



честве источника получения сверхтяжелых элементов. Если в реакции  $^{238}\text{U}+^{40}\text{Ar}$  в качестве осколков деления образуются ядра с массой, превышающей 200 единиц, то в реакциях  $^{238}\text{U}+^{136}\text{Xe}$  и  $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$  можно было ожидать образования ядер-осколков, которые принадлежат предсказываемой теорией области сверхтяжелых элементов.

В изучении процесса деления ядер в реакциях с тяжелыми ионами принимали участие С.А.Карамян, Ф.Нормуратов, Ю.Э.Пенионжкевич, Б.И.Пустыльник.

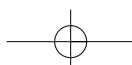
### **3.8. Изучение реакций многонуклонных передач**

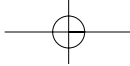
Уже в первых экспериментах с тяжелыми ионами были зарегистрированы радиоактивные продукты ( $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ), образование которых связано с передачей нейтрона от налетающего ядра к ядру-мишени. Они были позитронными излучателями с удобными для детектирования периодами полураспада. С началом экспериментов на циклотроне У-300 Г.Н.Флёров предложил использовать для изучения реакций подхвата 2-х и 3-х нейтронов регистрацию ядер  $^{17}\text{N}$  ( $T_{1/2} = 4,17$  с), которые излучают запаздывающие нейтроны. В соответствующем пробнике мишень располагалась рядом с детектором нейтронов. Мишень облучалась в течение 15 секунд, затем снималось высокочастотное напряжение на дуантах циклотрона и регистрировалась спадающая во времени нейтронная активность. При облучении Al, Cu, Ta зарегистрированы запаздывающие нейтроны с периодом полураспада 4 с. Для реакций подхвата 2-х и 3-х нейтронов ( $^{15}\text{N}$ ,  $^{17}\text{N}$ ), ( $^{14}\text{N}$ ,  $^{17}\text{N}$ ) были измерены функции возбуждения в довольно широком интервале энергий. Впервые наблюдалась реакция срыва 3-х протонов ( $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{17}\text{N}$ ) и реакция обмена нуклонами ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{N}$ ). Сравнение сечений реакций подхвата 1, 2- и 3-х нейтронов показало, что они убывают медленно. Это открывало путь к использованию реакций подхвата для получения новых нейтроноизбыточных изотопов легких элементов.

При изучении реакций передачи нуклонов обычно регистрировался лишь один радиоактивный нуклид. В ЛЯР впервые была получена информация о «спектре» реакций многонуклонных передач. Используя методы радиохимии и  $\gamma$ -спектроскопии в реакциях  $^{181}\text{Ta}+^{22}\text{Ne}$  и  $^{159}\text{Tb}+^{20}\text{Ne}$ , было выделено и идентифицировано больше 30 радионуклидов, которые могли образоваться в реакциях срыва, подхвата и обмена нуклонами. Впервые наблюдались реакции передачи, в которых от ядра к ядру передавалось до двух десятков нуклонов. Была построена первая систематика сечений реакций многонуклонных передач в зависимости от числа переданных протонов и нейтронов. Экспериментальные работы возглавлял В.В.Волков, в них участвовали Л.Поморски, Я.Тыс, Я.Вильчински, П.Децовски, В.Грохульски, Т.Квечинска, Э.Лоевски, И.Брандштеттер, Я.Малы.

## **4. Экспериментальные исследования на выведенных пучках циклотрона У-300**

Прогресс ядерно-физических исследований с тяжелыми ионами потребовал создания крупных экспериментальных установок, в которых использовались магнитный анализ и сложные детекторные системы. Такие установки позволяли получать достаточно полную информацию об изучаемом ядерном процессе и свойствах продуктов





реакций, представлявших особый интерес. Крупные установки, естественно, могли работать только на выведенном пучке тяжелых ионов.

