

Трехметровый циклотрон У-300 — первый ускоритель ЛЯР

В целом создание специализированного циклотрона оказалось удачным решением проблемы получения пучков тяжелых ионов для проведения ядерно-физических, химических и прикладных исследований. На протяжении более полутора десятка лет циклотрон У-300 был наиболее мощным ускорителем тяжелых ионов как по интенсивности пучков, так и разнообразию ускоряемых ионов.

3. Научные исследования, проводившиеся на внутренних пучках циклотрона У-300

Тяжелые ионы открывали широкие перспективы для новых научных направлений в ядерной физике. Основными направлениями конкретных научных исследований в ЛЯР стали: синтез новых трансурановых элементов, изучение ядерных реакций с тяжелыми ионами, получение экзотических ядер, в которых могли наблюдаться новые виды радиоактивного распада.

3.1. Открытие элементов 102 и 103

Опыты по получению новых химических элементов Г.Н.Флёров с сотрудниками начал еще во второй половине 50-х годов на 150-сантиметровом циклотроне нынешнего РНЦ «Курчатовский институт». Коллектив, состоявший в основном из молодых физиков и химиков, был нацелен на синтез элемента 102 в реакции $^{241}\text{Pu}(^{16}\text{O}, 4-6n)^{251-253}102$. Так был приобретен первый опыт в решении экспериментальных проблем, которые и поныне остаются актуальными. Это все более низкие эффективные сечения реакции синтеза — сегодня доли пикобарна, все более низкие относительные выходы искоемых ядер — ныне до 10^{-12} и, наконец, необходимость выполнять идентификацию все быстрее, чтобы охватить времена жизни до микросекунд физическими методами и доли секунды — химическими. Поэтому требуется непрерывно повышать интенсивность пучков — до мощностей в доли киловатта,

создавать мишени и установки, выдерживающие тепловые и радиационные нагрузки. Необходимо было разрабатывать и совершенствовать высокоселективные физические и химические методы для предварительной очистки новых элементов от нежелательных продуктов облучения, мешающих детектированию α -частиц и осколков спонтанного деления, а сами детекторы должны обладать исключительной селективностью, высоким разрешением и стабильностью.

С начала 60-х годов опыты по синтезу 102-го элемента продолжились уже в Дубне, на циклотроне У-300, до 1966 года – на внутреннем пучке. Кроме трудностей с сильными магнитным и высокочастотным полями, очень серьезной проблемой оказалась высокая α -активность изотопов Po–Fm, образующихся в реакциях с ничтожными примесями свинца (10^{-8} г) в мишени. Они мешали измерению α -частиц элемента 102, для которых ожидалась энергия в сходном диапазоне. Потребовались особые меры против загрязнения свинцом.

К этому времени существовали публикации группы ученых из Швеции, США и Англии (1957 г.) об открытии элемента 102 на циклотроне в Стокгольме и работа группы из Беркли, США (1958 г.), в которой шведская работа опровергалась и выдвигалась своя заявка на открытие. В Беркли нацеливались на реакцию синтеза $^{244,246}\text{Cm}(^{12}\text{C},xn)^{254}102$ и идентификацию нуклида по дочернему ^{250}Fm по примеру классических исследований природных радиоактивных рядов (сравни ниже опыты Е.Д.Донца и др. в ЛЯР). Было заявлено, что получен изотоп $^{254}102$ с $T_{1/2} \sim 3$ с.

В первых опытах по 102-му элементу в ЛЯР надеялись воспроизвести американские данные и получить другие изотопы (С.М.Поликанов и др.). Ввиду трудностей с фоновыми α -активностями, вначале попытались обнаружить элемент 102 по спонтанному делению и идентифицировать изотоп с помощью перекрестных реакций. Однако короткоживущий ($T_{1/2} = 14$ мс) спонтанно-делящийся нуклид, обнаруженный в первых же опытах, оказался ядром ^{242}Am в особом изомерном состоянии (см. ниже пп. 3.4).

