ядер особенно эффективны пучки радиоактивных ядер. В 1997 году в ЛЯР ОИЯИ был сооружен пучковый канал высокого разрешения — сепаратор АКУЛИНА. Он доставляет на физическую мишень вторичные пучки радиоактивных ядер ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^8\text{Li}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{12}\text{Be}$ и др. с энергией 20–35 МэВ на нуклон, полученные на бериллиевой мишени при фрагментации ${}^{11}\text{B}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{15}\text{N}$, ${}^{18}\text{O}$, ускоренных на циклотроне У-400М до 30–50 МэВ на нуклон. Рекордные интенсивности циклотрона обеспечили сепаратору первое место по интенсивности и энергии радиоактивных пучков среди аппаратур для исследований структуры легчайших нейтроноизбыточных ядер. Возможности сепаратора сильно выросли благодаря получению на У-400М уникального пучка тритонов с энергией 58 МэВ.



Установка АКУЛИНА

Исследования проводятся с использованием набора газовых и жидких мишеней-изотопов водорода и гелия. Уникальные возможности дают газовые и жидкие тритиевые мишени, созданные в сотрудничестве с ВНИИЭФ, г. Саров, Россия.

В ЛЯР были изучены реакции упругого рассеяния и передачи нейтронов, протекающие при бомбардировках H , D и ${}^4\text{He}$ пучками ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ с энергией 20–27 МэВ на нуклон. Впервые была экспериментально установлена динейтронная структура гало ядра ${}^6\text{He}$, представляющая стабильный динейтрон в поле кора – ${}^4\text{He}$. Впервые была установлена кластеризация ядра ${}^6\text{He}$ на два тритона, имеющая место наряду со структурой, представляющей α -кор и два гало нейтрона. Однако изучение реакции передачи ${}^1\text{H} ({}^6\text{He}, t){}^4\text{He}$, выполненное в широком угловом диапазоне в системе центра масс, дало независимое доказательство коренного отличия структуры гало ядра ${}^6\text{He}$ от «обычного» ядра ${}^6\text{Li}$. Анализ данных об упругом и неупругом рассеянии ядер ${}^6\text{He}$ на водороде дал еще одно независимое подтверждение существованию протяженного распределения нейтронного вещества в этом ядре. Данные об упругом рассеянии на ядрах ${}^4\text{He}$ не выявили присутствие тетранейтронной конфигурации в гало ${}^8\text{He}$. Ряд экспериментов был посвящен изучению квазистабильных резонансных состояний тяжелых ядер водорода, гелия и лития. Впервые были получены экспериментальные доказательства существования основного уровня ${}^5\text{H} (j^\pi = 1/2^+)$ при энергии 1,8 МэВ выше порога распада ${}^5\text{H} \rightarrow t+n+n$.

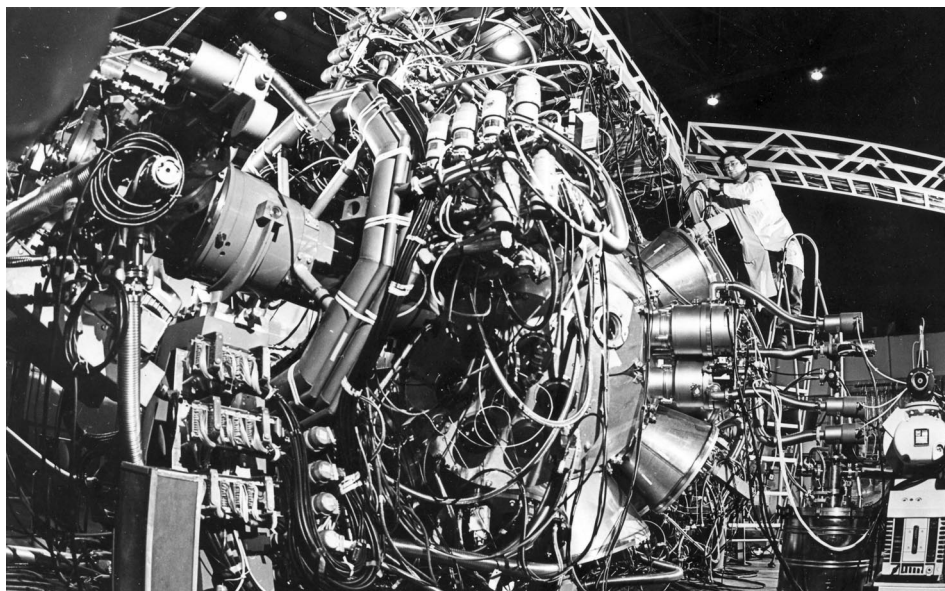
Работы на пучках сепаратора АКУЛИНА выполнялись в сотрудничестве с группами из ГСИ (Дармштадт, Германия), ИЯФ (Краков, Польша), РИКЕН (Сайтама, Япония), ГАНИЛ (Каэнь, Франция), ДСМ/ДАПНИА (Сакле, Франция), Курчатовского института (Москва, Россия), Университета Мельбурна (Австралия), ЛАНЛ (Лос-Аламос, США), Университета Нотр-Дама (США), Техасского А&М Университета (Колледже Стэйшн, США), Университета Бергена (Норвегия).