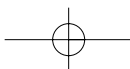
Вывод тяжелых ионов из циклотрона У-300 был непростой задачей. Большая энергия ионов и сравнительно малое отношение заряда иона к его массе требовали высокого,  $\sim 100$  кВ, напряжения на дефлекторе, а большая длина дефлектора вела к дефокусировке пучка. Была разработана специальная форма дефлектора, которая обеспечивала малую угловую расходимость выведенного пучка и высокий коэффициент вывода. Коммутирующий магнит давал возможность направлять пучок ионов на любую из экспериментальных установок. Локальная радиационная защита, установленная вокруг каждой из установок, позволяла вести подготовку к эксперименту во время проведения экспериментов на других установках.

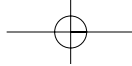
#### ***4.1. Новые нейтроноизбыточные изотопы легких элементов, полученные в реакциях многонуклонных передач***

Для изучения реакций многонуклонных передач и получения новых нейтроноизбыточных изотопов легких элементов была создана детекторная система, в которой впервые использовалась комбинация магнитного анализа и измерение удельной ионизации и энергии продуктов реакций передачи. В фокус магнитного анализатора был помещен телескоп из тонкого кремниевого детектора для измерения удельной ионизации  $\Delta E$  и детектора полного поглощения энергии  $E$ . Такая система позволяла надежно разделять изобары соседних легких элементов, находящиеся в одном и том же зарядовом состоянии. Разрешение по массам еще больше возросло после отбора по времени пролета продуктами реакции определенной геометрической базы.

Исходя из медленного убывания сечений подхвата нейтронов с их числом (пп. 3.8), был поставлен опыт с целью получения ранее неизвестного нуклида  $^{22}\text{O}$  в реакции подхвата 4-х нейтронов при облучении  $^{232}\text{Th}$  ионами  $^{18}\text{O}$  (1970 г.). Действительно, впервые был зарегистрирован изотоп  $^{22}\text{O}$ , что указывало на его ядерную (нуклонную) устойчивость. Одновременно обнаружены новые нейтроноизбыточные нуклиды  $^{20}\text{N}$  и  $^{18}\text{C}$ , образование которых было обязано реакциям обмена нуклонами между столкнувшимися ядрами:  $(-1p, +3n)$ ,  $(-2p, +2n)$ . Зарегистрированы также самые тяжелые из известных изотопы бора и бериллия  $^{14}\text{B}$  и  $^{12}\text{Be}$  из реакций многонуклонных срывов:  $(-3p, -1n)$ ,  $(-4p, -2n)$ . Таким образом, для получения новых нейтроноизбыточных изотопов легких элементов оказалось возможным использовать не только реакции подхвата нейтронов, но и многонуклонные срывы и обмен нуклонами между ядрами.

В последующих экспериментах мишень из  $^{232}\text{Th}$  облучалась ионами  $^{22}\text{Ne}$  (174 МэВ). Были получены еще более тяжелые изотопы кислорода  $^{23}\text{O}$  и  $^{24}\text{O}$ , новый изотоп азота  $^{21}\text{N}$ , новые изотопы фтора и неона:  $^{23}\text{F}$ ,  $^{24}\text{F}$ ,  $^{25}\text{F}$ ,  $^{25}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Ne}$ . Особенно эффективным оказалось облучение  $^{232}\text{Th}$  ионами  $^{40}\text{Ar}$  (290 МэВ). В одном эксперименте было зарегистрировано 14 новых нейтроноизбыточных изотопов Mg, Al, P, S и Cl. Используя ионы  $^{11}\text{B}$  и  $^{15}\text{N}$ , удалось получить все самые тяжелые из известных изотопы — He, Li, Be и B.