Затем для синтеза 102-го элемента была использована реакция $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{256}102$ с регистрацией известного дочернего ядра ^{252}Fm , $T_{1/2} = 22$ час (Е.Д.Донец и др.). В созданном оригинальном устройстве (рис. 1) продукты ядерных реакций выбивались из мишени в объем, заполненный аргоном. Они диффундировали и осаждались на стенках прямоугольной канавки по ободу непрерывно вращающегося диска, который их транспортировал в зону сбора продуктов α -распада. Эти атомы отдачи на $\sim 50\%$ срывались с поверхности, будучи при этом ионизованными, что позволило собирать их электрическим полем на поверхность сборника.

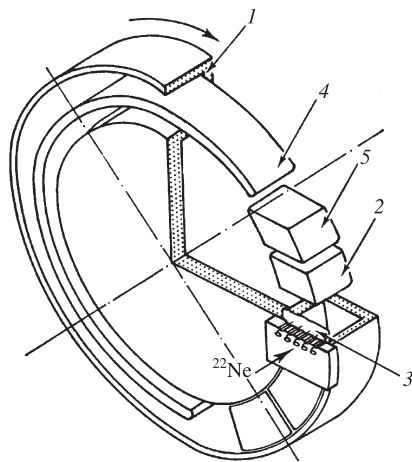


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для идентификации 102-го элемента:

1 – медный диск с канавкой; 2 – ограничители объема мишени; 3 – сборник продуктов; 4 – мишень; 5 – электростатические ограничители

После окончания длительного облучения сборник делили на несколько частей и радиохимическими методами извлекали ^{252}Fm . Период полураспада $^{256}102$ оказался равным нескольким секундам. Это был первый результат, неопровержимо доказывающий получение 102-го элемента. В дальнейшем и другие дубненские группы продолжили изучение изотопов 102-го элемента и смогли также измерить энергии испускаемых ими α -частиц. Всего в работах, опубликованных в 1964–1966 годах, было синтезировано пять изотопов 102-го элемента с массовыми числами от 252 до 256 и $T_{1/2}$ от 4 с до 3 мин. Все их характеристики были определены правильно. Ни один из этих изотопов не имеет свойств, указанных в свое время (1958 г., 1961 г.) авторами из Беркли, которые это не смогли убедительно объяснить¹.

Исследования ЛЯР по 102-му элементу – выдающееся достижение молодого научного коллектива. Открытие 102-го элемента зарегистрировано в Государственном реестре открытий СССР под № 34 как «Явление образования изотопа 102-го элемента», авторы: Е.Д.Донец, В.А.Щеголев, В.А.Ермаков. Эти работы получили заслуженное международное признание в решениях комиссии экспертов по приоритету в открытии элементов, учрежденной Международными союзами по чистой и прикладной химии и физике IUPAC и IUPAP – «Группы Вилкинсона»². Эта группа однозначно присудила приоритет в открытии элемента 102 в сумме двух работ³.

Экспериментальные методы, развитые для детального изучения элемента 102, применяли и для элемента 103, где добавочные осложнения вызывались более сложной структурой спектров α -излучения. Цикл работ ЛЯР по синтезу 103-го элемента был зарегистрирован в СССР как открытие за № 132 «Явление образования 103-го элемента Периодической системы Д.И.Менделеева», авторы: Г.Н.Флёров, С.М.Поликанов, В.Л.Михеев, В.А.Друин, Е.Д.Донец, А.Г.Демин, Ю.С.Короткин, Ю.В.Лобанов, В.А.Щеголев. Группа Вилкинсона посчитала, что полная уверенность в получении элемента 103 появилась лишь в результате интенсивной работы в течение целого десятилетия лабораторий в Беркли и Дубне. Поэтому обе эти лаборатории разделяют заслуги в открытии элемента.