8.9. 4π-спектрометр заряженных частиц FOBOS, экспериментальные исследования

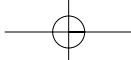
В столкновениях двух ядер при энергии несколько десятков МэВ на нуклон протекают процессы ядерной фрагментации, при которых в выходных каналах реакций образуется несколько фрагментов с широким распределением по массе, ядерному заряду и кинетической энергии. Для изучения такого рода процессов необходимо регистрировать все продукты реакции одновременно и измерять их массы, ядерные заряды и кинетические энергии в большом телесном угле и с хорошим разрешением. С этой целью и был создан 4π-спектрометр заряженных частиц FOBOS. Идея создания такой установки была выдвинута Х.Зоданом и К.Кауном еще в 1983 году, однако потребовалось довольно много времени, чтобы ее реализовать в полном объеме.

FOBOS имеет ячеистую структуру и включает в себя 20 шестиугольных и 10 пятиугольных модулей. Каждый модуль состоит из позиционно-чувствительного лавинного детектора, брэгговской ионизационной камеры и мозаики из 7 плоских кристаллов CsI(Tl). Лавинные детекторы и ионизационные камеры позволяют определять координаты, время пролета фрагментов, их энергии и ядерные заряды. Легкие заряженные частицы, простреливающие брэгговские ионизационные камеры, идентифицировались с помощью сцинтилляторов. При весьма высокой апертуре были получены угловые разрешения лучше одного градуса, широкий динамический диапазон и, что уникально, вектор импульса каждого заряженного продукта реакции восстанавливался без дополнительных кинематических предположений о самой реакции.

Общая конструкция и каркас центральной вакуумной камеры спектрометра FOBOS были совместно спроектированы ЛЯР и производственной базой БАН в Софии, где и были изготовлены корпуса детекторов и центральная вакуумная камера диаметром около полутора метров. Каждый из 30 модулей весит около 150 кг, а общий



Установка FOBOS



вес установки составил около 3,5 тонн. В Центральном институте ядерных исследований (ZfK) в Россендорфе (ГДР) была проделана большая работа по конструированию и наладке газовых детекторов: брэгговских ионизационных камер и позиционно-чувствительных лавинных детекторов. Была разработана специальная аппаратура для приготовления тонких ~ 1 мкм пленок из пропилена и аппаратура для достижения высокой чистоты пентана, наполнявшего газовые детекторы. Там же разработана и специализированная электроника для установки FOBOS.

Первый эксперимент на установке FOBOS с несколькими газовыми детекторами был проведен в 1993 году. В последующие 4 года FOBOS был укомплектован сцинтилляционной оболочкой из 210 кристаллов CsI. В качестве детектора передних углов был использован модифицированный спектрометр ARGUS, переданный Институтом Хана–Майтнер в Берлине. Был создан программно-аппаратурный комплекс, объединяющий компьютерную технику и измерительную электронику. Общее число параметров, одновременно измеряемых в установке FOBOS, достигает полутора тысяч.