В результате получены следующие нейтроноизбыточные изотопы легких элементов:

Известные нуклиды	$^8\text{He}$	$^{11}\text{Li}$	$^{14}\text{Be}$	$^{15}\text{B}$	$^{17}\text{C}$	$^{19}\text{N}$	$^{21}\text{O}$	$^{22}\text{F}$	$^{24}\text{Ne}$	$^{28}\text{Mg}$	$^{30}\text{Al}$	$^{32}\text{Si}$	$^{34}\text{P}$	$^{38}\text{S}$	$^{40}\text{Cl}$
Новые нуклиды					$^{18}\text{C}$	$^{20}\text{N}$	$^{22}\text{O}$	$^{23}\text{F}$	$^{25}\text{Ne}$	$^{29}\text{Mg}$	$^{31}\text{Al}$	$^{33}\text{Si}$	$^{35}\text{P}$	$^{39}\text{S}$	$^{41}\text{Cl}$
					$^{20}\text{C}$	$^{21}\text{N}$	$^{23}\text{O}$	$^{24}\text{F}$	$^{26}\text{Ne}$	$^{30}\text{Mg}$	$^{32}\text{Al}$	$^{34}\text{Si}$	$^{36}\text{P}$	$^{40}\text{S}$	$^{42}\text{Cl}$
							$^{24}\text{O}$	$^{25}\text{F}$			$^{33}\text{Al}$	$^{35}\text{Si}$	$^{37}\text{P}$		
												$^{36}\text{Si}$	$^{38}\text{P}$		

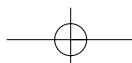
Была установлена важная закономерность в сечениях образования ядер в реакциях многонуклонных передач, получившая название  $Q_{gg}$ -систематики. Она позволила выявить ядерную (нуклонную) нестабильность тяжелого изотопа гелия —  $^{10}\text{He}$ .

Пионерские работы по получению изотопов легких элементов с большим избытком нейтронов в реакциях многонуклонных передач имели международный резонанс. В 1975 году эти работы в комплексе с другими исследованиями, проведенными в ЛЯР, были отмечены Государственной премией СССР. Их активными участниками были: А.Г.Артюх, В.В.Авдейчиков, Я.Вильчински, В.В.Волков, Г.Ф.Гриднев, В.Л.Михеев.

#### 4.2. Открытие реакций глубоконеупругих передач

При изучении взаимодействия тяжелых ионов с ядрами был открыт новый, не предсказывавшийся теорией класс ядерных реакций — глубоконеупругие передачи (РГНП). Этот класс ядерных реакций мог реализоваться только в столкновениях двух сложных ядер. Своеобразие РГНП состояло в том, что в их механизме тесно переплетались динамические и статистические закономерности, характерные для двух полярных ядерных процессов: прямых реакций и распада возбужденного составного ядра. Как и в прямых ядерных реакциях, в РГНП сохранялась сильная связь между входным и выходным каналами реакции. Продукты РГНП «не забывали» ни направления движения исходных ядер, ни их атомных номеров и массовых чисел. Вместе с тем энергетические спектры продуктов РГНП, как и при распаде возбужденного составного ядра, не зависели от кинетической энергии столкновения и определялись лишь выходными кулоновскими барьерами. Дисперсия массовых и зарядовых распределений РГНП была весьма значительна, напоминая массовую и зарядовую дисперсию осколков деления. Своеобразие механизма РГНП было обусловлено формированием в столкновении двух ядер специфического ядерного комплекса — двойной ядерной системы (ДЯС). В ДЯС ядра интенсивно взаимодействуют друг с другом и вместе с тем благодаря оболочечной структуре сохраняют свою индивидуальность. Открытие РГНП дало толчок к разработке новых теоретических подходов к анализу взаимодействия двух сложных ядер. И в прямых реакциях и при распаде возбужденного составного ядра нет явной зависимости состояния ядерной системы от времени, тогда как для состояний ДЯС время — важнейшая переменная. Вместе с РГНП в ядерную физику вошли новые объекты ядерного микромира — эволюционирующие во времени двойные ядерные системы. Открытие РГНП было зарегистрировано в СССР под № 229.

Открытие РГНП вызвало настоящий бум в экспериментальном и теоретическом исследовании этих своеобразных реакций.