¹ Flerov G.N., Zvara I., Donets E.D., Ter-Akopian G.M., Schegolev V.A., Mikheev V.L. A history and analysis of the discovery of element 102 // *Radiochimica Acta*. 1992. V. 56. P. 111–124; История трансфермиевых элементов // ЭЧАЯ. 1991. Т. 22. С. 932–992.

² Barber R.C., Greenwood N.N., Hryniewicz A., Jeannin Y.P., Lefort M., Sakai M., Ulehla I., Wapstra A.H., Wilkinson D.H. Discovery of the transfermium elements // *Progress in Particle and Nuclear Physics*. 1992. V. 29. P. 453–530.

Wilkinson D.H., Wapstra A.H., Ulehla I., Barber R.C., Greenwood N.N., Hryniewicz A., Jeannin Y.P., Lefort M., Sakai M. Criteria that must be satisfied for the discovery of a new chemical element to be recognized // *Pure & Applied Chemistry*. 1991. V. 63. P. 879–886.

Wilkinson D.H., Wapstra A.H., Ulehla I., Barber R.C., Greenwood N.N., Hryniewicz A., Jeannin Y.P., Lefort M., Sakai M. Discovery of the transfermium elements. Introduction to the discovery profiles. Discovery profiles of the transfermium elements // *Pure & Applied Chemistry*. 1993. V. 65. P. 1757–1814.

³ Донец Е.Д., Щеголев В.А. Ермаков В.А. Свойства изотопа $^{254}102$ // *Атомная энергия*. 1966. Т. 20. С. 223.

Загер Б.А., Миллер М.Б., Михеев В.Л., Поликанов С.М., Сухов А.М., Флёров Г.Н., Челноков Л.П. Свойства изотопа $^{254}102$ // *Атомная энергия*. 1966. Т. 20. С. 230.

3.2. Экспрессная (газовая) радиохимия для трансактиноидных элементов ($Z \geq 104$)

Опыты по синтезу элемента 104 в реакции $^{242}\text{Pu}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{260}104$ были начаты вместе с работами по элементу 102. Существовала уверенность в доминировании спонтанного деления в распаде четно-четных изотопов элемента 104. Но теоретические оценки были слишком неопределенными: для $^{260}104$ от микросекунд до секунд. Отсюда важность опытных данных как для совершенствования теории, так и для поиска еще более тяжелых элементов.

Спонтанно-делящиеся изотопы новых элементов привнесли специфические затруднения в идентификацию их массового числа и атомного номера. Между тем, в то время как предшествующие тяжелые трансураны были трехвалентными металлами – «актиноидами», элемент 104 должен был быть четырехвалентным и попасть в 4-ю группу менделеевской таблицы, к Zr и Hf. Экспериментальное подтверждение того, что 103-й элемент является последним актиноидом, имело как фундаментальное, так и прикладное значение – большая разница химических свойств давала надежду на селективное химическое выделение элемента 104 из смеси продуктов облучения. Но существовавшие тогда классические радиохимические методы позволяли выделять Zr и Hf лишь циклически с затратой не менее нескольких минут.

Задачу гораздо более эффективного и быстрого выделения атомов 104-го элемента решил И.Звара с сотрудниками разработкой принципиально нового метода, основанного на взаимодействии атомов отдачи – продуктов ядерных реакций с химически активными газами и на транспортировке и разделении соединений в газообразном виде (рис. 2). Все операции осуществлялись в виде непрерывного процесса. Химиче-

