

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н.Флёрова

1. Начало ядерно-физических исследований с тяжелыми ионами.

Создание Лаборатории ядерных реакций

В СССР ядерно-физические исследования с тяжелыми ионами были начаты в Москве, в Лаборатории измерительных приборов Академии наук СССР (ЛИПАН). Такое название носил в то время Российский научный центр «Курчатовский институт». Инициатором и научным руководителем этих работ был член-корреспондент АН СССР Георгий Николаевич Флёрв, завершивший к тому времени свое участие в создании атомного оружия и вернувшийся к фундаментальным исследованиям. Г.Н.Флёрв возглавлял 7-й сектор, который входил в отдел, руководимый академиком Игорем Васильевичем Курчатовым.

В ядерно-физических исследованиях с тяжелыми ионами Г.Н.Флёрва особенно привлекала проблема синтеза новых трансурановых элементов. Все тогда известные трансурановые элементы, начиная с нептуния ($Z = 93$) и кончая менделевием ($Z = 101$), впервые были получены в США. Американские физики использовали для их синтеза мощные нейтронные потоки, получаемые в реакторах или при термоядерных взрывах, а также ядерные реакции, в которых мишени из урана и трансурановых элементов облучались на ускорителях дейтронами и ^4He . Однако к началу 50-х годов эти пути оказались исчерпанными. В термоядерных взрывах не удалось продвинуться дальше сотого элемента — фермия. Элемент 101 — менделевий, всего около полутора десятков атомов, был получен при облучении интенсивным потоком ^4He мишени, содержащей 10^9 атомов ^{253}Es (1953 г.).



Директор ЛЯР (1958—1988 гг.)
академик Г.Н.Флёрв

Г.Н.Флёрв вместе с сотрудниками сектора провел всесторонний анализ сложившейся ситуации с целью выявления наиболее перспективного пути синтеза еще более тяжелых трансурановых элементов. Анализ определенно указывал, что это использование реакций с тяжелыми ионами. Просматривались и другие направления ядерно-физических исследований, в которых тяжелые ионы давали явное преимущество по сравнению с легкими бомбардирующими час-

тицами. Большой заряд тяжелого иона резко повышал вероятность кулоновского возбуждения коллективных состояний ядер. Тяжелые ионы позволяли получать ядра с очень высоким спином, открывая возможность изучения влияния быстрого вращения на свойства ядра. В реакциях с тяжелыми ионами образуются ядра с большим дефицитом нейтронов. Для этих нуклидов можно было ожидать новых видов радиоактивного распада, например эмиссию протонов. Тяжелые ионы значительно расширяли возможности изучения процесса деления тяжелых ядер. В столкновениях двух сложных ядер могли быть реализованы реакции передачи значительного числа нуклонов.

Однако получение интенсивных пучков тяжелых ионов с энергией, превышающей кулоновские барьеры тяжелых ядер, было непростой задачей. Ионные источники циклотронов давали лишь одно- и двухзарядные ионы. Тяжелые ионы такой зарядности ускорялись до энергий, которые были меньше, чем у протонов и ${}^4\text{He}$.

Поскольку магнитное поле и выводной радиус в циклотроне были зафиксированы, высокую энергию тяжелых ионов и узкий энергетический спектр можно было достигнуть только существенно повысив их начальную зарядность. Г.Н.Флёрв неоднократно обсуждал эту проблему с сотрудниками отдела академика Л.А.Арцимовича, которые занимались разделением изотопов и имели богатый опыт в разработке ионных источников. В 1956 году в этом отделе специально для циклотрона был создан мощный дуговой источник с подогревным катодом и осцилляцией электронов в дуге. С помощью этого ионного источника на 1,5-метровом циклотроне ЛИПАН удалось получить ионы C^{4+} , N^{5+} и $\text{O}^{5+,6+}$ и ускорить их до энергий, достигавших 100 МэВ. Для того времени это были рекордные и по интенсивности, и по энергии пучки тяжелых ионов. Наибольший вклад в создание и дальнейшее совершенствование этого мощного ионного источника внес Б.Н.Марков.

На пучках этих тяжелых ионов сотрудниками 7-го сектора и прикомандированными из Института геохимии и аналитической химии АН СССР радиохимиками под научным руководством Г.Н.Флёрова был проведен большой цикл экспериментов по изучению взаимодействия тяжелых ионов с ядрами и синтезу трансурановых элементов. Были синтезированы элементы 99 и 100 (эйнштейний и фермий), проведены первые эксперименты по синтезу элемента 102. Результаты этих исследований были доложены Г.Н.Флёровым на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, сентябрь 1958 г.). В его докладе была также дана первая систематика ядерных процессов с тяжелыми ионами.

Проведенные в СССР и за рубежом ядерно-физические исследования с тяжелыми ионами довольно быстро привели к выводу о необходимости сооружения специальных ускорителей.

В США пошли по пути создания тандема из двух линейных ускорителей, в котором ускорение тяжелых ионов проходило в два этапа. Ионы низкой зарядности, поступающие из ионного источника, ускорялись в первом ускорителе (предускорителе) до энергии около 1 МэВ на нуклон. Затем пучок ионов направлялся на тонкую металлическую фольгу, при прохождении которой тяжелые ионы теряли большинство своих электронов, резко повышая свою зарядность. Далее они ускорялись в основном линейном ускорителе до энергии 10 МэВ на нуклон. Такие ускорители были введены в эксплуатацию в 1957 году в Беркли и Йейле (США).



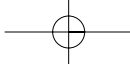
Первое здание Лаборатории ядерных реакций

В СССР выбор типа специального ускорителя тяжелых ионов определился в значительной степени отмеченными выше успехами в создании мощного источника многозарядных ионов, ориентированного для работы в циклотроне. Снизив зарядность ионов до 3^+ – 4^+ , можно было получать ионные пучки легких элементов с интенсивностью в десятки микроампер. Необходимую энергию ионов – 10 МэВ на нуклон можно было получить, увеличив диаметр полюсов магнита и повысив напряженность магнитного поля.

Концепция циклотрона тяжелых ионов, определившая требования к проектному заданию, была сформулирована и доложена на совещании в ЛИПАН Г.Н.Флёровым в декабре 1955 года. Вскоре последовало решение Совета Министров СССР о строительстве специального циклотрона тяжелых ионов. Создание 26 марта 1956 года Объединенного института ядерных исследований определило и место сооружения циклотрона тяжелых ионов. В мае 1957 года Ученый совет ОИЯИ на своем втором заседании принял решение о создании Лаборатории ядерных реакций (ЛЯР) с базовой установкой – специализированным циклотроном для проведения ядерно-физических исследований с тяжелыми ионами. Директором лаборатории был назначен член-корреспондент АН СССР Г.Н.Флёров.

СПРАВКА: Георгий Николаевич Флёров (1913–1990) – выдающийся советский, российский ученый в области ядерной физики. По его инициативе и при непосредственном участии в СССР были начаты исследования по разработке ядерного оружия под руководством академика И.В.Курчатова. Научный вклад Г.Н.Флёрова в эти работы был высоко оценен Правительством СССР: он был дважды удостоен Государственной премии 1-й степени и звания Героя Социалистического Труда.

После завершения своей работы над ядерным оружием Г.Н.Флёров обратился к фундаментальным исследованиям в ядерной физике. Он стал первопроходцем ново-



го направления фундаментальных научных исследований в ядерной физике — физике тяжелых ионов, исследующей ядерные превращения при столкновении двух сложных атомных ядер. Полученные им с сотрудниками пионерские данные были им доложены на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (1955 г.). Возглавив Лабораторию ядерных реакций в 1958 году, он оставался ее неизменным директором до 1988 года. Под его руководством ЛЯР превратилась в ведущий международный центр по физике тяжелых ионов. В 1992 году на 71-й сессии Ученого совета ОИЯИ Лаборатории ядерных реакций было присвоено имя академика Г.Н.Флёрва.

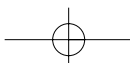
2. Циклотрон тяжелых ионов У-300

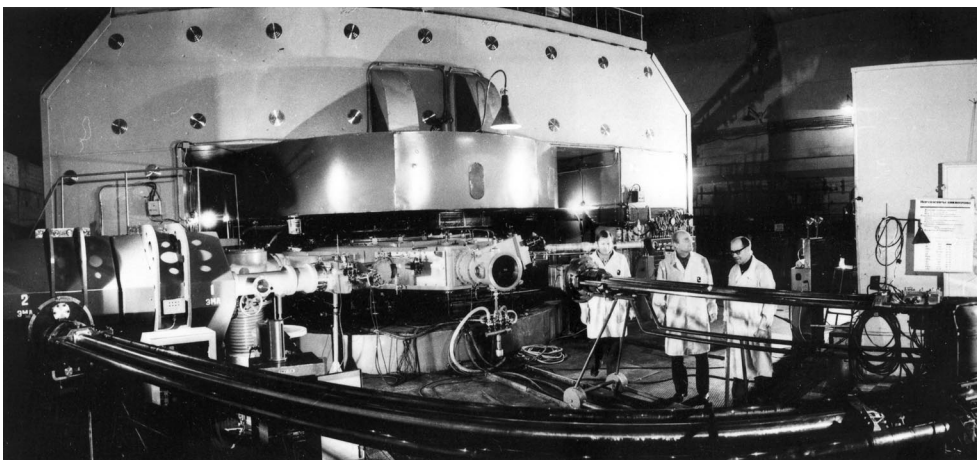
Этот уникальный циклотрон был спроектирован в НИИ электрофизической аппаратуры в Ленинграде под руководством И.Ф.Малышева в соответствии с концепцией, предложенной Г.Н.Флёрвым. Ускоритель был изготовлен на одном из заводов Ленинградского объединения «Электросила». Строительством здания Лаборатории ядерных реакций в Дубне и монтажом циклотрона в экспериментальном зале руководил главный инженер ЛЯР К.Л.Плюсин. Пусконаладочными работами руководил Ю.Ц.Оганесян. 9 сентября 1960 года на циклотроне У-300 был получен первый пучок ускоренных ионов азота.

Циклотрон У-300 был уникальным по тому времени ускорителем тяжелых ионов. Он позволял ускорять большой набор ионов с отношением массового числа к заряду от 3,5 до 7,0. Трехметровый диаметр полюсов магнита при напряженности магнитного поля 12,0, 14,5 и 16,5 кЭ давал возможность ускорять тяжелые ионы до энергии ~10 МэВ на нуклон при сравнительно невысокой зарядности ионов, что обеспечивало высокую интенсивность пучков.

Длина волны высокочастотного напряжения на дуантах лежала в пределах от 50 до 100 м. Четвертьволновые линии, к которым крепились дуанты циклотрона, имели внушительный размер и представляли собой серьезное инженерное сооружение. Ионный источник вводился в камеру циклотрона со стороны четвертьволновых линий. Противоположная часть камеры была свободной. Она использовалась для размещения экспериментальной аппаратуры. Скошенные на краях дуанты позволяли вводить на внутренний пучок циклотрона «пробники», в которых, при предельно допустимом размере $15 \times 20 \times 30 \text{ см}^3$, удавалось размещать довольно сложную экспериментальную аппаратуру. Ее работу осложняло воздействие магнитного поля циклотрона и высокочастотного напряжения на дуантах. Вместе с тем определенное преимущество по сравнению с работой на выведенном пучке представляла возможность плавно и легко изменять энергию частиц на мишени перемещением пробника вдоль радиуса камеры циклотрона.

С самого начала уделялось большое внимание дальнейшему совершенствованию ионных источников и разработке их модификаций. Этой работой руководил А.С.Пасюк. Были созданы источники для работы с твердыми веществами, что позволило получить ионы ^{48}Ca , ^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{76}Ge . Были ускорены и ионы радиоактивного углерода ^{14}C .