#### **4.3. Изучение эмиссии запаздывающих протонов на газонаполненном магнитном сепараторе**

Для более детального изучения запаздывающих протонов и поиска протонного распада из основного состояния В.А.Карнауховым с сотрудниками был создан газонаполненный масс-сепаратор. Масс-сепараторы этого типа ранее использовались для выделения короткоживущих осколков деления. Для быстрого выделения продуктов реакций с тяжелыми ионами такой сепаратор был впервые применен в ЛЯР. Наилучшее разрешение было получено с гелиевым наполнением камеры при давлении от двух до пяти тор и составляло 3,0–3,5%. Эффективность сбора продуктов реакций была на уровне 20%. Время пролета продуктов распада составного ядра от мишени до детектора не превышало  $\sim 10^{-6}$  с. Авторы дали своему прибору название «быстрый электромагнитный сепаратор» (БЭМС).

БЭМС позволил получить обширные данные о запаздывающих протонах для большого числа нейтронодефицитных ядер с атомными номерами более 50. Эта информация позволила, в частности, выявить наиболее реалистические модели, используемые для расчетов масс ядер, удаленных от области  $\beta$ -стабильности. Были получены данные о плотности уровней этих ядер в возбужденном состоянии, удалось выявить особенности гросс-структуры  $\beta^+$ -распадов. В этих экспериментах открыто около 30 новых короткоживущих нуклидов, большая часть которых испускала запаздывающие протоны. В исследованиях принимали участие: И.Бачо, Д.Д.Богданов, И.Воборжил, Ш.Дороци, Я.Жилич, В.А.Карнаухов, Л.А.Петров, А.Плохоцки, М.Новицки, Г.М.Тер-Акопьян.

Много труднее оказалась задача обнаружения протонного распада из основного состояния. Ожидаемый выход таких протонов был мал, а запаздывающие протоны, интенсивность которых была на порядки больше, создавали сильно мешавший измерениям фон. Тем не менее, в результате длительных экспериментов при облучении  $^{96}\text{Ru}$  ионами  $^{32}\text{S}$  (240 МэВ) удалось выделить группу протонов со средней энергией 0,7–0,8 МэВ и периодом полураспада  $0,6 \pm 0,3$  с, которую можно отнести к протонному распаду ядер  $^{121}\text{Pr}$  из основного состояния.

#### **4.4. Исследования с тяжелыми ионами на электромагнитном сепараторе**

Первый масс-сепаратор на пучке тяжелых ионов был создан также в Лаборатории ядерных реакций Н.И.Тарантиным с сотрудниками. Он предназначался для идентификации масс радиоактивных продуктов, образующихся в реакциях с тяжелыми ионами. Масс-сепаратор обладал двойной фокусировкой в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Его дисперсия составляла 11,5 мм на 1% изменения массы, разрешение для масс  $\sim 200$  составляло 2300 на полувысоте пиков соседних изотопов. Газоразрядный ионный источник сепаратора обладал быстродействием  $\sim 5$  мс, обеспечивая возможность регистрации очень короткоживущих радиоактивных изотопов. В выходном фокусе масс-сепаратора были установлены детекторы для регистрации и измерения энергии  $\alpha$ -частиц, осколков спонтанного деления,  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов.

Из полученных результатов следует отметить определение свойств распада  $^{25}\text{Ne}$ , впервые полученного в ЛЯР, в реакции подхвата 3-х нейтронов ( $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{25}\text{Ne}$ ). Для  $^{25}\text{Ne}$  был измерен  $T_{1/2} = 642 \pm 14$  мс и энергетический спектр  $\beta$ -частиц ( $E_{\beta}^{\text{max}} = 7,1 \pm 0,3$  МэВ); также измерены

периоды полураспада для  $^{22}\text{F}$  и  $^{41}\text{Cl}$ , уточнены данные для энергии  $\beta$ -распада  $^{22}\text{F}$ . Для обоих ядер построены схемы распада.

