

кого γ -излучения. Третье звено — реакторы на расплавленных солях. Они имеют существенные преимущества перед традиционными по безопасности, так как работают при низком давлении, по чистоте, так как продукты деления устраниаются непрерывно, по совершенству топливного цикла, так как нет необходимости изготовления твэлов и их переработки, по эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую из-за высокой рабочей температуры расплава, по разделению отходов, так как имеется возможность физической сепарации. Четвертое: газотриодный метод переработки ядерного топлива. Он не дает жидких радиоактивных отходов и имеет более высокую радиационную стойкость применяемых реагентов.

Конечно, каждое из этих звеньев и тем более вся цепочка перспективных видов ядерной технологии, вся эта картина может быть воплощена в жизнь лишь на основе дальнейших фундаментальных исследований, в том числе ядерно-физических. Как показывает жизнь (приведенные здесь примеры), такие исследования должны продолжаться широким фронтом, охватывая, как и до сих пор, физику деления, физику других ядерных реакций и ядерную спектроскопию. Нет кризиса жанров нашей физики, есть кризис финансов.

Но нет ничего прибыльнее, чем хорошая наука. И чистая ядерная энергетика — это чистая прибыль чистой науки.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ЯДЕРНАЯ АСТРОФИЗИКА В РАДИЕВОМ ИНСТИТУТЕ

Ложкин О.В. (Радиевый институт им. В.Г. Хлопина)

В начале 20-х годов Радиевый институт был одним из немногих научных учреждений, где были организованы исследования атомного ядра и начато изучение природы ионизирующего излучения в атмосфере. Это были годы, когда физика атомного ядра только зарождалась, а существование космического излучения внеземного происхождения еще подвергалось сомнению. В физике только начинали формироваться представления о строении ядер атомов, открытых Э. Резерфордом в 1919 г., и оставалось еще 10 лет до открытия нейтрона (Дж. Чедвик, 1932) и протонно-нейтронной модели ядра (Д.Д. Иваненко, 1932).

Часть работ этого начального периода в истории института привела к становлению и развитию в институте исследований, относящихся в настоящее время к ядерной физике высоких энергий и ядерной астрофизике (включая космическое излучение, космохимию и космохронологию). В начале 20-х годов под руководством Л.В. Мысовского начинает выполняться программа экспериментальных исследований ионизирующего излучения в атмосфере. Изучается широтная зависимость интенсивности излучения, измеряются коэффициенты ослабления излучения в воде (опыты на Онежском озере на глубине до 10 м), во льду и свинце, исследуется направленность излучения (эксперимент с водонапорной башней ленинградского Политехнического института, как фильтром), впервые обнаруживается барометрический эффект (Л.В. Мысовский, Л.Р. Тувим, 1926). Полученные данные укрепили утверждения о внеземном космическом излучении и сильном отличии его поглощения в веществе от поглощения γ -излучения. В 1928 г. Мысовский публикует первую в СССР монографию «Космические лучи», в которой подводит итоги исследований. Большое значение имели измерения на большой высоте, проведенные сотрудниками института. С.Н. Вернов разрабатывает новую методику и проводит наблюдения космического излучения в верхних слоях атмосферы с помощью радиозондов на разных широтах, включая тропики (1934). А.Б. Вериго совершает свой знаменитый полет на стратостате «СССР 1-бис» для наблюдений космического излучения (1935), проводит измерения широтного эффекта в высоких широтах во время экспедиции на ледоколе к Земле Франца-Иосифа.

К первому десятилетию института относится теоретическое исследование Г.А. Гамова по квантово-механической теории α -распада как туннельного эффекта (1928), которое имело большое значение для физики ядра и ядерной астрофизики. Эта работа, как и появившаяся в то же время работа Р. Герни и Э. Кондона, дала возможность объяснить низкоэнергетические ядерные процессы в звездах как источники их светимости. В 1932 г. Г.А. Гамов публикует первую в СССР монографию «Строение атомного ядра и радиоактивность». В 1935 г. выходит в свет монография Л.В. Мысовского «Новые идеи в физике атомного ядра».