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 ~50% срывались с поверхности, будучи при этом ионизованными, что позволило собирать их электрическим полем на поверхность сборника.

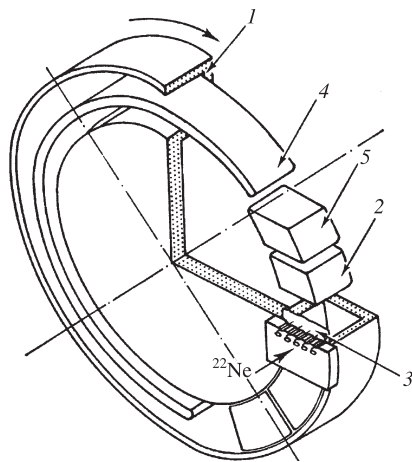


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для идентификации 102-го элемента:

1 – медный диск с канавкой; 2 – ограничители объема мишени; 3 – урановая мишень; 4 – сборник продуктов α -распада; 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.Флёрв, 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., Флёрв 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-

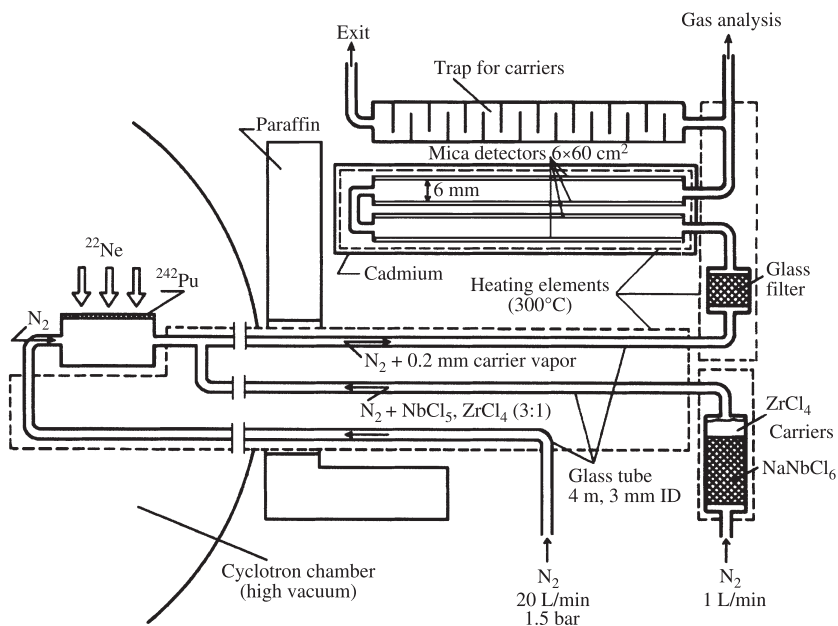


Рис. 2. Первая установка для химической идентификации спонтанно-делящихся изотопов элемента 104 (масштаб не соблюден). Объяснения см. в тексте

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 $\geq 0,5$ 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 $T_{1/2} \sim 3$ 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.

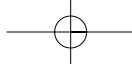
3.7. Изучение процесса деления ядер в реакциях с тяжелыми ионами

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.

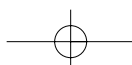
3.8. Изучение реакций многонуклонных передач

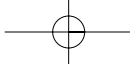
Уже в первых экспериментах с тяжелыми ионами были зарегистрированы радиоактивные продукты (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O), образование которых связано с передачей нейтрона от налетающего ядра к ядру-мишени. Они были позитронными излучателями с удобными для детектирования периодами полураспада. С началом экспериментов 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





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

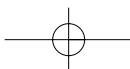
Вывод тяжелых ионов из циклотрона У-300 был непростой задачей. Большая энергия ионов и сравнительно малое отношение заряда иона к его массе требовали высокого, ~ 100 кВ, напряжения на дефлекторе, а большая длина дефлектора вела к дефокусировке пучка. Была разработана специальная форма дефлектора, которая 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.

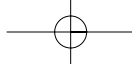
4.1. Новые нейтроноизбыточные изотопы легких элементов, полученные в реакциях многонуклонных передач

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 ΔE 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}O в реакции подхвата 4-х нейтронов при облучении ^{232}Th ионами ^{18}O (1970 г.). Действительно, впервые был зарегистрирован изотоп ^{22}O , что указывало на его ядерную (нуклонную) устойчивость. Одновременно обнаружены новые нейтроноизбыточные нуклиды ^{20}N и ^{18}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}B и ^{12}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}Th облучалась ионами ^{22}Ne (174 МэВ). Были получены еще более тяжелые изотопы кислорода ^{23}O и ^{24}O , новый изотоп азота ^{21}N , новые изотопы фтора и неона: ^{23}F , ^{24}F , ^{25}F , ^{25}Ne , ^{26}Ne . Особенно эффективным оказалось облучение ^{232}Th ионами ^{40}Ar (290 МэВ). В одном эксперименте было зарегистрировано 14 новых нейтроноизбыточных изотопов Mg, Al, P, S и Cl. Используя ионы ^{11}B и ^{15}N , удалось получить все самые тяжелые из известных изотопы — He, Li, Be и B.





В результате получены следующие нейтроноизбыточные изотопы легких элементов:

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

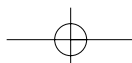
Была установлена важная закономерность в сечениях образования ядер в реакциях многонуклонных передач, получившая название Q_{gg} -систематики. Она позволила выявить ядерную (нуклонную) нестабильность тяжелого изотопа гелия — ^{10}He .

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 β -стабильности. Были получены данные о плотности уровней этих ядер в возбужденном состоянии, удалось выявить особенности гросс-структуры β^+ -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}Ru ионами ^{32}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}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 ~ 200 составляло 2300 на полувысоте пиков соседних изотопов. Газоразрядный ионный источник сепаратора обладал быстродействием ~ 5 мс, обеспечивая возможность регистрации очень короткоживущих радиоактивных изотопов. В выходном фокусе масс-сепаратора были установлены детекторы для регистрации и измерения энергии α -частиц, осколков спонтанного деления, β -частиц и γ -квантов.

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

периоды полураспада для ^{22}F и ^{41}Cl , уточнены данные для энергии β -распада ^{22}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 ~ 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.

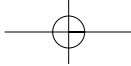
4.5. Ядерно-физические исследования с использованием широкодиапазонного магнитного анализатора

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}Ar . На установке получен ряд оригинальных данных.

- *Наблюдение высокоэнергетических α -частиц в реакциях с тяжелыми ионами*

При облучении мишеней из ^{232}Th , ^{181}Ta , $^{\text{nat}}\text{Tl}$ и ^{12}C ионами ^{22}Ne (178 МэВ) были измерены энергетические спектры изотопов H, He, Li и Be, вылетевших под углом 0° . Впервые обнаружены высокоэнергетические α -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 α -частицах она достигала 30 МэВ. Угловое распределение этих α -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 α -частицы могли образоваться в «массивных передачах», когда все нуклоны налетающего ядра, кроме четырех нуклонов, входящих в α -частицу, передаются ядру-мишени.

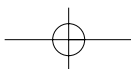
- *Получение и исследование супернейтроноизбыточных ядер легчайших элементов*

Был использован метод недостающих масс, который позволял исследовать стабильность и структуру нуклонно-нестабильных ядер. Облучали ^9Be ионами ^{11}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 ^6H 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 ^7Li ионами ^{11}B с регистрацией энергетического спектра изотопов кислорода ^{15}O и ^{14}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}He*

Ядро ^{10}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}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}Th и $^{\text{nat}}\text{Tl}$ облучались ионами $^{10,11}\text{B}$, ^{22}Ne с энергией 8–10 МэВ на нуклон. Для углов вылета 0° и 20° были измерены выходы и энергетиче-



ские спектры всех нуклонно-стабильных изотопов гелия: ^3He , ^4He , ^6He , ^8He . Это дало возможность оценить ожидаемый энергетический спектр ^{10}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}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}Ne , ^{40}Ar , ^{32}S , ^{56}Fe и ^{64}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}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}Th ионами ^{40}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}Pb . Анализ потенциальной энергии двойной ядерной системы как функции ее массовой асимметрии показал, что для конфигурации, в которой одно из ядер системы ^{208}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}W , ^{198}Pt , ^{197}Au , ^{206}Pb , ^{232}Th , ^{233}U , ^{239}Pu , ^{249}Cf облучались ионами ^{12}C , ^{16}O , ^{20}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.Лукьянов, 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

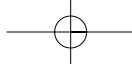
Выведенный пучок открыл широкие возможности для более глубокого изучения процесса деления возбужденных составных ядер, формирующихся в реакциях с тяжелыми ионами. Были созданы экспериментальные установки, в которых можно измерять энергетические спектры и угловые распределения осколков деления, а также 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}Ag (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}Am , ^{209}Bi и ^{238}U облучались ионами ^{22}Ne и ^{40}Ag 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}Ag 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}Ag для облучения ^{238}U позволило реализовать $Z^2/A = 43,5$. В результате облучений ^{197}Au , ^{209}Bi и ^{238}U ионами ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O и ^{40}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.

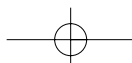
- *Множественность нейтронов, испускаемых при делении*

Созданная в ЛЯР аппаратура позволила впервые экспериментально измерить среднюю множественность нейтронов, испускаемых при делении тяжелого сильно-возбужденного ядра $\bar{\nu}_f$. Мишени из ^{197}Au , ^{209}Bi и ^{238}U облучались ионами ^{16}O , ^{22}Ne , ^{40}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}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



элементов» (СТЭ) в ядерных реакциях различных типов: облучение тяжелых мишеней ионами ^{48}Ca в расчете на слияние ядер, облучение тяжелых мишеней очень тяжелыми ионами в расчете на реакции передачи большого числа нуклонов и др. В ЛЯР были исследованы реакции слияния–деления с массивными тяжелыми ионами: $^{238}\text{U} + ^{136}\text{Xe}$. СТЭ должны были быть малоактивными летучими металлами и их надеялись выделить из облученных мишеней или сборников с помощью химических методов – селективной возгонки. Выдающимся достижением в этом подходе было получение в ЛЯР пучков ионов ксенона с помощью тандема тогдашних ускорителей У-300 и У-200. Руководил этой работой непосредственно Г.Н.Флёров, в ней активно участвовали Ю.Ц.Оганесян, И.А.Шелаев, А.Ф.Линев.

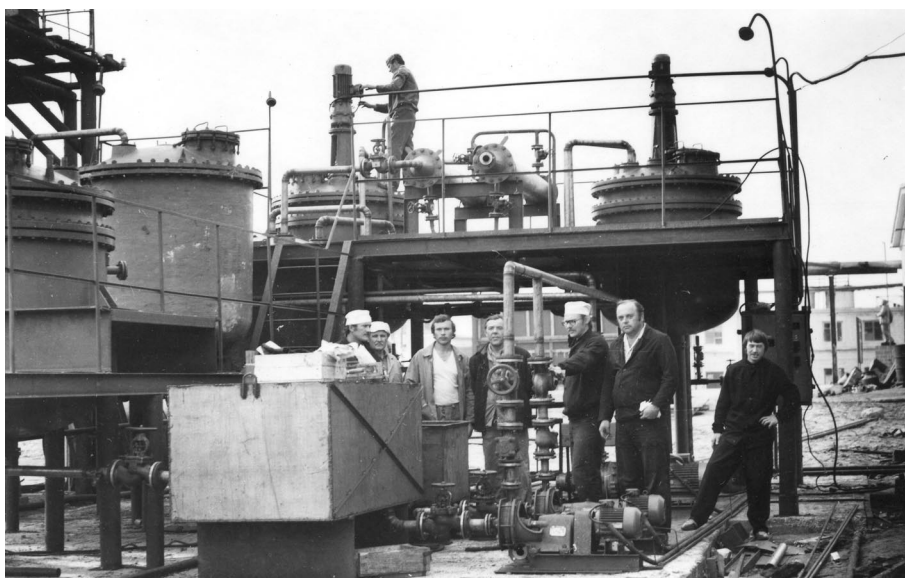
6. Поиск сверхтяжелых элементов в природе

Наиболее «оптимистические» предсказания периодов полураспада СТЭ давали надежду, что некоторые изотопы СТЭ могли сохраниться в природе до настоящего времени. Это при условии, что они образовывались в последнем акте нуклеосинтеза вещества Солнечной системы – около $4,5 \cdot 10^9$ лет назад и что их времена жизни превышают 10^8 лет. Искомые долгоживущие нуклиды или же их дочерние продукты в цепочках радиоактивного распада должны испытывать спонтанное деление. Методы обнаружения должны быть чрезвычайно чувствительными.