Наряду с исследованиями короткоживущих ядер в режиме on-line с циклотроном У-300, масс-сепаратор предполагали использовать и в классическом варианте для выделения и определения массовых чисел долгоживущих изотопов сверхтяжелых элементов, если они существуют в природе. Для этого был разработан специальный ионный источник, позволявший исключить молекулярные ионы тория и урана с массовыми числами  $\sim 300$ . Обнаружить ядра сверхтяжелых элементов пытались с помощью активации тормозным излучением электронов с максимальной энергией 16 МэВ, ускоряемых на микротроне. Эксперименты показали, что на уровне  $10^{-14}$  г сверхтяжелых элементов на один грамм природного материала (с учетом предварительного химического обогащения) природные сверхтяжелые нуклиды не проявили себя. В этих работах принимали участие: Х.Гурач, А.П.Кабаченко, И.В.Кузнецов, К.Сивек-Вильчинска, Н.И.Тарантин.

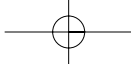
#### ***4.5. Ядерно-физические исследования с использованием широкодиапазонного магнитного анализатора***

В середине 70-х годов на одном из пучков циклотрона У-300 был запущен уникальный магнитный спектрометр МСП-144. Работа проводилась в секторе Ю.Э.Пенионжевича совместно с сотрудниками Института ядерных исследований АН УССР (Киев).

Магнитный анализатор обладал широким энергетическим диапазоном: отношение максимальной и минимальной энергии одновременно регистрируемых частиц составляло 5,2, а длина фокальной плоскости достигала 1,5 метра. При довольно большом телесном угле – 5 мср энергетическое разрешение анализатора составляло  $5 \cdot 10^{-4}$ . Прямые измерения показали, что при размере мишени в 10 мм на фокальную



Магнитный спектрометр



плоскость анализатора попадало ~60% продуктов полного слияния в реакциях с ионами  $^{40}\text{Ar}$ . На установке получен ряд оригинальных данных.

- *Наблюдение высокоэнергетических  $\alpha$ -частиц в реакциях с тяжелыми ионами*

При облучении мишеней из  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Tl}$  и  $^{12}\text{C}$  ионами  $^{22}\text{Ne}$  (178 МэВ) были измерены энергетические спектры изотопов H, He, Li и Be, вылетевших под углом  $0^\circ$ . Впервые обнаружены высокоэнергетические  $\alpha$ -частицы, энергия которых была близка к кинематическому пределу для двухтельного канала реакции. Если в налетающем тяжелом ионе энергия на нуклон составляла 8 МэВ, то в высокоэнергетических  $\alpha$ -частицах она достигала 30 МэВ. Угловое распределение этих  $\alpha$ -частиц было сконцентрировано под малыми углами. Приближение к кинематическому пределу наблюдалось и в энергетических спектрах изотопов лития и бериллия. Анализ полученных данных привел к выводу, что высокоэнергетические  $\alpha$ -частицы могли образоваться в «массивных передачах», когда все нуклоны налетающего ядра, кроме четырех нуклонов, входящих в  $\alpha$ -частицу, передаются ядру-мишени.

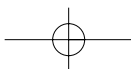
- *Получение и исследование супернейтроноизбыточных ядер легчайших элементов*

Был использован метод недостающих масс, который позволял исследовать стабильность и структуру нуклонно-нестабильных ядер. Облучали  $^9\text{Be}$  ионами  $^{11}\text{B}$  (88 МэВ). В двухчастичных реакциях передачи  $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{16,15,14}\text{O})^{4,5,6}\text{H}$  измеряли спектр изотопов кислорода. Возбужденные уровни у этих изотопов лежат высоко, так что их энергетический спектр давал прямую информацию об энергетических уровнях нуклонно-нестабильных изотопов водорода  $^{4,5,6}\text{H}$ . Для изотопа  $^6\text{H}$  наблюдался несвязанный уровень с энергией  $2,6 \pm 0,5$  МэВ выше нулевой энергии связи в системе  $^3\text{H}+n+n+n$  с шириной  $1,5 \pm 0,5$  МэВ.