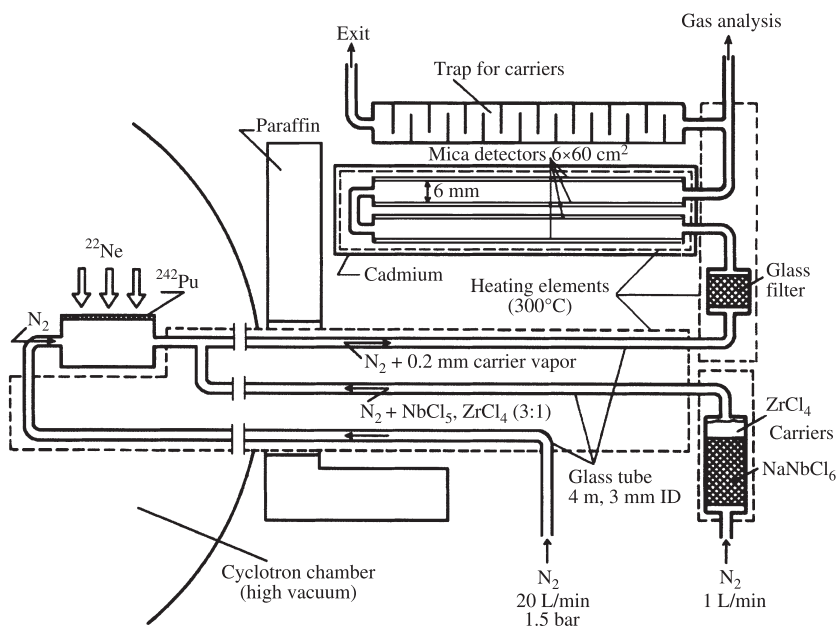


Рис. 2. Первая установка для химической идентификации спонтанно-делящихся изотопов элемента 104 (масштаб не соблюден). Объяснения см. в тексте

ской основой метода была относительно высокая летучесть безводных хлористых соединений элементов 4-й группы, которые, оставаясь при умеренных температурах в газовой фазе, отделялись от практически нелетучих хлоридов актиноидов.

В качестве хлорирующих агентов и «носителей» использовались пары хлоридов Zr и Nb. Рабочая температура газового тракта была около 300 °С, рабочее давление 1,5 атм. Тяжелые ионы попадали на мишень, проходя через входное окно из алюминиевой фольги толщиной 6 мкм. Мишень имела размер около 2 см², длина аппаратуры была около 4 м. Быстродействие выделения элемента могло достигать 0,3 с. Использовались слюдяные трековые детекторы осколков деления, которые после длительного эксперимента протравливали и сканировали на наличие треков с помощью оптического микроскопа. Распределение треков вдоль камеры позволяло оценить период полураспада.

3.3. Открытие элементов 104 и 105

Физические опыты по получению ²⁶⁰104 проводили Ю.Ц.Оганесян и др. на установке, в которой продукты ядерных реакций вбивались в непрерывно движущуюся ленту. Она их транспортировала вдоль длинного ряда трековых детекторов осколков деления ядер. Так регистрировалась сложная кривая распада — результат наложения индивидуальных периодов полураспада нескольких с.д. нуклидов. Поскольку ядра отдачи нежелательных продуктов облучения вылетают в более широком телесном угле, чем продукты полного слияния, введением коллиматоров достигалось заметное подавление мешающих активностей. Затем для отдельных нуклидов измеряли зависимости эффективного сечения от энергии частиц, которые для продуктов полного слияния имеют характерную колоколообразную форму с предсказуемым положением максимума. Эти опыты показали присутствие вовсе не микросекундных с.д. излучателей, а на несколько порядков более долгоживущих активностей. Согласованная интерпретация данных разных лабораторий о периодах полураспада спонтанно-делящихся изотопов элемента 104 потребовала ряда лет.

Первая работа, выполненная в 1964 году, была признана в СССР открытием за № 37 «104-й элемент курчатовий», авторы: Г.Н.Флёров, Ю.Ц.Оганесян, Ю.В.Лобанов, В.П.Перелыгин, В.И.Кузнецов, В.А.Друин, К.А.Гаврилов, С.П.Третьякова, В.М.Плотко.