В 1968–1990 годах в ЛЯР была выполнена серия работ по поиску СТЭ в природе с применением, прежде всего, инструментальных методов детектирования актов спонтанного деления, значительно усовершенствованных для достижения высокой чувствительности. Измерялись природные материалы, отобранные на основании ожидаемого космохимического, геохимического и химического поведения СТЭ. Некоторые образцы подвергали дополнительной химической переработке в лаборатории. Руководил работами Г.Н.Флёров, их участниками были: Г.М.Тер-Акопьян, Н.К.Скобелев, А.Г.Попеко, М.П.Иванов, Е.А.Сокол, Л.П.Челноков, В.И.Смирнов, И.Звара, Ю.Т.Чубурков, С.Н. Дмитриев, Ю.С.Короткин, Б.Л. Жуйков, Т.Реецц и др.

Самая высокая в мире чувствительность на присутствие СТЭ была достигнута на детекторах ЛЯР, регистрирующих мгновенные нейтроны спонтанного деления от образцов массой до десятков килограммов. Установка включала около шестидесяти ^3He счетчиков в замедлителе, окружающих образец. Признаком акта спонтанного деления была одновременная регистрация двух и более нейтронов. Для защиты от «фона» ложных отсчетов, создаваемых космическими мюонами, детекторы размещали в соляных шахтах на глубине 1100 и 750 метров водного эквивалента. На рис. 3, а дан разрез другой подобной установки, где стартовый импульс для счета нейтронов давали ВГО счетчики мгновенных гамма-лучей деления. В ней не требовалась столь мощная защита от космических мюонов. Меньшей чувствительностью обладали пропорциональные счетчики осколков деления с большой площадью тонкослойного образца (рис.3, б).

Цикл исследований ЛЯР был уникальным по полноте и систематичности выбора исследуемых образцов и чувствительности измерений. Объекты исследования можно отнести к нескольким категориям. Наиболее тщательно анализировались метеориты



Установка для концентрирования тяжелых элементов из солевых растворов полуострова Челекен в поисках СТЭ в природе

типа углистых хондритов, представляющие наименее химически дифференцированное доступное вещество Солнечной системы, то есть по составу наиболее близкое к «среднему» по системе. Установленный верхний предел средней концентрации СТЭ равен 10^{-14} грамма на грамм, если $T_{1/2} = 10^9$ лет. Это в 100–1000 раз чувствительнее пределов, достигнутых примерно в тысяче работ, выполненных тогда же во многих других крупных научных центрах. Данные о метеоритах были дополнены исследованиями земных образцов. Это были среды, обогащенные в процессе «геохимической переработки» вещества мантии предполагаемыми относительно летучими химичес-

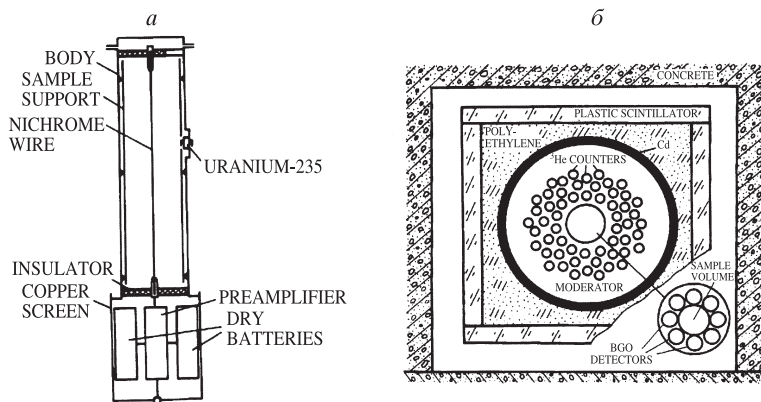


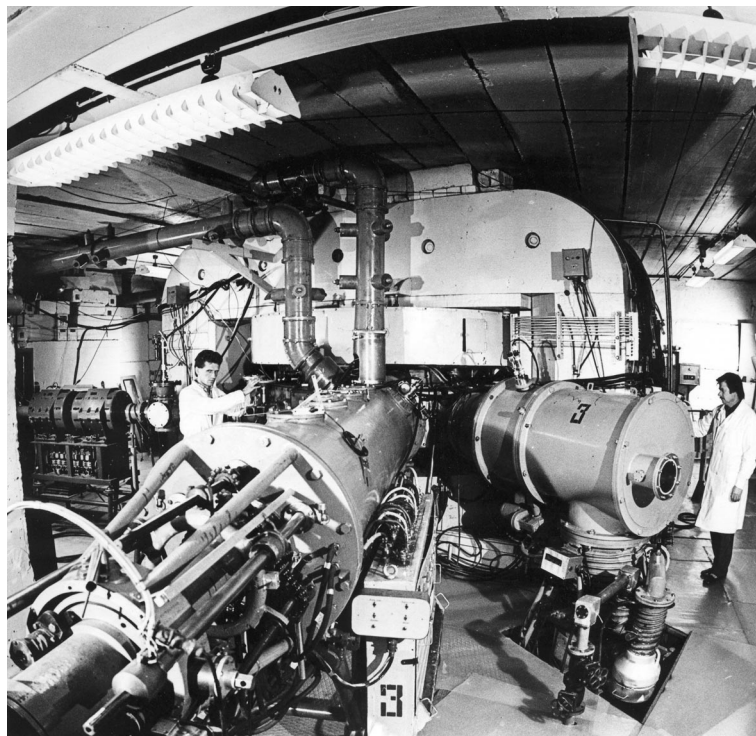
Рис. 3. Пропорциональный счетчик (б) и детектор мгновенных нейтронов деления (а)

кими аналогами СТЭ: кимберлитовые трубки, солевые рассолы в зонах глубинных разломов земной коры (район южного Каспия, Красного моря и Калифорнии). Исследовались многочисленные образцы руд и минералов, обогащенные легкими гомологами сверхтяжелых элементов с атомными номерами $Z = 108-115$. Сюда можно отнести глубинные железо-марганцевые конкреции Тихого океана, которые к тому же могли содержать элементы из «космической пыли».

Были также проведены оригинальные исследования по поиску сверхтяжелых ядер в массовом спектре космических лучей (Г.Н.Флёров, В.П.Перельгин и др.). С этой целью травлением выявляли скрытые треки тяжелых частиц в кристаллах некоторых минералов, извлеченных из метеоритов, так как они «экспонировались» в космосе на протяжении геологических времен.

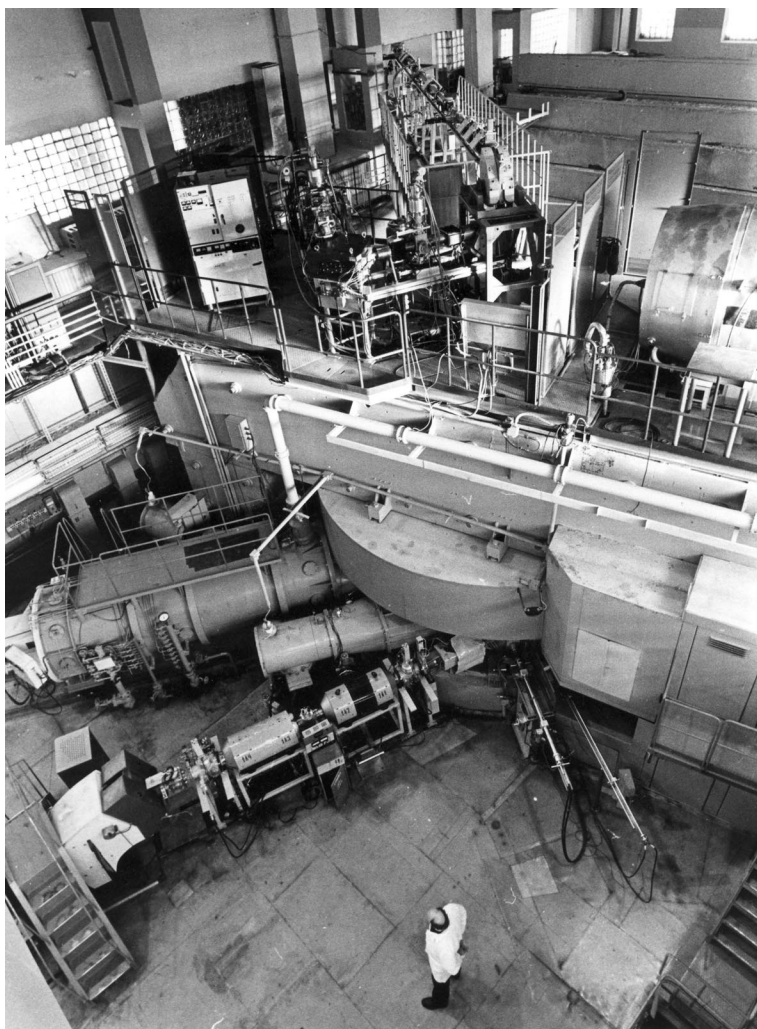
7. Развитие ускорительной базы ЛЯР

Развитие ускорительной базы Лаборатории ядерных реакций шло в направлении получения тяжелых ионов более высокой энергии, повышения интенсивности пучков, ускорения ионов большей массы. Циклотрон У-300 был классическим циклотроном, и это накладывало определенные ограничения на достижимую энергию тяжелых ионов. Она не могла превышать 10 МэВ на нуклон. Циклотроны следующего поколения должны были быть изохронными.