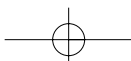
Наиболее важный научный результат, полученный на установке FOBOS, — наблюдение «истинного тройного деления», когда в выходном канале реакции образуются три фрагмента сравнимой массы. На основании анализа пространственных и энергетических корреляций фрагментов тройных распадов был сделан вывод, что наиболее вероятным механизмом этого процесса является распад составного ядра из сильнодеформированной (вытянутой) предразрывной конфигурации. Оказалось также, что все три фрагмента хотя и образуются в одном ядерном процессе, но не одновременно, а с небольшой задержкой по времени $\sim 1,5 \cdot 10^{-21}$ с.

Впервые удалось экспериментально наблюдать интенсивное охлаждение возбужденного тяжелого ядра перед разрывом путем эмиссии легких частиц и определить его температуру в момент деления. При регистрации спонтанного деления ядер ^{248}Cm и ^{252}Cf удалось обнаружить не наблюдавшуюся ранее моду деления с образованием трех массивных фрагментов, вылетающих строго вдоль оси начальной деформации. Эту моду деления невозможно было наблюдать при регистрации фрагментов деления традиционными методами.

В разработке, создании установки FOBOS и проведении экспериментов на ней участвовали: Х.Г.Ортлепп, В.Вагнер, М.Хербак, А.А.Александров, Л.А.Александрова, М.Андрасси, А.Будзановски, Б.Чех, М.Данцигер, Л.Диттерл, В.Н.Доронин, С.Джемухадзе, А.С.Фомичев, В.Д.Фромм, М.Гебхард, П.Гиппнер, К.Хайдел, Ш.Кейниту, Х.Хомер, С.А.Ивановски, Д.В.Каманин, И.В.Колесов, А.Матхиз, Д.Мей, С.И.Мерзляков, В.фон Оертцен, Ю.Ц.Оганесян, Г.Пауш, Ю.Э.Пенионжкевич, Ю.В.Пятков, С.В.Раднев, Г.Ренц, Л.А.Рубинская, И.Д.Сандрев, К.Д.Шиллинг, В.Зайдель, Д.И.Шишкин, А.П.Сиротин, Х.Зодан, О.В.Стрекаловский, В.Г.Тищенко, В.В.Трофимов, И.Р.Тюрин, Ц.Умлауф, Д.В.Вакатов, В.М.Васько, В.А.Витенко, Э.Вилл, М.Вильперт, Р.Япец, В.Е.Жучко, П.Зим, Л.Зродловски.

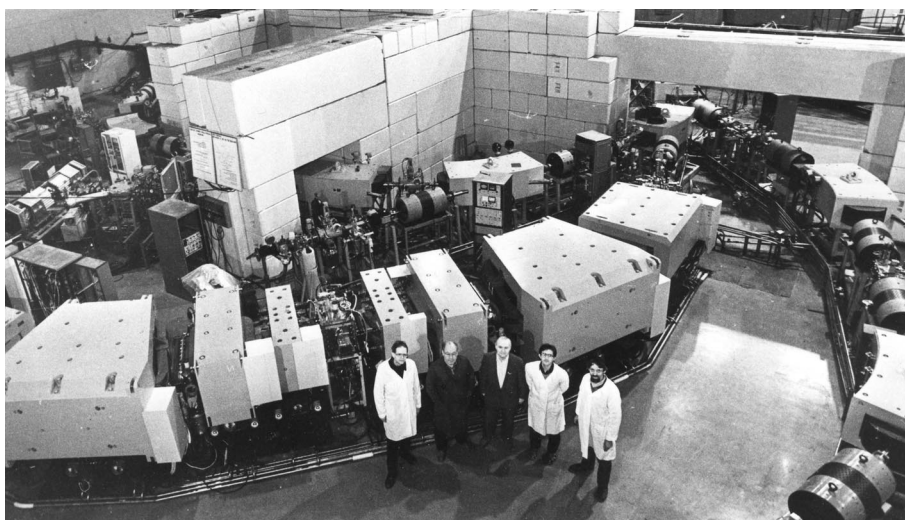
8.10. Кинематический сепаратор КОМБАС, экспериментальные исследования

Введение в строй циклотрона У-400М, который давал пучки тяжелых ионов с энергией несколько десятков МэВ на нуклон, открыло новые возможности для изучения особенностей механизмов реакций при энергии столкновения, близкой к энергии