Между тем в середине 60-х годов в ЛЯР были начаты опыты по синтезу 104-го элемента с использованием химического выделения (см. рис.2). Вскоре, действительно, в газовой фазе, химически очищенной от нелетучих соединений, была обнаружена спонтанно-делящаяся активность (~ 40 распадов) с периодом полураспада ≥ 0,5 с. Неопределенность в оценке значения была связана с настройкой аппаратуры на $T_{1/2}$ в десятые секунды, поэтому детектирование актов деления более долгоживущих нуклидов длилось недостаточно долго. В дальнейшем выяснилось, что регистрировался изотоп ²⁵⁹104 с $T_{1/2}$ ~ 3 с, в основном α-активный, но в ~10% случаев испытывающий спонтанное деление.

В 1967 году Г.Н.Флёров, В.А.Друин, И.Звара и С.М.Поликанов были удостоены Ленинской премии «За синтез и исследование трансурановых элементов».

Группа Вилкинсона признала именно химическую идентификацию открытием элемента 104: «Химические эксперименты в Дубне и (физические) эксперименты,

выполненные в Беркли, были проведены, в сущности, одновременно и каждая доказывают получение элемента 104. Обе эти группы разделяют заслуги в открытии 104-го элемента». Имеются в виду дубненские работы¹.

Опыты по синтезу элемента 105 проводились (Г.Н.Флёрв, Ю.Ц.Оганесян, В.А.Друин и др.) с 1968 года с использованием разнообразных методик для регистрации спонтанного деления и α -активности. В последнем случае был использован богатый опыт исследования элементов 102 и 103. Спонтанно-делящийся изотоп элемента ($T_{1/2} = 2$ с) также выделен методами газовой радиохимии (И.Звара и др.). Работы были признаны в СССР открытием за № 114 «Элемент 105-й Периодической системы Д.И.Менделеева», авторы: Г.Н.Флёрв, Ю.Ц.Оганесян, Ю.В.Лобанов, Ю.А.Лазарев, Б.З.Белов, В.А.Друин, А.Г.Демин, Ю.П.Харитонов, И.Звара.

Группа Вилкинсона пришла к выводу, что «независимые эксперименты, о которых сообщили в 1970 году берклиевская и дубненская группы, выполнены, в сущности, одновременно и одинаково убедительно. Обе эти группы разделяют заслуги в открытии 105-го элемента»².

Элемент 105 – дубний

Органы IUPAC (Международного союза по чистой и прикладной химии), вырабатывая рекомендации по названиям элементов 102–105, декларативно опирались на выводы группы Вилкинсона о приоритетах в открытии этих элементов. Однако, несмотря на очевидный перевес суммарного вклада Дубны в открытие элементов 102 и 103 (см. выше), IUPAC рекомендовал сохранить названия нобелий (102) и лоуренсий (103), предложенные в свое время Беркли. Оправданием служило, что они применялись длительное время и во многих публикациях. Затем, без учета такого нарушения прав первооткрывателей, отдельно рассматривалась пара 104–105, где заслуги Дубны и Беркли признаны равными. Рекомендованы названия резерфордий (104) и **дубний** (105).

3.4. Открытие спонтанно-делящихся изомеров

При проведении экспериментов по синтезу 104-го элемента было открыто новое, неизвестное ранее явление – образование спонтанно-делящихся изомеров известных ядер. При облучении мишеней из ^{242}Pu и ^{238}U ионами $^{20,22}\text{Ne}$ и ^{16}O было зарегистрировано спонтанное деление ядер тяжелого нуклида с аномально коротким периодом полураспада $\sim 0,01$ с. Последующие работы показали, что это ^{242}Am , для которого период спонтанного деления из основного состояния составляет $\sim 10^{12}$ лет. Таким образом, вероятность спонтанного деления возрастала в 10^{21} раз. Статья о «Спонтанном делении с аномально коротким периодом» была опубликована в 1962 году в ЖЭТФ. В ней авторы высказывали предположение «о возможности существования изомерных состояний, обусловленных сильной деформацией ядер». Новое явление привлекло

¹ Звара И., Чубурков Ю.Т., Палетка Р., Шалаевский М.Р. Опыты по химии элемента 104. I // Радиохимия. 1969. Т. 11. С. 163.