Двухметровый
циклотрон
У-200

В середине 60-х годов было принято решение о сооружении в ЛЯР изохронного циклотрона с диаметром полюсов 200 см (У-200) на основе имевшегося в то время в лаборатории классического циклотрона с диаметром полюсов 150 см. В основу конструкции изохронного циклотрона были положены новые идеи и технические решения, до этого практически не применявшиеся в циклотронной технике. Была создана компактная магнитная структура с высоким уровнем магнитного поля, дуанты с малой угловой протяженностью располагались в долинах магнитных полюсов, использовался многомодовый режим ускорения на различных гармониках высокочастотного электрического поля. Для вывода пучка ионов впервые в мире использован метод перезарядки ускоряемых ионов, предложенный в 1964 году Г.Н.Флёровым, Ю.Ц.Оганесяном и Г.Н.Вяловым. Создание изохронного циклотрона У-200 началось в 1966 году, первый пучок ионов получен в 1968 году. Впервые получены пучки тяже-



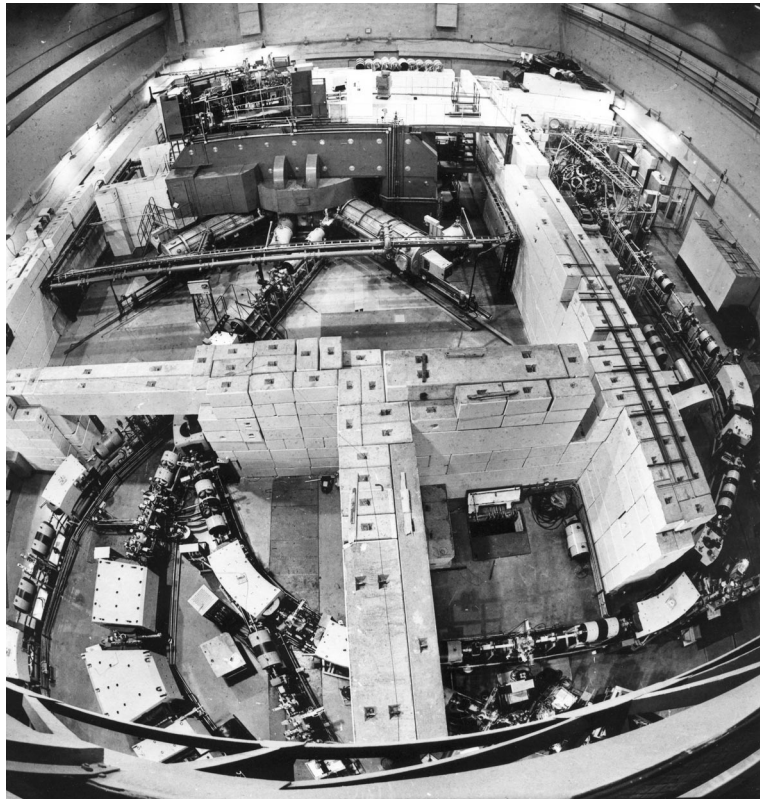
Циклотрон
У-400 с ЭЦР ион-
ным источником
(сверху на яре
циклотрона)

лых ионов с энергией более 10 МэВ на нуклон, вплоть до 20 МэВ на нуклон. У-200 был первым в СССР и странах-участницах ОИЯИ изохронным циклотроном тяжелых ионов.

В 1972 году циклотроны У-300 и У-200 были переведены в режим совместной работы. На их тандеме были впервые получены пучки ионов ксенона с энергией около 1 ГэВ и интенсивностью 10^{10} ионов в секунду. Это первый в мире циклотронный комплекс, ставший прообразом подобных комплексов, созданных позднее во Франции, США, КНР, Швейцарии, ЮАР и Японии.

Вместе с тем продвижение к области сверхтяжелых элементов требовало пучков тяжелых ионов исключительно высокой интенсивности. Лаборатория вновь обратилась к прямому методу ускорения с использованием одного большого циклотрона и высокоинтенсивного ионного источника дугового типа. В 1974 году было принято решение о сооружении в ЛЯР изохронного циклотрона с диаметром полюсов 400 см (У-400). В основу проекта У-400 был положен опыт сооружения и эксплуатации циклотрона У-200. Циклотрон У-400 проектировался в ЛЯР, изготавливался, в основном, в Опытном производстве ОИЯИ, монтировался силами сотрудников ЛЯР. Работами по проектированию и сооружению У-400 руководил Ю.Ц.Оганесян.

Первые детали У-400 начали изготавливать в июле 1975 года, монтаж и сборка ускорителя были закончены в августе 1978 года. В декабре того же года пучок тяжелых



Циклотрон
У-400М и зал экс-
периментальных
установок

ионов был доведен до конечного радиуса и выведен из камеры ускорителя. Циклотрон У-400 позволял получать пучки тяжелых ионов с энергией от 0,5 до 25 МэВ на нуклон. На нем ускорен большой набор тяжелых ионов, включая ионы редких разделенных нуклидов. Интенсивность пучков в указанном энергетическом интервале оставалась рекордной в мире на протяжении многих лет. Дальнейшее развитие циклотрона У-400 связано с созданием в 1996 году системы аксиальной инжекции пучка из ECR-источника с частотой 14,5 ГГц. Целенаправленное повышение эффективности этой системы дало возможность получать пучки ^{48}Ca с интенсивностью $(3-5) \cdot 10^{12} \text{ c}^{-1}$ при расходе рабочего вещества всего 0,4 мг/ч, что имело решающее значение для успешного синтеза сверхтяжелых элементов с атомными номерами от 112 до 118.

Последний проект реконструкции У-400 предполагает уменьшение энергетического разброса частиц до 10^{-3} , плавную вариацию энергии тяжелых ионов с точностью $5 \cdot 10^{-3}$, увеличение интенсивности пучков при одновременном уменьшении в четыре раза энергозатрат на электропитание магнита циклотрона.

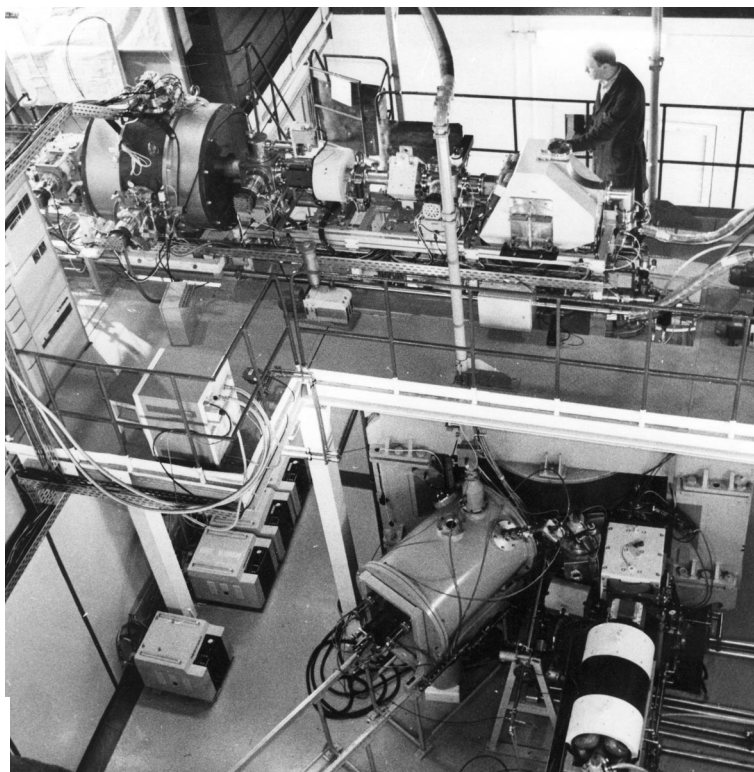
В конце 80-х годов было принято решение о радикальной реконструкции циклотрона У-300. Задача была увеличить диаметр полюсов его магнита до 400 см и ввести аксиальную инжекцию тяжелых ионов из ECR-источника, созданного в ЛЯР. Рекон-



Камера микро-
трона МТ-25 —
ускорителя
электронов

струкция была начата в 1989 году, а в мае 1991 года на У-400М был получен пучок ${}^4\text{He}$ с энергией 30 МэВ на нуклон. В течение 1992–1994 годов была создана разветвленная система каналов транспортировки пучка, оборудованная необходимыми средствами диагностики и контроля. На этих каналах был размещен ряд новых экспериментальных установок.

В последние годы все большую роль в ядерно-физических исследованиях начинают играть пучки экзотических изотопов легких элементов, обладающие большим избытком нейтронов, такие, например, как ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$. Эти изотопы получают исключительно в ядерных реакциях, они радиоактивные (часто очень короткоживущие) и поэтому обычно говорят о «радиоактивных пучках». В ЛЯР для этих целей как раз и используется циклотрон У-400М, на котором пучки необходимых радионуклидов получают за счет фрагментации ядер ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{15}\text{N}$, ускоренных до энергий (35–45) МэВ на нуклон и он-лайн магнитного разделения продуктов реакций. Интенсивность вторичных пучков ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ составляет, соответственно, $1 \cdot 10^6$ и $2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ при энергии 25 МэВ на нуклон. Существенно большие возможности для исследований с радиоактивными пучками открывает создаваемый в ЛЯР комплекс DRIBs. В первой фазе проекта (DRIBs-I) используется комбинация циклотронов У-400М и У-400 и ионопровод длиной ~ 100 м для транспорта пучка от первого ускорителя ко второму. Циклотрон У-400М служит для получения радиоактивных изотопов, которые с использованием он-лайн ионного источника и ускорения до низкой энергии передаются в



Циклотрон
ИЦ-100 с
ЭЦР-источником



ЭЦР-источник, созданный в ЛЯР

У-400 для их ускорения до необходимой энергии. Эта комбинация циклотронов позволит получать пучки ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ с энергиями от 6 до 16 МэВ на нуклон при интенсивности, соответственно, 10^{10} и 10^7 с $^{-1}$.

Вторая фаза проекта (DRIBs-II) предназначена для исследований с пучками тяжелых радиоактивных ядер с массовыми числами 70–140. Она включает микротрон МТ-25 – ускоритель электронов до энергии 25 МэВ. Тормозным излучением пучка электронов вызывают деление ядер в урановой мишени и из осколков деления формируют пучки радиоактивных ядер. Далее, как и в DRIBs-I, пучки будут транспортироваться в циклотрон У-400 и ускоряться до конечной энергии. Наибольший интерес для исследований представляют пучки нейтроноизбыточных ядер, таких как ${}^{132}\text{Sn}$, ${}^{133}\text{Sb}$, ${}^{134}\text{Te}$. Они могут быть ускорены до энергий ~ 10 МэВ на нуклон при интенсивности $\sim 3 \cdot 10^6$ частиц в секунду.

Для проведения прикладных исследований в 1986 году в ЛЯР был создан малый циклотрон ИЦ-100. В 2003 году он реконструирован в изохронный циклотрон с ЭЦР-источником. Новый ИЦ-100 позволяет получать пучки ионов от В до Хе с энергиями (0,5–1,2) МэВ на нуклон. Он оснащен ЭЦР-источником 18 ГГц и сверхпроводящей магнитной системой.

В создание ускорительной базы ЛЯР на разных этапах ее развития наиболее существенный вклад внесли: Ю.Ц.Оганесян, В.С.Алфеев, В.В.Бехтерев, С.Л.Богомолов, П.А.Веселов, Б.Н.Гикал, А.А.Гринько, Г.Г.Гульбекян, А.А.Ефремов, Б.А.Загер, А.И.Иваненко, В.В.Игумнов, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, А.Ф.Линев, В.Н.Мельников, Е.А.Минин, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, А.С.Пасюк, В.Н.Покровский, Н.И.Пронин, А.В.Решетов, К.И.Семин, Ю.П.Третьяков, А.Н.Филлипсон, И.А.Шелаев.

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.

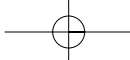
Международный авторитет Ю.Ц.Оганесяна способствует активному сотрудничеству ЛЯР с ведущими мировыми центрами ядерной физики. Под его председательством проходили все крупные международные конференции, организованные лабораторией.

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.