Ферми, получения экзотических ядер с большим избытком или недостатком нейтронов, а также для формирования достаточно интенсивных вторичных пучков радиоактивных ядер. Для реализации этих возможностей по инициативе и при непосредственном участии А.Г.Артюха в ЛЯР был сооружен времяпролетный широкоапертурный сепарирующий канал на базе магнитов с неоднородными полями, получивший название КОМБАС (Комплекс Быстродействующего Анализатор-Спектрометра). Магнитный спектрометрический канал КОМБАС включает 8 спектрометричных дипольных магнитов, формирующих широкоапертурный сепаратор с тройной фокусировкой частиц-продуктов реакций, в выходном фокусе (по энергии, ширине и высоте). Сепаратор скомпонован в виде двух идентичных секций. Первая анализирующая секция выполняет функции фильтра частиц по их магнитной жесткости с отбрасыванием первичного пучка. Вторая секция компенсирует дисперсию первой и минимизирует эффекты аббераций в выходном ахроматическом фокусе. Прострельная фольга, установленная в промежуточном фокусе, радикально улучшает сепарирующую способность второй секции. База пролета второй секции используется для измерения времени пролета, что позволяет определить массовое число изотопа-продукта. КОМБАС осуществляет фильтрацию продуктов реакции по магнитной жесткости, удельной ионизации и времени пролета. Высокий угловой и импульсный акцептанс позволяют достигнуть высокой чувствительности при регистрации экзотических ядер при полной отстройке от первичного пучка. Фокальный детектор КОМБАС представляет собой комплекс, который включает набор $\Delta E, E$ телескопов, стриповых кремниевых детекторов и CsI(Tl) детекторов полного поглощения для идентификации массового числа и атомного номера продукта реакции. Телескопы используются также в корреляционных экспериментах для регистрации радиоактивного распада экзотических ядер.

Первые эксперименты на установке КОМБАС были нацелены на изучение реакций при периферийных столкновениях ядер, в которых можно было ожидать повы-



Установка КОМБАС

шенного выхода экзотических изотопов легких элементов. Мишени из ${}^9\text{Be}$ и ${}^{181}\text{Ta}$ облучались ионами ${}^{18}\text{O}$ с энергией 35 МэВ на нуклон, ${}^9\text{Be}$ облучался также ионами ${}^{22}\text{Ne}$ с энергией 40 МэВ на нуклон. Регистрировались продукты ядерных реакций с $Z = 2-10$. Было установлено, что распределение продуктов реакций по скоростям имеет форму гауссиана, максимум которого соответствует скорости налетающего ядра. Скоростные распределения продуктов реакций для мишеней из ${}^9\text{Be}$ и ${}^{181}\text{Ta}$ оказались подобными, однако выход нейтроноизбыточных изотопов-продуктов реакций при облучении ${}^{181}\text{Ta}$ оказался в десятки раз больше. Выход различных изотопов легких элементов подчинялся той же Q_{gg} -систематике, что и при энергиях тяжелых ионов ниже десяти МэВ. В значительных количествах были получены такие экзотические ядра, как ${}^{11}\text{Li}$ ($6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$), ${}^{14}\text{Be}$ ($6 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$), ${}^{17}\text{B}$ ($8 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$), ${}^{18}\text{C}$ ($3 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$), ${}^{19}\text{N}$ ($3 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$).

В создании установки КОМБАС, методических разработках и экспериментальных исследованиях участвовал большой интернациональный коллектив физиков и инженеров. Основной вклад внесли: А.Г.Артюх, Г.Ф.Гриднев, Ю.М.Середа, Ю.Г.Тетерев, А.Будзановски, М.Грушецки, Ф.Костельняк, Я.Щмидер, И.Н.Вишневски. Проектирование и создание кинематического сепаратора КОМБАС осуществлялось совместно с НИИЭФА (Санкт-Петербург) и завершено в 1996 году.