Облучение  $^7\text{Li}$  ионами  $^{11}\text{B}$  с регистрацией энергетического спектра изотопов кислорода  $^{15}\text{O}$  и  $^{14}\text{O}$  позволило получить информацию о возможности связанных состояний в ядерных системах, состоящих из трех и четырех нейтронов:  $^7\text{Li}(^{11}\text{B}, ^{15}\text{O})^3n$  и  $^7\text{Li}(^{11}\text{B}, ^{14}\text{O})^4n$ . Для тринейтрона  $^3n$  верхняя граница для образования связанного тринейтрона составила  $10^{-32}$  см $^2$ ·ср $^{-1}$ . Для тетранейтрона  $^4n$  полученные результаты не позволили сделать окончательного вывода.

- *Эксперименты по поиску ядер  $^{10}\text{He}$*

Ядро  $^{10}\text{He}$  длительное время привлекало к себе внимание физиков. Магические числа протонов ( $Z = 2$ ) и нейтронов ( $N = 8$ ), казалось бы, должны обеспечивать нуклонную устойчивость этому ядру. Однако многочисленные попытки разными способами получить ядро  $^{10}\text{He}$  неизменно приводили к отрицательному результату. Удавалось определить лишь верхнюю границу сечения его образования в данной реакции. Высокая чувствительность магнитного анализатора позволяла регистрировать сечение образования легкого продукта реакции вплоть до уровня  $\sim 5 \cdot 10^{-35}$  см $^2$ ·ср $^{-1}$ . Мишени из  $^{232}\text{Th}$  и  $^{\text{nat}}\text{Tl}$  облучались ионами  $^{10,11}\text{B}$ ,  $^{22}\text{Ne}$  с энергией 8–10 МэВ на нуклон. Для углов вылета  $0^\circ$  и  $20^\circ$  были измерены выходы и энергетиче-



ские спектры всех нуклонно-стабильных изотопов гелия:  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$ . Это дало возможность оценить ожидаемый энергетический спектр  $^{10}\text{He}$  в случае его нуклонной стабильности. Далее построена  $Q_{gg}$ -систематика для сечений образования всех изотопов гелия, которая позволила оценить сечение его образования. Наибольшее сечение, на уровне нескольких микробарн, ожидалось в реакции  $^{232}\text{Th}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{He})$ . Однако на опыте  $^{10}\text{He}$  не удалось зарегистрировать на уровне десятых пикобарна.

#### 4.6. Двухплечевой времяпролетный спектрометр продуктов ядерных реакций

Для энергий тяжелых ионов до 10 МэВ на нуклон основными ядерными процессами при использовании мишеней из тяжелых элементов являются: слияние-деление, квазиделение и глубоконеупругие передачи. Все эти процессы имеют двухтельный характер: на выходе реакции формируются два ядра-фрагмента. Одновременная регистрация обоих фрагментов с измерением их зарядов, масс, кинетических энергий и углов вылета дает ценную информацию о механизме ядерного процесса. Эта возможность и была реализована в двухплечевом времяпролетном спектрометре продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами (ДВПС). Спектрометр был создан Ю.Э.Пенионжкевичем с сотрудниками при активном участии сотрудников Центрального института ядерных исследований в Россендорфе (ГДР).

На ДВПС измерены массовые и энергетические спектры большого числа продуктов ядерных реакций, в которых мишени с  $Z$  от 47 до 97 облучались ионами  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{64}\text{Zn}$  различных энергий. Получены оригинальные данные о проявлении оболочечных эффектов как в реакциях глубоконеупругих передач, так и в процессе квазиделения. При облучении мишеней из изотопов Sn ионами  $^{64}\text{Zn}$  в массовом распределении продуктов реакций глубоконеупругих передач доминировала масса, соответствующая олову. В энергетическом распределении возникал максимум при энергии ниже выходного кулоновского барьера, свидетельствующий о сохранении индивидуальности исходных ядер после полной диссипации кинетической энергии столкновения. В реакции  $^{139}\text{La}+^{64}\text{Zn}$  этот максимум не наблюдался.