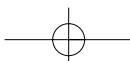
Группа Вилкинсона по трансуронам (см. выше) отметила большое значение метода холодного слияния, реализованного впервые в ЛЯР на примере изотопов элемента 106, для дальнейшего прогресса в открытии элементов 107–109. С начала 1980-х метод используется в ГСИ Дармштадт, где он-лайн масс-сепаратор SHIP на 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

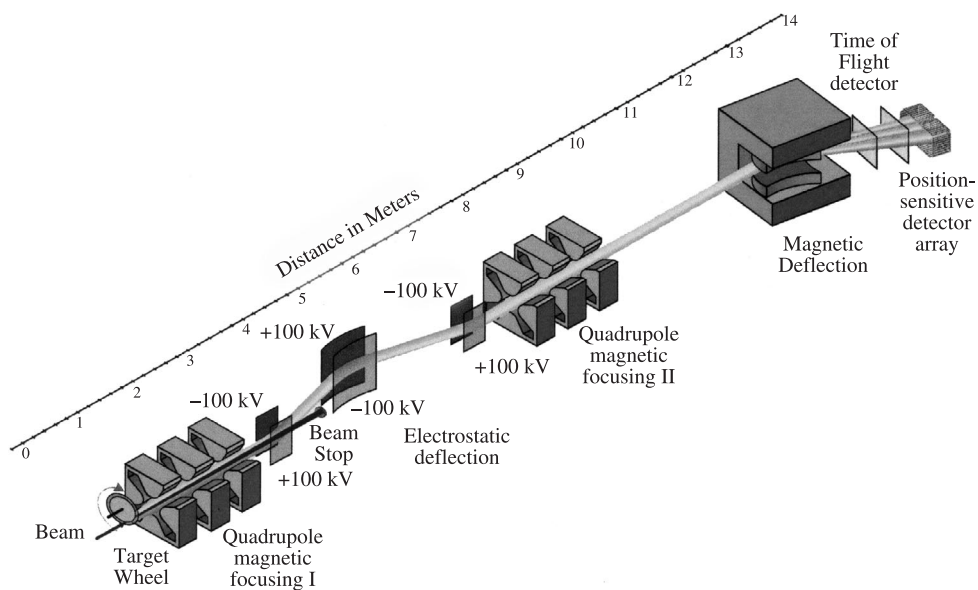
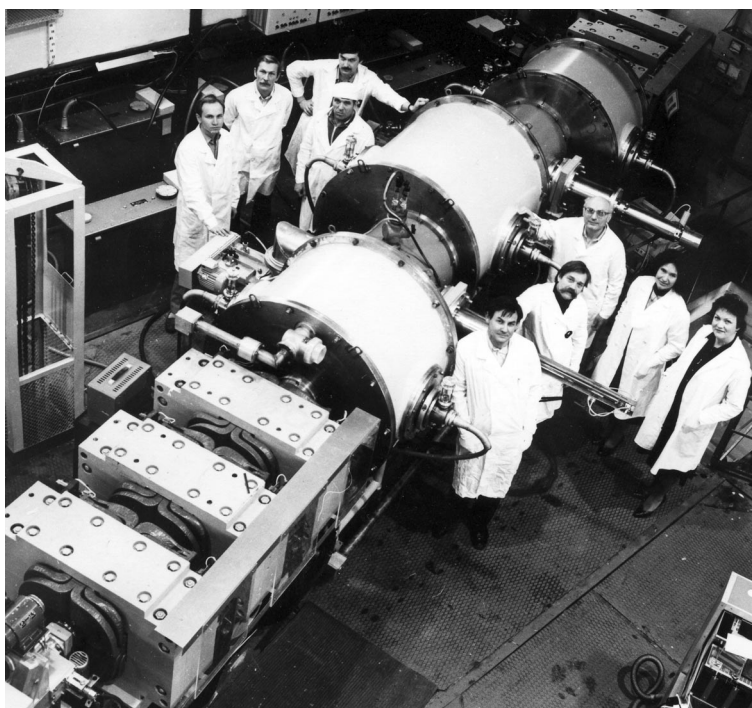


Рис. 4. Принципиальная схема сепаратора ВАСИЛИСА для изучения сверхтяжелых нуклидов

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 $^{26}\text{Mg} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{234}\text{Pu}^*$.

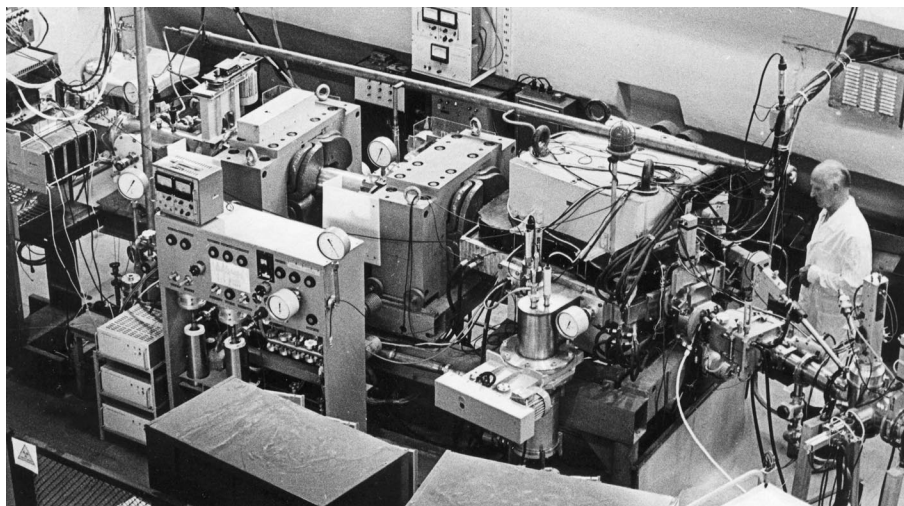
В частности, были синтезированы и изучены характеристики α -распада 14 новых изотопов U, Np и Pu. Для ряда известных изотопов Ac–Pa были уточнены данные об энергиях и относительных интенсивностях α -переходов и периодах полураспада. Данные о свойствах таких нейтронодефицитных нуклидов позволяют оценить,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

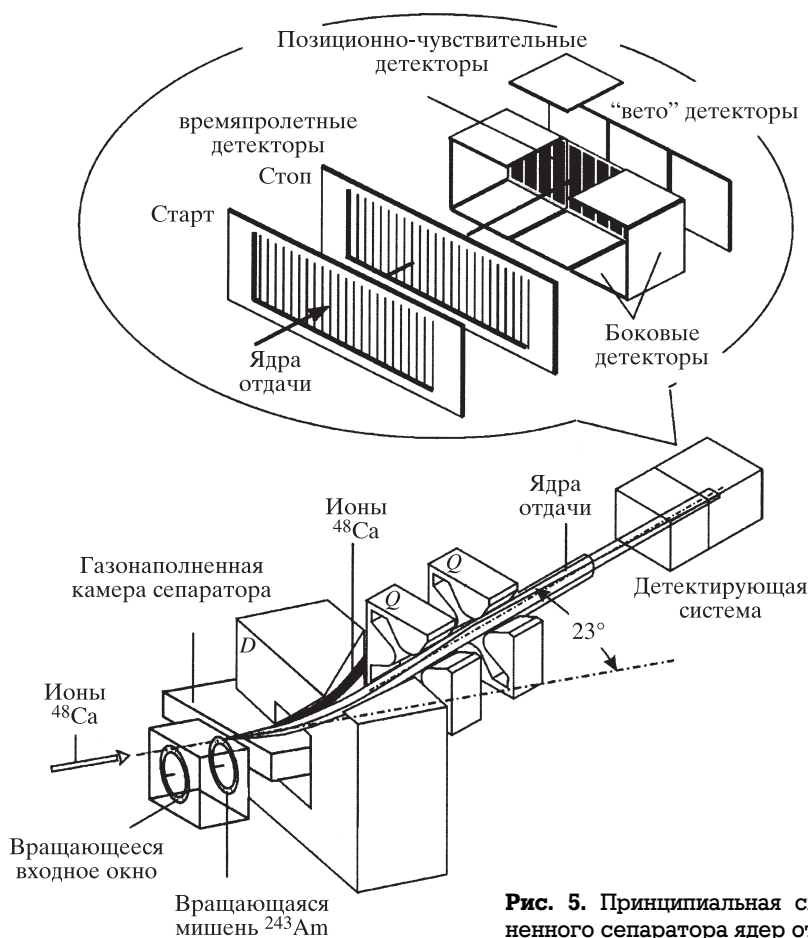


Рис. 5. Принципиальная схема газонаполненного сепаратора ядер отдачи

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-

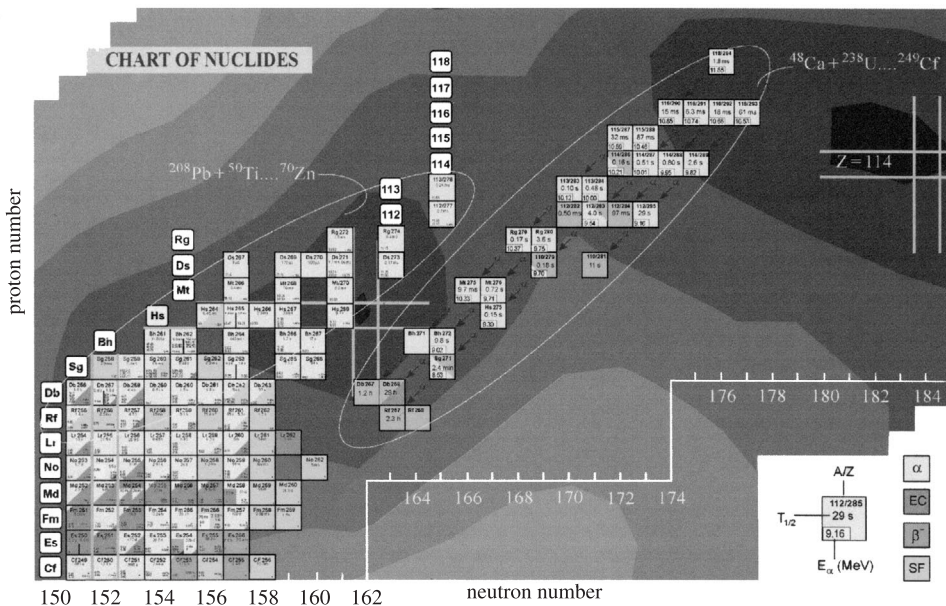


Рис. 6. Современное состояние карты нуклидов в области самых тяжелых элементов. Нуклиды и цепочки распада в области сверхтяжелых элементов открыты в исследованиях ЛЯР на установках ГНС и ВАСИЛИСА

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.Мули 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-