8.11. Кластерная радиоактивность

В 1984 году двумя независимо работающими группами в Англии (Оксфордский университет) и в СССР (Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова) был обнаружен новый вид радиоактивного распада – эмиссия ядер ${}^{14}\text{C}$ из ядра ${}^{223}\text{Ra}$. Эмиссия кластеров – ядер легких элементов – сразу же привлекла внимание и теоретиков, и экспериментаторов. Естественно возник вопрос, не могут ли испускаться в виде кластеров ядра тяжелее, чем ${}^{14}\text{C}$. Мощные потоки α -частиц и осколков спонтанного деления от измеряемых препаратов исключали возможность использования для регистрации таких редчайших событий полупроводниковых детекторов, применявшихся в первых экспериментах. Новая методика была разработана в ЛЯР С.П.Третьяковой с сотрудниками. Она базировалась на диэлектрических трековых детекторах, успешно применявшихся в ЛЯР для регистрации актов спонтанного деления тяжелых ядер. Была разработана специальная технология травления и анализа формы протравленных треков, которая позволяла определить заряд кластера с точностью $\Delta Z = \pm 0,15$, его массовое число с точностью $\Delta A = \pm 1$ и энергию с точностью $\sim 3\%$. Детекторы могли работать в условиях, когда интегральный фон α -частиц составлял $\sim 10^{16}$, а осколков спонтанного деления $\sim 10^6-10^7$ на см^2 . Площадь детекторов могла достигать тысячи квадратных сантиметров, что обеспечивало исключительно высокую чувствительность.

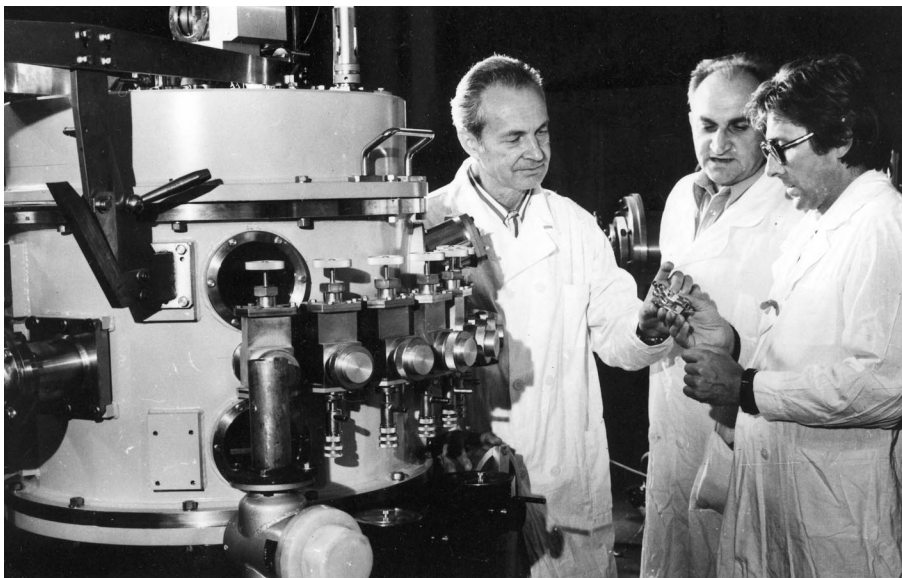
В опытах с ${}^{231}\text{Pa}$, ${}^{230}\text{Th}$, ${}^{233}\text{U}$ и ${}^{230}\text{U}$ была зарегистрирована эмиссия ядер ${}^{24}\text{Ne}$, в опытах с ${}^{234}\text{U}$ эмиссия ядер ${}^{24}\text{Ne}$ и ${}^{28}\text{Mg}$. Вылет ионов ${}^{28}\text{Mg}$ наблюдался и для легкого изотопа плутония ${}^{236}\text{Pu}$. Особый интерес представляло наблюдение эмиссии ядер ${}^{34}\text{Si}$ из ${}^{242}\text{Cm}$. Дело в том, что если для ядер легче ${}^{34}\text{Si}$ процесс эмиссии кластеров был подобен эмиссии α -частиц, то для эмиссии ядер ${}^{34}\text{Si}$ наблюдались особенности, близкие к спонтанному делению. ${}^{34}\text{Si}$ лежат как бы на границе перехода от неадиабатического процесса эмиссии кластеров, подобного эмиссии α -частиц, к адиабатическому процессу, подобному спонтанному делению. В работах по изучению кластер-

ной радиоактивности принимали участие: Ю.С.Замятнин, В.Л.Михеев, А.А.Оглоблин, Ю.Ц.Оганесян, А.Сандунеску, Д.Н.Поенару, Г.А.Пик-Пичак, С.Г.Кадменский, В.И.Фурман, Ю.М.Чувильский.