Для исследования взаимодействия космического излучения с атомными ядрами большое значение сыграла разработка в Радиевом институте нового метода — метода толстослойных фотопластинок, предложенного Л.В. Мысовским для изучения α -распада в 1925 г. Были проведены работы по технологии изготовления фотоэмульсий с высокой концентрацией бромистого серебра с толщиной слоя 50 мкм и осуществлена регистрация α -частиц (Л.В. Мысовский, П.И. Чижов, 1927). Этим было положено начало широкому использованию метода ядерных фотоэмульсий, остающегося и в настоящее время эффективным средством исследований в физике ядра и элементарных частиц. В 30-е годы фотоэмульсии начинают успешно применять для исследования взаимодействий космического излучения с атомными ядрами. Уже первые наблюдения показали интересные характеристики ядерных расщеплений под действием космического излучения: большую множественность вторичных частиц и наличие среди них частиц с зарядом больше, чем у гелия (И.И. Гуревич, А.П. Жданов, А.Н. Филиппов, 1938). Исследуются необычные ливни из большого числа заряженных частиц в фотоэмульсии (А.П. Жданов, 1939) и полные расщепления ядер серебра (А.П. Жданов, Н.А. Перфилов, М.Ю. Дейзенрот, 1944). В 40-е годы в Радиевом институте проводится поиск ядерных расщеплений при захвате отрицательных мезонов (открытых Андерсоном и Неддермейером в 1938 г.) ядрами в фотоэмульсии для оценки массы мезонов по балансу энергии в наблюдаемых «безимпульсных» расщеплениях. Была получена масса 140—200 me — массы электрона (П.И. Лукирский, Н.А. Перфилов, 1945) еще до открытия пионов в 1947 г. Впервые было сообщено о наблюдении ядерного расщепления в эмульсии при поглощении тяжелого мезона массой около 1220 me , указано на существование нейтрального мезона массой 400 me . В последующие годы исследования ядерных взаимодействий космического излучения существенно расширяются. Были получены интересные результаты о множественном рождении частиц, об образовании изотопов гелия в космическом излучении и угловых распределениях ливневых частиц в протон- и α -ядерных ливнях.

В Радиевом институте сформировалось свое оригинальное направление в физике космического излучения, связанное с ядерным взаимодействием при релятивистской энергии, когда неожиданно в 1964 г. исследования космического излучения были прекращены. Однако наступала уже космическая эра, и потребовалось прогнозирование влияния космического излучения на человека и аппаратуру в космосе. В институте возобновляется изучение космического излучения. Новые исследования, предпринятые в Радиевом институте в конце 60-х годов в сотрудничестве с Институтом медико-биологических проблем, охватывают многие вопросы взаимодействия космического излучения с веществом и дозиметрии излучения в космических кораблях и открытом космосе (В.Е. Дудкин, З.С. Хохлова, Н.С. Шиманская, Н.Р. Новикова, В.И. Захаров, Н.П. Кочеров, Р.М. Яковлев и др.). В 1968 г. состояние данной проблемы было подытожено в первой в мире монографии «Ядерные взаимодействия в защите космических кораблей» (Е.Е. Ковалев, В.Е. Дудкин, О.В. Ложкин, В.И. Остроумов и др.). На основе исследований нейтронного фона была опубликована монография «Естественный нейтронный фон атмосферы и земной коры» (Г.В. Горшков, В.А. Зябкин, Н.М. Лятковская, О.С. Цветков, 1966). Изучались процессы образования нейтронов под действием космического излучения у поверхности Земли и на глубине до 1000 м вод. экв. Была разработана методика измерений космического излучения, вызывающего вспышки в

глазах космонавтов, на основе изготовленных в институте монокристаллов AgCl (Н.П. Кочеров, А.В. Воронов), созданы приборы для измерения нейтронного фона планет Солнечной системы при полетах космических кораблей (Р.М. Яковлев, В.Г. Ляпин, И.О. Цветков).

Исследования космического излучения не исчерпывают вклад Радиевого института в ядерную астрофизику. Фундаментальные работы по ядерной геохронологии, развитие ядерных методов определения возраста геологических формаций, организованные В.И. Вернадским и В.Г. Хлопиным, привели к становлению и космохронологии, и изотопной космохимии, играющих огромную роль в современной космологии. В Радиевом институте были развиты новые ядерные методы определения возраста геологических формаций — аргоновый и ксеноновый. С 1935 г. работает лаборатория по определению возраста пород радиоактивными методами под руководством И.Е. Старика. Радиевый институт на протяжении многих лет был руководящим центром в СССР по определению возраста пород радиоактивными и изотопными методами. В 1961 г. выходит в свет монография И.Е. Старика «Ядерная геохронология».