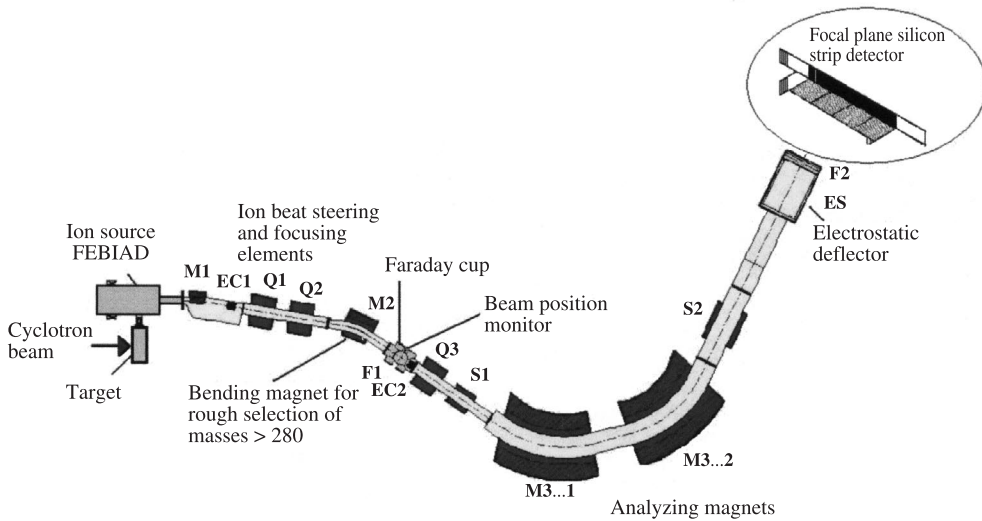
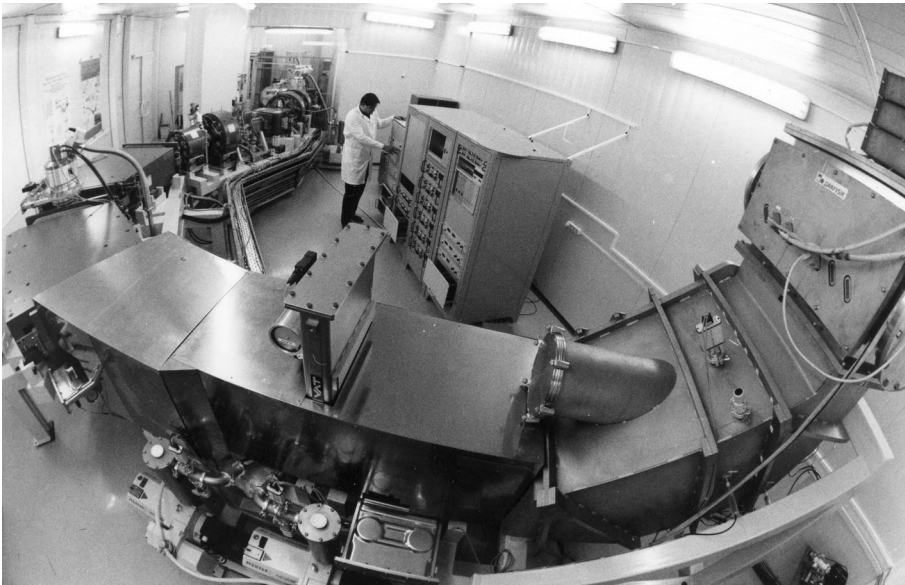
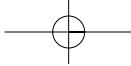


Рис. 7. Схема устройства он-лайн масс-сепаратора MASHA для идентификации массового номера СТЭ

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.

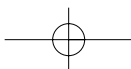
Научные исследования Михаила Григорьевича начались в 1966 году в Институте ядерной физики (ИЯФ) Академии наук Казахстана, куда он был направлен по окончании физического факультета МГУ. С 1966 по 1992 годы он прошел путь от молодого инженера до начальника крупнейшего научного отдела ИЯФ, защитил кандидатскую 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.

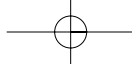
Научные интересы М.Г.Иткиса тесно переплетались с исследованиями, проводимыми в ЛЯР ОИЯИ, куда он и был приглашен на работу в 1992 году. В 1993 году Ученый совет ОИЯИ избирает М.Г.Иткиса на должность зам. директора, а в 1997 году — на должность директора ЛЯР ОИЯИ.

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*

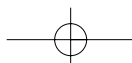
Процессы деления и квазиделения исследовали для тяжелых и сверхтяжелых составных ядер с атомными номерами от 82 до 122. Особое внимание уделяли ядерным реакциям, в которых были синтезированы ядра сверхтяжелых элементов (см. пп. 8.4.). На циклотроне У-400 мишени из Pb, Th и актиноидных элементов облучались 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.

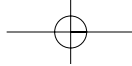
В результате этих экспериментов было установлено резкое изменение соотношения между каналами деления и квазиделения при переходе от 102-го элемента ($^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$) к 112–116 элементам (^{238}U , ^{244}Pu , $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$). При синтезе 102-го элемента в выходе 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.

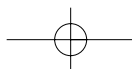
В этих экспериментах от ЛЯР участвовали: М.Г.Иткис, А.А.Богачев, Ю.М.Иткис, М.Яндель, Я.Климан, Г.Н.Княжева, Н.А.Кондратьев, Э.М.Козулин, Л.Крупа, Ю.Ц.Оганесян, И.В.Покровский, Е.В.Прохорова, Р.Н.Сагайдак, В.М.Воскресенский, В.И.Загребаев.

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 квази-стабильных, 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 ${}^5\text{H} \rightarrow t+n+n$.

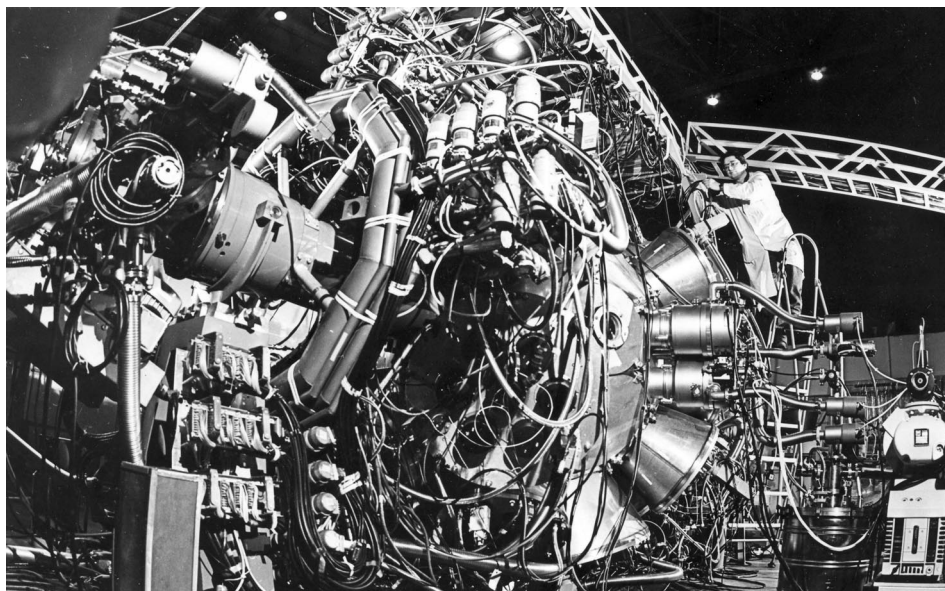
Работы на пучках сепаратора АКУЛИНА выполнялись в сотрудничестве с группами из ГСИ (Дармштадт, Германия), ИЯФ (Краков, Польша), РИКЕН (Сайтама, Япония), ГАНИЛ (Каэнь, Франция), ДСМ/ДАПНИА (Сакле, Франция), Курчатовского института (Москва, Россия), Университета Мельбурна (Австралия), ЛАНЛ (Лос-Аламос,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

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

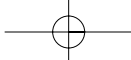
В столкновениях двух ядер при энергии несколько десятков МэВ на нуклон протекают процессы ядерной фрагментации, при которых в выходных каналах реакций образуется несколько фрагментов с широким распределением по массе, ядерному заряду и кинетической энергии. Для изучения такого рода процессов необходимо 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 сцинтиляционной 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.

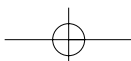
Наиболее важный научный результат, полученный на установке FOBOS, — наблюдение «истинного тройного деления», когда в выходном канале реакции образуются три фрагмента сравнимой массы. На основании анализа пространственных и энергетических корреляций фрагментов тройных распадов был сделан вывод, что наиболее 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.

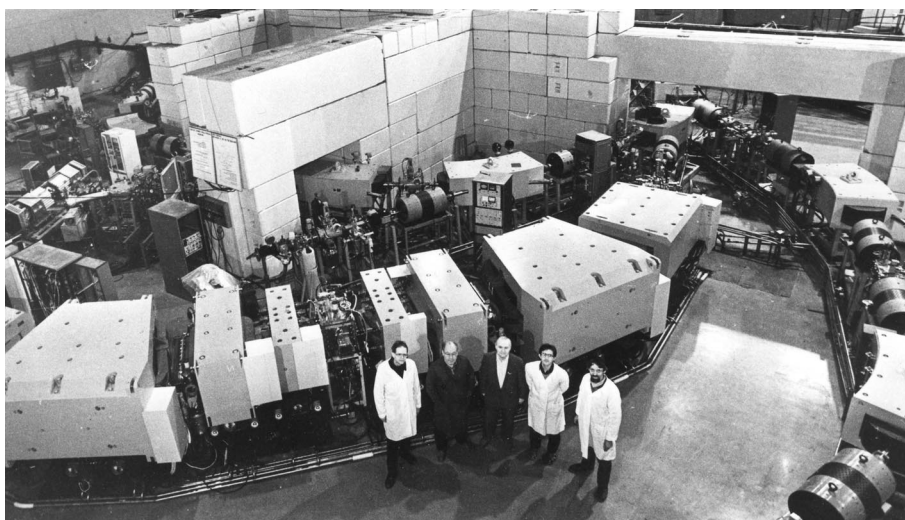
8.10. Кинематический сепаратор КОМБАС, экспериментальные исследования

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 cm^2 . Площадь детекторов могла достигать тысячи квадратных сантиметров, что обеспечивало исключительно высокую чувствительность.

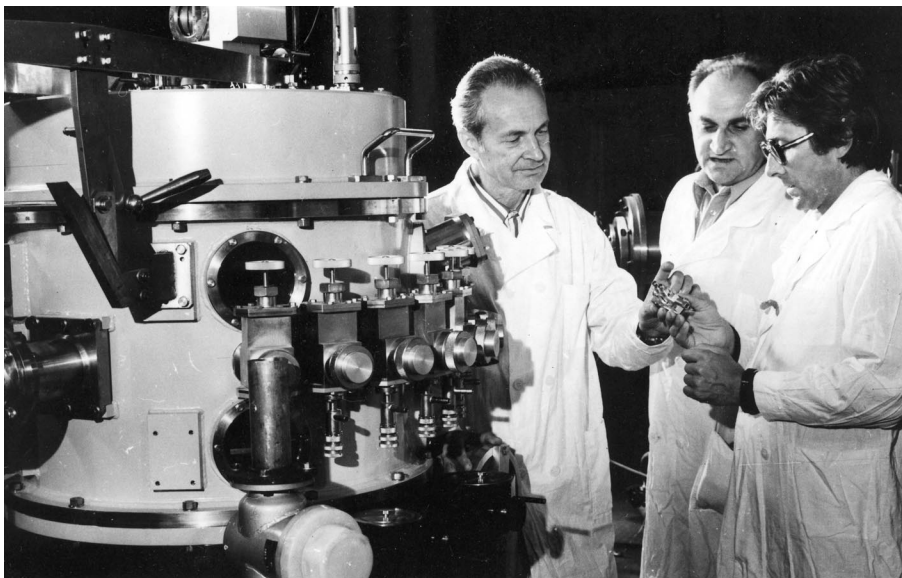
В опытах с ${}^{231}\text{Pa}$, ${}^{230}\text{Th}$, ${}^{233}\text{U}$ и ${}^{230}\text{U}$ была зарегистрирована эмиссия ядер ${}^{24}\text{Ne}$, в опытах с ${}^{234}\text{U}$ эмиссия ядер ${}^{24}\text{Ne}$ и ${}^{28}\text{Mg}$. Вылет ионов ${}^{28}\text{Mg}$ наблюдался и для легкого изотопа плутония ${}^{236}\text{Pu}$. 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 $^{nat}\text{Ag} + ^{40}\text{Ar}$ (285 МэВ) и $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ar}$ (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}Ar . 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

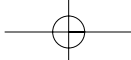
Г.Н.Флёров с самого начала работ с тяжелыми ионами подчеркивал перспективность использования химических методов для решения ряда предстоящих ядерно-физических и технических задач и принципиальную важность изучения химических свойств новейших элементов. В последнем случае наиболее интересны возможные 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



количественное изучение комплексобразования и других физико-химических характеристик элементов. Эти методы применялись для выделения и разделения продуктов ядерных реакций во многих работах ЛЯР по изучению закономерностей взаимодействия тяжелых ионов: каналов реакций, эффективных сечений, углового распределения и т. п. (М.Крживанек, И. Брандштеттер, Х.Брухертзейфер, Б.Горски, О.Константинеску, З.Шегловски, М.Юссонау). Необходимость в них вызвана чрезвычайной сложностью смеси радиоактивных продуктов облучения, что крайне ограничивает возможности чисто инструментального анализа спектрометрами α -частиц и γ -излучения.