Звара И., Чубурков Ю.Т., Белов Б.З., Букланов Г.В., Захватаев Б.Б., Зварова Т.С., Маслов О.Д., Палетка Р., Шалаевский М.Р. Опыты по химии элемента 104. V // Радиохимия. 1970. Т. 12. С. 565; J. Inorg. Nucl. Chem. 1970. V. 32. P. 1885.

² Друин В.А., Демин А.Г., Харитонов Ю.П., Акапьев Г.Н., Рудь В.И., Сун Цин Ян Г.Я., Челноков Л.П., Гаверилов К.А. Изучение α -распада изотопов элемента 105 // ЯФ. 1971. Т. 13. С. 251.

большое внимание и экспериментаторов и теоретиков. В.М.Струтинским была предложена идея о сложной — двугорбой структуре барьера деления для этого ядра. Она вытекала из разработанного им метода оболочечных поправок при расчетах барьеров деления тяжелых ядер. Сделанное в ЛЯР открытие дало мощный импульс к исследованию спонтанно-делящихся изомеров во многих лабораториях мира с использованием не только тяжелых ионов, но и легких бомбардирующих частиц. В общей сложности было зарегистрировано около 50 спонтанно-делящихся изомеров, экспериментально доказано существование двугорбых барьеров деления тяжелых ядер, показана супердеформация ($\beta \sim 0,6$) ядер в этих изомерных состояниях. Можно сказать, что в ядерной физике была открыта новая глава, сыгравшая важную роль в предсказании существования сверхтяжелых элементов.

Открытие спонтанно-делящихся изомеров было зарегистрировано в СССР за № 52, авторский коллектив: Г.Н.Флёров, С.М.Поликанов, В.П.Перелыгин, В.Л.Михеев, А.А.Плеве, В.А.Фомичев.

3.5. Открытие нового вида радиоактивного распада ядер — эмиссии запаздывающих протонов

Если спонтанно-делящиеся изомеры не предсказывались теорией, то возможность эмиссии протонов из основного или возбужденного (после β^+ -распада) состояний обсуждалась за несколько лет до ее экспериментального наблюдения. Еще в 1955 году, по предложению Г.Н.Флёрова, В.А.Карнаухов и Н.И.Тарантин проанализировали возможность эмиссии протонов из основного или возбужденных состояний, а также определили наиболее подходящие для этой цели реакции с тяжелыми ионами.

С пуском циклотрона У-300 появилась реальная возможность экспериментальных поисков этого явления. На специальном пробнике на внутреннем пучке циклотрона устанавливался детектор протонов, представляющий собой телескоп из тонкой ионизационной камеры, служившей для измерения удельной ионизации частицы, и толстой камеры для измерения энергии частицы. Поглотитель позволял разделять эффект от протонов и электронов. Мишень в виде никелевой фольги облучалась ионами ^{20}Ne (130 МэВ). В продуктах облучения были зарегистрированы запаздывающие протоны, которые испускались при β^+ -распаде, ^{17}Ne ($T_{1/2} = 0,1$ с) и ^{73}Kr ($T_{1/2} = 25,2$ с). Это было первое в мире наблюдение нового вида радиоактивности — эмиссии запаздывающих протонов. Открытие было зарегистрировано в СССР за № 35, авторы: В.А.Карнаухов, Г.М.Тер-Акопьян, В.Г.Субботин, Л.А.Петров.

После этих пионерских работ в активное исследование нового явления включились многие лаборатории мира. К настоящему времени открыто более сотни протонных излучателей. Эмиссия запаздывающих протонов перестала быть экзотическим явлением, превратившись в эффективное средство получения новой ядерной информации.