При облучении  $^{232}\text{Th}$  ионами  $^{40}\text{Ar}$  с энергиями вблизи кулоновского барьера в массовом распределении наблюдался максимум, соответствующий распаду ядерной системы на два фрагмента, одним из которых является дважды магическое ядро  $^{208}\text{Pb}$ . Анализ потенциальной энергии двойной ядерной системы как функции ее массовой асимметрии показал, что для конфигурации, в которой одно из ядер системы  $^{208}\text{Pb}$ , в потенциальной энергии имеется заметный минимум, который мог препятствовать эволюции системы к симметричной конфигурации. Таким образом и в квазиделении, которое является доминирующим каналом в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{40}\text{Ar}$ , четко наблюдается проявление оболочечных эффектов, если энергия столкновения слегка выше кулоновского барьера. Первые указания на проявление оболочечных эффектов в квазиделении были получены этим коллективом ранее при изучении массового распределения осколков деления (квазиделения) в реакции  $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ .

Установка ДВПС успешно использовалась для изучения характеристик процесса деления в широком диапазоне изменения параметра  $Z^2/A$ . Мишени из  $^{183}\text{W}$ ,  $^{198}\text{Pt}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{249}\text{Cf}$  облучались ионами  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ . Изучались массовые и энергетические распределения осколков деления возбужденных ядер от

Hg до 108 элемента. Проведенные измерения четко выявили два процесса, которые приводят к образованию ядер-осколков: истинное деление, связанное с полным слиянием ядер и формированием составного ядра, и квазиделение, при котором полного слияния ядер не происходит. Истинное деление доминирует при большой массовой асимметрии сталкивающихся ядер ( $A_1/A_2 < 10$ ), квазиделение, напротив, при малой ( $A_1/A_2 > 10$ ) и значениях параметра  $Z^2/A > 0,9$ . В процессе измерений установлено, что суммарная кинетическая энергия осколков не зависит от энергии возбуждения составного ядра и величины углового момента столкновения. В создании ДВПС и проведении на нем экспериментов участвовали: В.Зайдель, Х.Зодан, С.М.Лукиянов, П.Манфрас, Ю.Э.Пенионжкевич, Ф.Стари, К.Д.Шиллинг, Г.Г.Чубарян, П.Гиппнер, К.Борча, Ю.Э.Саламатин, Э.Вилл.

#### 4.7. Изучение процесса деления тяжелых ядер

Выведенный пучок открыл широкие возможности для более глубокого изучения процесса деления возбужденных составных ядер, формирующихся в реакциях с тяжелыми ионами. Были созданы экспериментальные установки, в которых можно измерять энергетические спектры и угловые распределения осколков деления, а также множественность нейтронов, испущенных в процессе деления. В экспериментах, руководимых Ю.Ц.Оганесяном, получен ряд важных данных о процессе деления возбужденных тяжелых ядер.

- *Открытие каскадного деления*

Указание на возможность тройного деления тяжелого ядра с образованием трех осколков сравнимой массы было получено ранее при облучении тория ионами  $^{40}\text{Ar}$  (400 МэВ). Тонкий слой тория помещался между пластинок слюды. После облучения слюду протравливали и под микроскопом искали трехлучевые звезды. В ЛЯР поиск тройного деления проведен на значительно более высоком экспериментальном уровне. Три осколка из одного акта деления регистрировались тремя полупроводниковыми поверхностно-барьерными детекторами, включенными в схему быстрых совпадений. Это позволило не только фиксировать акт образования трех осколков, но и, что очень важно, измерять их индивидуальную и суммарную кинетическую энергию. Мишени из  $^{197}\text{Am}$ ,  $^{209}\text{Bi}$  и  $^{238}\text{U}$  облучались ионами  $^{22}\text{Ne}$  и  $^{40}\text{Ar}$  с энергией до 8 МэВ на нуклон. Детальный анализ полученных данных позволил выявить два механизма образования трех осколков в одном акте деления: «истинное» тройное деление, в котором три осколка сравнимой массы образуются при распаде исходного возбужденного составного ядра, и «каскадное» деление, в котором при сильно асимметричном двойном делении тяжелый осколок, обладающий высокой энергией возбуждения, в свою очередь делится примерно пополам. Было установлено, что при высокой энергии возбуждения и в реакциях с ионами  $^{40}\text{Ar}$  доминирует механизм «каскадного» деления.