В рамках этого направления был предложен и реализован оригинальный метод изучения химии водных растворов альфа-активных изотопов трансактиноидных элементов (Г.Пфреппер, З.Шегловски, Ю.Ц.Оганесян, И.Звара). Эксперимент аппаратно оформлен как непрерывный процесс транспортировки продуктов ядерных реакций аэрозольной струей от мишени, растворения их и пропускание раствора последовательно через несколько (хроматографических) колонок. Это позволило добиться максимальной эффективности, важной при низких сечениях, и быстродействия — по крайней мере в десятки секунд. Поведение короткоживущих нуклидов $^{261}_{104}$ прослеживалось после длительного опыта анализом различных «технологических фракций» на содержание достаточно долгоживущего внучатого нуклида ^{253}Es (на рис. 8 второй катионит и элюат). Исследовались возможности использования такого подхода и для некоторых элементов тяжелее 104-го (З.Шегловски, Б.Кубица).

Накопленный опыт по химии растворов использован в эксперименте в июне 2004 года (С.Н.Дмитриев, С.А.Шишкин и др.) по химическому выделению из продуктов облучения ^{243}Am ионами ^{48}Ca (интегральный поток $3,4 \cdot 10^{18}$) спонтанно-делящегося изотопа ^{268}Db с периодом полураспада около суток. Этот нуклид ранее обнаружен в физических экспериментах на газонаполненном сепараторе и идентифицирован по

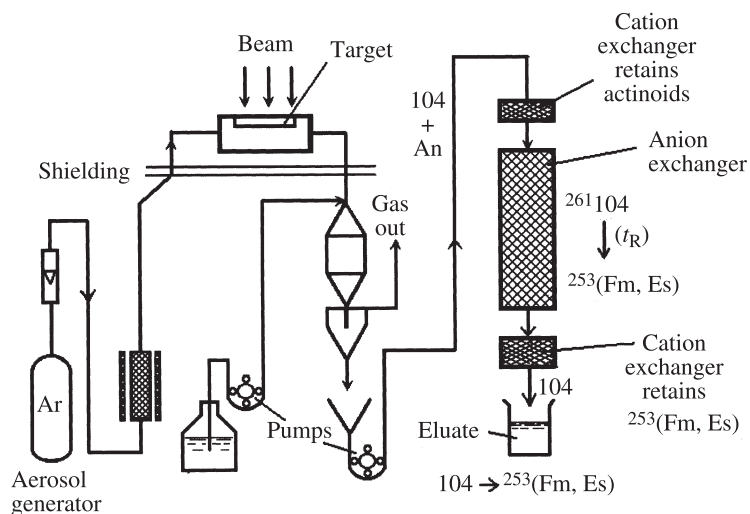
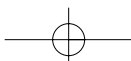


Рис. 8. Схема опыта по изучению комплексобразования элемента 104



цепочке предшествовавших ему α -распадов (см. рис. 6). Химическая идентификация атомного номера такой активности является важным шагом вперед в проблеме подтверждения атомных номеров СТЭ. Дубний является химическим аналогом ниобия и выделялся с помощью ионообменных смол в кислотной среде. Во фракции ниобия было зарегистрировано 15 спонтанно-делящихся атомов с $T_{1/2} \sim 32$ часа.

9.2. «Газовая» радиохимия

Ряд оригинальных результатов получен при разработке и развитии метода химической идентификации элемента 104, упомянутых выше в пп. 3.2 и 3.3. Его важнейшим моментом являлось получение молекул желаемых химических соединений путем взаимодействия заторможенных в газовом потоке атомов отдачи, выбиваемых из тонкой мишени, с газообразными реагентами. Это позволяет осуществлять опыты в непрерывном режиме при максимальном быстродействии. Для пионерских исследований химии летучих, но легко гидролизующихся неорганических соединений элементов 104, 105, 106, был развит метод термохроматографии. Он позволяет определять летучесть соединений по их адсорбционному поведению в газохроматографических колонках, в которых температура понижается по ходу газа. Физико-химическое обоснование метода (И.Звара) позволило, в частности, создать гибкую программу математического моделирования судьбы отдельных молекул в колонке с использованием метода Монте Карло. На рис. 9 показаны результаты опытов по сравнению поведения оксихлоридов элемента 106 и его аналога – вольфрама (И.Звара, А.Б.Якушев и др.).

После окончания длительного облучения акты спонтанного деления $^{263}106$ обнаруживали по трекам осколков деления в материале колонки (кварце), выявляемым травлением и просмотром в микроскопе. Изотоп вольфрама детектировался методом гамма-спектроскопии. Различие в поведении элементов невелико, если положение пиков откорректировать с учетом разных периодов полураспада активностей.

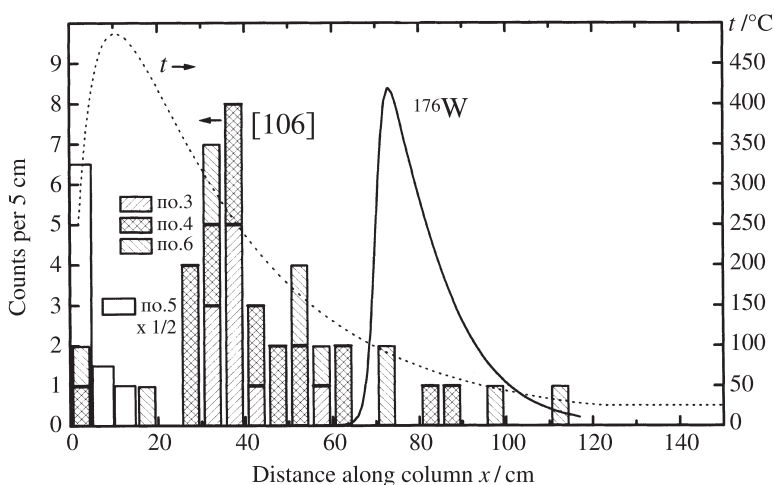
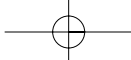


Рис. 9. Результат опыта по химической идентификации элемента 106 методом термохроматографии



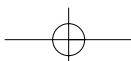
В подобных опытах с хлоридами Hf–Rf (элемент 104) была впервые обнаружена разница в поведении, свидетельствующая о «релятивистских эффектах» в химических свойствах трансактиноидов. Ряд исследований выполнялся при участии химиков из ПСИ Виллинген (Швейцария) и ГСИ Дармштадт (Германия) и с использованием их аппаратуры (Х.Феггелер, А.Тюрлер, М.Шедель).

Оригинальным достижением в радиохимии тяжелых элементов явилось газохроматографическое разделение хлоридов трехвалентных лантаноидов и актиноидов при умеренных температурах, осуществленное впервые благодаря введению в газ носителя паров хлорида алюминия (Т.С.Зварова). Последний образует с разделяемыми соединениями газообразные комплексы типа Am (Al₂Cl₇)₃ и др., не существующие в конденсированной фазе.

Были проведены систематические исследования термохроматографического поведения окислов, оксогалогенидов и галогенидов переходных элементов 4–10 групп Периодической системы Менделеева (Б.Айхлер, В.П.Доманов, В.З.Белов, Б.Л.Жуйков) и выполнены первые поиски элементов 107, 108, 110 как продуктов реакций горячего слияния (Cf + Ne, Bk + Ne, U + Ar) в химически изолированных фракциях элементов – аналогов. Опыты не были успешными, так как сечения реакций и времена жизни искомым изотопов оказались значительно ниже, чем ожидалось в то время (70–80-е годы).

Похожими по сути, но отличающимися по технике эксперимента являлись исследования термохроматографии атомов металлических элементов. Актиноиды и лантаноиды требуют металлических колонок, высоких температур и предельной чистоты газовой среды (H₂, He). В ЛЯР впервые осуществлена газовая хроматография Cf и получено экспериментальное свидетельство того, что этот элемент является двухвалентным металлом (З.Хюбнер). Наибольшее внимание уделялось *p*-элементам 12–18 групп, т. е. ряду от Hg до Rn как предполагаемым аналогам сверхтяжелых элементов 112–118. Они сравнительно (с металлами других типов) летучи и химически малоактивны, что позволяет отделять их в элементарном виде от большинства других и металлов и неметаллов. Их энергия адсорбции сильно зависит не только от природы адсорбируемого металла, но и от материала колонки. Вопрос изучался экспериментально, и результаты весьма успешно интерпретируются в предложенной (Б.Айхлер) полуэмпирической модели и схеме расчета. Результаты исследований с модельными элементами легли в основу различных экспериментальных попыток химического выделения СТЭ из облученных мишеней, а также в процессе поисков СТЭ в природных материалах (Б.Жуйков, Т.Реец).

В конце 2001 года была выполнена первая попытка химической идентификации ²⁸³112 (*T*_{1/2} = 3 мин) как химического аналога ртути на аппаратуре, показанной на рис. 10. Атомы отдачи из тонкой мишени были заторможены в непрерывном потоке гелия, в котором атомарное состояние ртути устойчиво. Ее единичные атомы вместе с элементом 112 могут без потерь транспортироваться газом при комнатной температуре к удаленным на 25 метров от мишени детекторам спонтанного деления. Это обеспечивает быстрое (~20 с), непрерывное и селективное выделение ртути, остальные тяжелые металлы нелетучи и адсорбируются на стенках газового тракта. Используются детекторы двух типов. Это пассивированные ион-имплантированные кремниевые детекторы (PIPS), на поверхность которых был напылен тонкий слой золота,



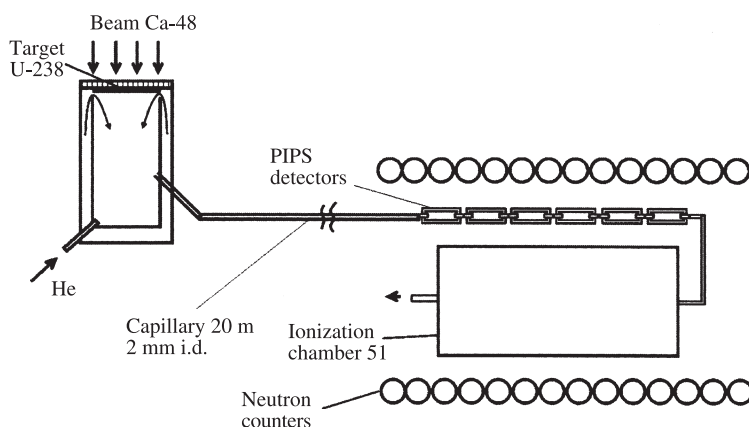


Рис. 10. Схема химической идентификации элемента 112

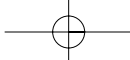
извлекающий (прочно сорбирующий) из газа ртуть (и «эка-ртуть») при комнатной температуре. Если же элемент 112 не «эка-ртуть», а, скорее, «инертный металл» с летучестью, близкой к Rn, и не адсорбируется на Au, тогда он попадает с газом-носителем в объем специальной проточной ионизационной камеры, настроенной на селективное детектирование осколков деления. Для надежной идентификации актов спонтанного деления детекторы осколков деления PIPS и ионизационная камера были окружены системой нейтронных счетчиков (^3He) в замедлителе, которые обеспечивали регистрацию нейтронов спонтанного деления (см. рис. 10).