3.6. Открытие запаздывающего деления ядер

Высокая интенсивность внутренних пучков тяжелых ионов циклотрона У-300 (до 10^{14} частиц в секунду) и разработка специальной наклонной мишени, способной принимать такие пучки, позволили открыть новый вид деления ядер — запаздывающее деление. Впервые новое явление наблюдалось при облучении ^{233}U ионами ^{10}B и

¹¹B. При облучении ²³⁰Th ионами ¹⁰B идентифицированы два нуклида, испытывающих запаздывающее деление – легкие изотопы америция: ²³²Am и ²³⁴Am с $T_{1/2}$, соответственно, 1,4 и 2,6 мин. При облучении ²⁰⁹Bi ионами ²²Ne идентифицировано ядро ²²⁸Np, испытывающее запаздывающее деление с $T_{1/2}$, равным 1 мин. Периоды полураспада спонтанного деления этих ядер превосходили их зарегистрированные времена жизни в миллиарды раз. Наблюдаемый эффект нельзя было объяснить и делением из изомерного состояния, так как в этом случае времена жизни идентифицированных нуклидов были бы много меньше. Детальный анализ данных показал, что эти нуклиды испытывают К-захват, после которого образуются, соответственно, ядра Pu и U в возбужденном состоянии. В случае, когда энергия возбуждения дочерних ядер оказывается сравнимой с барьером деления, происходит их мгновенное деление. Таким образом, наряду со спонтанным и вынужденным (после захвата нейтрона) делением и делением из изомерного состояния была обнаружена четвертая разновидность деления – запаздывающее деление.

Открытие запаздывающего деления было зарегистрировано в СССР за № 160, авторы: Г.Н.Флёрв, В.И.Кузнецов, Н.К.Скобелев. Открытие подтверждено экспериментами, проведенными в Германии и США. К настоящему времени получено 14 нейтронодефицитных и 4 нейтроноизбыточных излучателей запаздывающего деления. Они принадлежат области элементов от таллия до менделевия.

3.7. Изучение процесса деления ядер в реакциях с тяжелыми ионами

Большой набор тяжелых ионов, ускоряемых на циклотроне У-300, открыл новые возможности для изучения процесса деления ядер, параметр делимости которых, Z^2/A , существенно превышал значения, полученные в реакциях с легкими бомбардирующими частицами. Для легких частиц его величина не превышала 35, тогда как при облучении ²³⁸U ускоренными ионами ⁴⁰Ag возрастала до 43,5.

Под руководством Ю.Ц.Оганесяна и Г.Н.Флёрва изучали массовые распределения осколков деления в реакциях, в которых мишени из ²³⁸U и ²⁰⁹Bi облучались ионами от ¹²C до ⁴⁰Ag. Продукты деления (в основном редкоземельные элементы, а также тяжелые элементы от Au до Po) разделяли методами радиохимии, изотопы идентифицировали Ge (Li)-гамма-спектрометром. Полученная обширная информация позволяла сделать ряд важных выводов о процессе деления сильно возбужденных тяжелых ядер.

Из реакции ²³⁸U+⁴⁰Ag была получена первая экспериментальная оценка критического значения Z^2/A , определявшего предел стабильности ядер по отношению к мгновенному делению. Оно оказалось близким к 45, что совпадало с предсказанием теории. Напротив, дисперсия массового и зарядового распределения осколков деления резко возрастала после значения $Z^2/A = 37$, вопреки предсказаниям теории. При $Z^2/A = 43,5$ экспериментально измеренная дисперсия превосходила предсказанную теоретически в 5 раз. Это драматическое расхождение указывало на качественно новые особенности процесса деления очень тяжелых ядер. Авторами исследований была выдвинута гипотеза о возможности деления возбужденного тяжелого осколка, в результате чего должны образоваться три близких по массе осколка.

Большая дисперсия массового распределения осколков деления позволила выдвинуть идею о возможности использовать процесс деления очень тяжелых ядер в ка-



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}C , ^{13}N , ^{15}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}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}N , ^{17}N), (^{14}N , ^{17}N) были измерены функции возбуждения в довольно широком интервале энергий. Впервые наблюдалась реакция срыва 3-х протонов (^{20}Ne , ^{17}N) и реакция обмена нуклонами (^{16}O , ^{17}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 γ -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.Квещинска, 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