- *Определение критического значения параметра делимости  $Z^2/A$*

Теоретический анализ показал, что существует однозначная связь между формой делящегося ядра в седловой точке и анизотропией углового распределения осколков





деления. С увеличением  $Z^2/A$  эта форма все больше приближается к сферической. Однако с помощью легких бомбардирующих частиц не удавалось достичь значений этого параметра больше 38. Использование же ионов  $^{40}\text{Ag}$  для облучения  $^{238}\text{U}$  позволило реализовать  $Z^2/A = 43,5$ . В результате облучений  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{209}\text{Bi}$  и  $^{238}\text{U}$  ионами  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$  и  $^{40}\text{Ag}$  удалось показать, что критическое значение параметра, при котором ядро теряет устойчивость к делению даже в сферической форме, равно  $(Z^2/A)_{\text{крит}} = 46 + 1$ . Жидкокапельная модель с резкими краями для поверхности ядра давала значения  $(Z^2/A)_{\text{крит}}$ , равное 50, что противоречило данным экспериментов. Расхождение удалось устранить после учета в теории кривизны диффузной ядерной поверхности. Совпадение расчетных и экспериментальных данных свидетельствовало о том, что термодинамическое равновесие в делящейся системе в седловой точке определяет вид углового распределения осколков деления.

- *Множественность нейтронов, испускаемых при делении*

Созданная в ЛЯР аппаратура позволила впервые экспериментально измерить среднюю множественность нейтронов, испускаемых при делении тяжелого сильно-возбужденного ядра  $\bar{\nu}_f$ . Мишени из  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{209}\text{Bi}$  и  $^{238}\text{U}$  облучались ионами  $^{16}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ . Энергия возбуждения составных ядер лежала в интервале от 50 до 109 МэВ. Была получена примерно линейная зависимость числа испущенных нейтронов от энергии возбуждения составного ядра. Экстраполяция этой зависимости к нулевой энергии возбуждения давала величину  $\bar{\nu}_f$ , близкую к среднему числу нейтронов на акт спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$ . Сравнения  $\bar{\nu}_f$ , полученных прямым измерением с  $\bar{\nu}_f$ , извлеченных из данных по массовому и зарядовому распределению осколков деления, демонстрировало их совпадение в пределах погрешности измерений.

В работах по изучению процесса деления в реакциях с тяжелыми ионами, проводившихся под руководством Г.Н.Флёрова и Ю.Ц.Оганесяна, принимали участие С.А.Карамян, Ю.Э.Пенионжкевич, Б.И.Пустыльник, И.В.Кузнецов, Ф.Нормуратов и др.

## 5. Первые попытки синтеза сверхтяжелых элементов

Предложенный В.М.Струтинским в середине 60-х годов метод вычисления оболочечной поправки к жидкокапельной массе атомного ядра открыл путь к реалистичным расчетам барьеров деления тяжелых ядер. Тогда же Б.Нильсон пришел к выводу, что ближайшая новая протонная оболочка не тривиальное  $Z = 126$ , а гораздо более близкое и достижимое  $Z = 114$ . На этой базе теоретиками оценивались периоды полураспада ядер в области  $Z = 108-114$  и  $N \sim 184$ . Реальная неопределенность таких расчетов составляла несколько порядков, но все они предсказывали, что здесь должен существовать некий «остров стабильности» ядер относительно спонтанного деления, окруженный гораздо более короткоживущими нуклидами. Периоды полураспада порядка секунд или часов представлялись вполне вероятными. В нескольких мировых лабораториях были предприняты попытки получения этих «сверхтяжелых