Выход атомов ртути, образующейся в реакции ионов ^{48}Ca с неодимом, на PIPS детекторах контролировали и измеряли по альфа-распаду ^{185}Hg ($T_{1/2} = 49$ с).

Интегральная доза за четыре календарных недели облучения составила $3,5 \cdot 10^{18}$. Полупроводниковые детекторы не зарегистрировали событий совпадения двух больших импульсов на противоположных детекторах, сопровождающихся отсчетами нейтронов, в то время как ионизационная камера зарегистрировала восемь импульсов от осколков деления, сопровождающихся регистрацией от одного до трех нейтронов. Фон камеры равнялся одному импульсу в месяц. Таким образом, с высокой вероятностью зарегистрировано несколько событий распада элемента 112 и сделан вывод, что этот элемент намного более летуч, чем ртуть. Это, скорее всего, проявление релятивистских эффектов в химических свойствах (А.Б.Якушев, И.Звара, Ю.Ц.Оганесян и др.).

10. Прикладные исследования

Академик Г.Н.Флёрв был выдающимся ученым, успешно работавшим и над фундаментальными проблемами ядерной физики, и над практическим применением полученных в этой области знаний. Именно благодаря его неутомимой энергии и настойчивости прикладные исследования в ЛЯР стали одним из важных направлений



деятельности коллектива лаборатории. В середине 70-х годов Г.Н.Флёров организует в ЛЯР отдел прикладной ядерной физики (ОПЯФ).

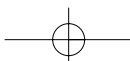
Вначале основная деятельность ОПЯФ была сосредоточена на разработке трековых мембран (ядерных фильтров) и проблем радиационного материаловедения на основе использования тяжелых ионов. Затем тематика расширилась, включив в себя активационный анализ с использованием ядерных реакций с тяжелыми ионами и рентгеновской флюоресценции, разработку химических методик по извлечению благородных и редких металлов из природных образцов, а в дальнейшем разработку методов получения ультрачистых радиоизотопов. Важно отметить, что проводимые работы не замыкались только на непосредственное применение в практике, но и имели самостоятельное фундаментальное значение для тех областей науки, где проводилось внедрение полученных результатов.

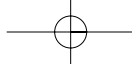
Характерной особенностью ускоренных тяжелых ионов является то, что при прохождении через вещество они создают в нем треки, в которых плотность радиационных повреждений материала в миллионы раз превышает радиационную дозу, создаваемую другими типами излучения. Материал в треках по существу изменяет свои макроскопические свойства. Благодаря этому появляется возможность создавать в материале гетерогенные микро- и нанометрические структуры.

Типичным примером является изготовление с помощью тяжелых ионов трековых мембран. Они представляют собой сита на основе полимерной пленки с плотностью пор, варьирующей в пределах 10^6 – 10^9 на квадратный сантиметр. При этом все поры имеют одинаковые диаметры с разбросом не более 5%. Основой технологии является то, что материал трека имеет растворимость в соответствующих химических реагентах, превышающую в ~ 1000 раз растворимость исходного материала. Благодаря этому на месте трека вытраивается сквозное отверстие или полость. Трековые мембраны являются уникальными фильтрами, которые успешно применяются при изготовлении электронных микросхем в микробиологии для стерилизации бактериальных сред и сепарации микрообъектов, в бытовых фильтрах для очистки питьевой воды. В ЛЯР действует участок изготовления трековых мембран производительностью до 50 тыс. м² в год. Ведется разработка трековых мембран нового поколения. Создана новая технология, позволяющая задавать порам различную форму: конусообразную, сигарообразную, в форме песочных часов. Разрабатываются так называемые «умные» мембраны, способные менять свою проницаемость в зависимости от приложенного электрического напряжения.

Тяжелые ионы были использованы также для радикальной модификации поверхности полимерных материалов. Путем облучения ионами и последующей обработки химическими реагентами поверхности полимера удается резко увеличить ее площадь. Это открывает возможность создания новых материалов для изготовления конденсаторов с высокой электрической емкостью при малых размерах. С использованием подобных материалов были созданы малогабаритные рефрижераторные элементы.

В области радиационного материаловедения работы направлены на изучение радиационного воздействия на металлы и монокристаллы. Актуальность этих исследований определялась необходимостью прогнозировать изменение свойств конструкционных материалов, используемых в атомном реакторостроении. Высокая дефектообразующая способность тяжелых ионов позволяет за десятки часов достичь





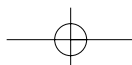
радиационных доз, эквивалентных годовому облучению материала в нейтронном потоке. Были исследованы такие явления, как радиационное упрочнение и распухание, радиационная диффузия примесей, влияние структуры радиационных дефектов, изменение люминесцентных свойств монокристаллов. Все эти данные открывают путь к более глубокому пониманию механизмов дефектообразования и его влияния на макроскопические свойства материалов.

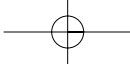
В настоящее время работы по радиационному материаловедению направлены на решение проблем интенсивно развивающейся нанотехнологии. Целью этих исследований является формирование монодисперсных нановыделений вторичных фаз в твердых телах при многоэлементной ионной имплантации, формирование и изучение свойств одномерных металлических наноструктур с помощью ионно-трековой микротехнологии. Исследования ведутся на высоком уровне с использованием современных методов: просвечивающей электронной микроскопии, сканирующей электронной и туннельной микроскопии, атомной силовой микроскопии.

Другим важным направлением прикладных исследований являются работы в области наук о жизни, в которых разрабатываются радиоаналитические и радиоизотопные методы для применения в ядерной медицине, в биомедицинских и экологических исследованиях. Характерным примером этих исследований является получение изотопа плутония ^{237}Pu для исследований метаболизма плутония в человеческом организме, проводившихся совместно с Harwell Lab. (Великобритания). Этот уникальный изотоп с периодом полураспада 45 дней испытывает К-захват и дает мягкое рентгеновское излучение, безвредное для организма.

Прикладные работы, проводимые в ЛЯР, привлекли к себе внимание стран-участниц ОИЯИ. В 1993 году отдел ОПЯФ был реорганизован в Центр прикладной физики – ЦПФ, функционирующий на внебюджетной основе. За прошедшее время в работах ЦПФ приняли участие ученые из Болгарии, Венгрии, Вьетнама, Германии, Кубы, Монголии, КНДР, Польши, Чехии и Словакии. Лаборатория стала по существу школой, через которую прошли десятки специалистов, получивших практический опыт. На его основе созданы национальные центры в Монголии, Вьетнаме, Словакии. Осуществляется сотрудничество с научными учреждениями и организациями других стран. Особенно активно оно проводится с Costar Inc., Corning Corp., Analytic Inc. (США); Harwell Lab. (Великобритания); GSI и Fractal (Германия).

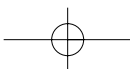
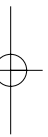
Важное место в тематике ЛЯР занимает создание специализированных ускорителей для научных центров в разных странах. Эти ускорители проектируются с ориентацией не только на фундаментальные исследования, но и на прикладные задачи. Определяющим было участие ЛЯР в создании циклотрона тяжелых ионов У-200 при Варшавском университете, циклотрона Института атомной физики в Белграде, в создании ускорительного комплекса DC-72 для Циклотронного Центра Словацкой Республики (Братислава). На очереди ускорительный комплекс DC-60 Евразийского университета (Астана, Казахстан). Участие ЛЯР в создании этих ускорительных центров заключается не только в передаче опыта, но и в непосредственном проектировании и изготовлении основных узлов ускорителей. Серьезную поддержку и помощь в развитии данного направления оказывает дирекция ОИЯИ. Важно также отметить, что прикладные работы дали дополнительное финансирование научных исследований, проводимых в ЛЯР.





11. Заключение

На протяжении полувека Лаборатория ядерных реакций ОИЯИ прочно занимает позиции одного из ведущих научных центров мира в ядерно-физических исследованиях с тяжелыми ионами. Открытия в области синтеза и изучения физических и химических свойств трансактиноидных и сверхтяжелых элементов, механизмов ядерных реакций, получения и изучения свойств экзотических ядер и новых видов распада ядер, а также пионерские работы в области прикладных исследований с тяжелыми ионами получили широкое международное признание. Можно надеяться, что реализация семилетнего плана развития ОИЯИ на 2003–2009 годы позволит и дальше сохранить Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флёрова лидирующее положение на главных направлениях ядерно-физических исследований с тяжелыми ионами низких и промежуточных энергий.



Международные совещания



Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов, Алушта, 1983 г.



Международный семинар в ЛЯР



Международная конференция по динамике столкновения ядер при низких энергиях, Санкт-Петербург, 1995 г.



Г.Н.Флёров, И.Звара, А.Гиорсо на конференции в Лаборатории им. Лоуренса (Беркли)

Контакты



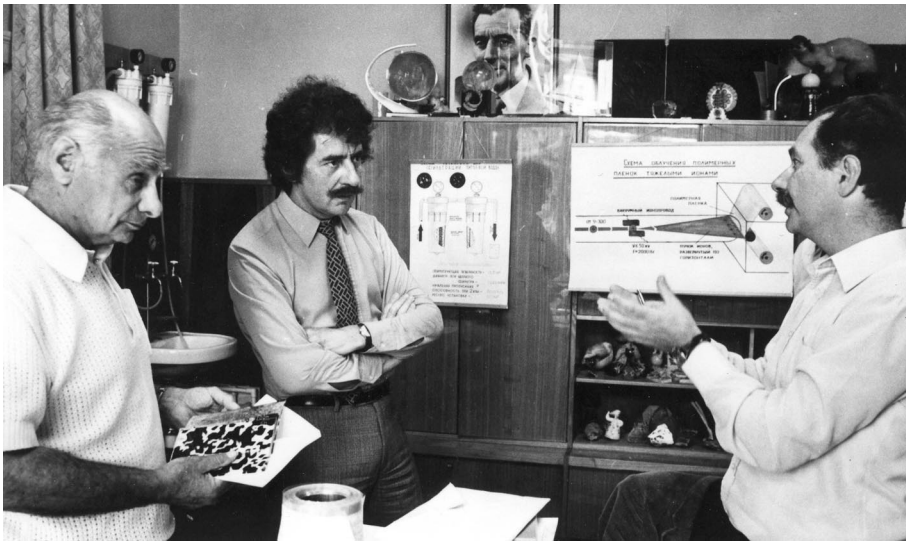
Г.Н.Флёров, Ю.Ц.Оганесян, Г.Т.Сиборг в ЛЯР ОИЯИ



У полюса магнита строящегося У-400. Слева направо: Е.Д.Воробьев, В.А.Карповский, Г.Н.Флёров, Г.Т.Сиборг, Ю.Ц.Оганесян, А.М.Петросьянц, Н.Н.Боголюбов, Х.Христов



Ю.Ц.Оганесян, Г.Мюнценберг (GSI, Дармштадт)



Г.Н.Флёров, К.Деграз (Франция), Г.Сенеш (Венгрия)



Н.Н.Боголюбов вручает премию ОИЯИ Г.Н.Флёрову



Г.Н.Флёров и Ю.С.Оганесян во время посещения КНР



Ю.Ц.Оганесян и М.Г. Иткис, 2003 г.



На 85-летию со дня рождения Г.Н.Флёрова
Сидят слева направо: М.И.Подгорецкий, В.П.Джелепов, Р.Позе, Ю.Г.Абов,
В.В.Волков, Ф.Легар
Стоят: Ю.Э.Пенионжкевич, И.И.Звара, школьники, М.И.Цулая, А.Тончев,
Ц.Д.Вылов, Ю.Ц.Оганесян, Б.И.Пустыльник, С.А.Бабаев, Д.В.Ширков,
В.М.Жабицкий, М.Г. Иткис