8.12. Оболочечные эффекты в реакциях глубоконеупругих передач

Для дальнейших исследований свойств РГНП на циклотроне У-400 в Институте ядерной физики им. Х.Неводничански в Кракове (Польша) была создана специальная камера рассеяния. В камере размещались $\Delta E, E$ телескопы из полупроводниковых детекторов, позволявшие измерять энергетические спектры и угловые распределения продуктов РГНП. Камера соединялась с магнитным анализатором, что давало возможность измерять выходы изотопов легких элементов – продуктов РГНП. Специальное уплотняющее соединение с металлической лентой (фосфористая бронза) обеспечивало сохранение вакуума в установке при угловых перемещениях магнита анализатора.

Наиболее важный полученный научный результат состоял в наблюдении оболочечных эффектов в выходах продуктов РГНП и выявлении особой роли α -кластерной конфигурации ДЯС. Массовое распределение продуктов РГНП характеризовалось обычно спадом выхода продуктов реакции по мере их удаления по Z и A от Z и A налетающего ядра. Выходы изотопов легких элементов тогда не измерялись. Впервые такие измерения были сделаны в ЛЯР в реакциях $^{nat}\text{Ag}+^{40}\text{Ag}$ (285 МэВ) и $^{197}\text{Au}+^{40}\text{Ag}$ (290 МэВ). Для угла вылета 40° были измерены сечения образования изотопов элементов от Cl до Ne . Наблюдалась необычная для РГНП картина. Сечения в зависимости от Z и N вначале монотонно уменьшались по мере удаления по A и Z от исходного ядра ^{40}Ag . Однако, начиная с кислорода, выход начал резко возрастать для ядер



Камера рассеяния
Слева направо: В.В.Волков, А.Поморски и В.Карч (Польша)

с замкнутыми протонными и нейтронными оболочками. Для ^{16}O выход оказался в два раза больше, а для ^{12}C в четыре раза больше, чем выход предшествующего им изотопа ^{19}F . Особо мощный пик в выходе имел место для ^4He . Он более чем в 100 раз превосходил выход любого другого изотопа, хотя по A и Z ядро ^4He было наиболее удалено от исходного бомбардирующего ядра ^{40}Ar . Энергетические спектры изотопов гелия ^3He , ^4He , ^6He имели форму, характерную для РГНП. Сечения их образования подчинялись той же Q_{gg} -систематике, что и сечения образования изотопов элементов от лития до азота. Известно, что Q_{gg} -систематика является характерной особенностью РГНП.

Высокий вклад ядер ^6O , ^{12}C , ^4He указывал на сильное влияние оболочечной структуры легкого ядра ДЯС на выход соответствующего канала РГНП. В сильно асимметричной ДЯС легкое ядро получает лишь небольшую часть энергии возбуждения системы и оказывается практически в основном состоянии. В этом случае структурные особенности легкого ядра оказывают наиболее сильное влияние на выход продукта РГНП.

^4He – весьма прочно упакованное ядро, первый возбужденный уровень которого выше 20 МэВ. Возможность концентрации такой энергии возбуждения на ^4He мала, и дальнейшая эволюция ДЯС с передачей тяжелому ядру нейтрона или протона от ^4He и образованием вместо него ядер ^3He и ^3H оказывается сильно заторможенной. В результате α -кластерная конфигурация ДЯС становится своеобразным ядерным накопительным кольцом, ее эволюция заканчивается и под действием центробежных сил дает высокий выход ядер He.

В этих исследованиях приняли активное участие сотрудники ЛЯР: А.Г.Артюх, В.В.Волков, Г.Ф.Гриднев, В.Карч, А.Н.Мезенцев, В.Л.Михеев, Л.Поморски, Д.Попеску, А.Попеску.

8.13. Лазерная спектроскопия

Лазерный спектрометр высокого разрешения был создан в ЛЯР в 1984 году. Он включал в себя: аргон-ионный лазер непрерывного действия для генерации светового излучения высокой мощности (до сотен ватт), лазер на красителе для выделения излучения с требуемой длиной волны и системой ее сканирования, импульсный лазер на иттрий-алюминиевом гранате с плотностью мощности до 10^8 Вт/см² для атомизации исследуемых образцов, набор камер для реализации взаимодействия лазерного излучения с пучком атомов, детекторы для регистрации резонансно-рассеянного излучения, а также систему записи спектров и их обработки в процессе эксперимента. Частотное разрешение установки находилось на уровне 10^{-7} , ее эффективность соответствовала регистрации одного импульса на детекторе рассеянного излучения при 10^8 атомов, вылетающих из образца. Такие параметры позволяли проводить опыты с образцами, содержащими всего 10^{11} исследуемых атомов, с высокой степенью точности измерять сдвиги и расщепления атомных уровней и определять из них значения зарядовых радиусов ядер и ядерные мультипольные моменты.

За прошедшие годы получен большой объем экспериментальных данных по изменению этих ядерных параметров для цепочек изотопов элементов Na, Ti, Zr, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Hf и U. Эти данные позволили судить о том, как меняются коллективные (зарядовый радиус, квадрупольная деформация) и одночастичные (нуклонные кон-

фигурации) свойства ядер с изменением их нуклонного состава. К наиболее интересным результатам следует отнести:

1) Измерение зарядового радиуса и электрического квадрупольного момента высокоспинового ($J^\pi = 16^+$) изомера в ядре ^{178}Hf . Оказалось, что квадрупольная деформация у изомера такая же, как и у основного состояния, в то же время зарядовый радиус заметно меньше – такой же, как и у ^{176}Hf .

2) В цепочке изотопов Тi (от ^{50}Ti до ^{44}Ti) зарядовые радиусы растут с уменьшением числа нейтронов в ядре.

3) На примере радиоактивных изотопов ^{22}Na и ^{24}Na была показана возможность инициирования направленной диффузии (дрейфа) выбранного изотопа в газе атомов под действием лазерного излучения. Направление дрейфа атомов можно регулировать, изменяя длину волны лазерного излучения.

В выполнении этих работ принимал участие большой коллектив сотрудников ЛЯР из различных стран-участниц ОИЯИ: Ю.П.Гангрский, Б.Н.Марков, С.Г.Земляной, Г.В.Мышинский, Л.М.Мельников, И.М.Ермолаев (Россия); Э.Г.Наджаков, К.П.Маринова, А.Я.Анастассов, Д.В.Караиванов, Чан Конг Там, Хоанг Тхи, Ким Хуэ, З.Блашак, С.Хойнацки, Б.К.Кульджанов, В.И.Жеменик, Ч.Градечны, Т.Тетчал. Значительная часть работы выполнена в сотрудничестве с научными центрами России, Польши, Франции, Финляндии, Великобритании.

9. Радиохимические исследования

Г.Н.Флёров с самого начала работ с тяжелыми ионами подчеркивал перспективность использования химических методов для решения ряда предстоящих ядерно-физических и технических задач и принципиальную важность изучения химических свойств новейших элементов. В последнем случае наиболее интересны возможные отклонения химических свойств от результатов экстраполяции «по Менделееву» из-за резкого возрастания релятивистского характера атомных электронов при больших Z .

В ЛЯР постепенно сложился коллектив химиков, в котором кроме российских сотрудников длительное время работали и (или) продолжают работать радиохимики из Чехии, Германии, Польши, Китая, Вьетнама, КНДР, Румынии, Кубы, Болгарии и других стран-участниц ОИЯИ, а также из Франции и Швейцарии.

9.1. Химия и радиохимия в водных растворах

Одной из важнейших задач радиохимиков остается тонкая очистка мишенных материалов, прежде всего миллиграммовых количеств высокоактивных трансурановых изотопов, получаемых на реакторах, и изготовление из них мишеней, стойких в интенсивных потоках тяжелых ионов (К.А.Гаврилов, Ю.С.Короткин, Г.В.Букланов). Важная тема – эффективная регенерация дорогостоящих разделенных изотопов (В.Я.Лебедев), используемых в качестве бомбардирующих частиц, например ^{48}Ca (см. выше пп. 8.1–8.6).

Большой объем исследований был посвящен совершенствованию и развитию эффективных методов выделения и разделения радиоэлементов экстракционными, ионообменными и другими методами радиохимии растворов, для чего необходимо