С 1953 г. в институте осуществляются исследования космохронологического плана по определению возраста метеоритов. Измеряли распространение и изотопный состав урана и свинца в различных классах метеоритов и тектитов (И.Е. Старик, К.А. Петржак, М.М. Шац, Э.В. Собонович, М.А. Бак, А.В. Ловцюс, Г.П. Ловцюс, И.Н. Семенюшкин и др.). Были получены данные о возрасте для большого числа каменных и железных метеоритов и установлено совпадение с вероятным значением возраста Земли. В 1964 г. была предложена схема эволюции метеоритного вещества, учитывающая его происхождение как в солнечной, так и в досолнечной системах.

Большое значение для ядерной астрофизики и космохимии имеют экспериментальные исследования ядерных реакций в широком диапазоне энергии, дающие представление об эволюции изотопного состава межзвездного вещества в результате космического облучения и об образовании некоторых элементов, рождение которых в нуклеосинтезе маловероятно (так называемые обойденные нуклиды). В Радиевом институте проведено экспериментальное изучение изотопного состава ксенона в мишенях, облученных высокоэнергетическими протонами, для сравнения с метеоритными данными (Ю.А. Шуколюков), анализировали механизм ядерных реакций, которые могут участвовать в нуклеосинтезе, включая реакции под действием нейтрино; рассматривали вопросы (Re—Os)-космохронологии и систематики сечений фрагментации ядер под действием космического излучения. Я.М. Крамаровским и В.П. Чечевым опубликованы монографии «Радиоактивность и эволюция Вселенной» (1978) и «Синтез элементов во Вселенной» (1987).

Эксперименты с космическим излучением легли в основу ядерной физики высокой энергии. В Радиевом институте исследования на ускорителе частиц высокой энергии были начаты непосредственно после ввода в эксплуатацию синхротронотрона на 660 МэВ в Дубне — самого крупного ускорителя в мире в свое время. Для развития работ в этой области большое значение имело решение Президиума АН СССР в 1950 г. об учреждении новой лаборатории в Радиевом институте для исследования ядерных реакций при высокой энергии, заведующим которой назначается Н.А. Перфилов. За полувековой период исследований на ускорителях высокой энергии в Радиевом институте постоянно расширялась тематика работ и совершенствовалась методика. В те или иные годы в исследованиях участвовали сотрудники других отделов и лабораторий института.

Первые исследования реакций при высокой энергии были проведены с помощью двух методов: фотометода и радиохимии, хорошо развитых в Радиевом институте к началу 50-х годов. Радиохимическое изучение реакций глубокого расщепления под действием частиц большой энергии было инициировано в 1951 г. директором института Б.А. Никитиным. Изобретение особомелкозернистых ядерных фотоэмульсий Н.А. Перфиловым в 1948 г., разработка способов изготовления эмульсий с различными свойст-

вами и методов введения исследуемых элементов в фотослой существенно расширили возможности фотометода в ядерных исследованиях (А.П. Жданов, Н.А. Перфилов, Н.Р. Новикова, Е.И. Прокофьева, Л.И. Шур, Е.В. Фаина, И.М. Кукс, Н.П. Кочеров, В.И. Захаров, В.С. Быченков и др.).

Первое использование фотометода в Дубне позволило провести эксперименты на малоинтенсивных пучках пионов на синхротронном ускорителе по изучению захвата медленных отрицательных пионов тяжелыми ядрами (Н.А. Перфилов, Н.С. Иванова, О.В. Ложкин, В.П. Шамоу). Н.А. Перфилов и Н.С. Иванова впервые наблюдают деление ядер урана при захвате пионов (1950 г.), почти одновременно это же было сделано И.М. Франком и Г.В. Беловицким. В первых работах были определены вероятность деления ядер от урана до вольфрама, распределение осколков деления по пробегаем, множественность частиц, сопровождающих деление. Эти исследования показали большую роль симметричной моды деления высоковозбужденных ядер и независимость кинетической энергии осколков деления от энергии возбуждения. Был выяснен механизм возбуждения ядер пионами.

В первых работах по изучению реакций под действием протонов энергией 480 и 660 МэВ, проведенных как с помощью метода ядерных эмульсий, так и радиохимии, была определена вероятность деления и расщепления ядер от тантала до урана и впервые дана оценка делимости ядер серебра. В фотоэмульсионных работах впервые получены оценки энергии возбуждения ядер в неупругих протон-ядерных взаимодействиях при высокой энергии (В.И. Остроумов, 1953). В радиохимических исследованиях было измерено большое число продуктов реакций глубокого расщепления и деления ядер La, Ta, Pb, Bi и U, впервые в подобных исследованиях использовали мишени из разделенных изотопов ^{63}Cu и ^{65}Cu . Радиохимические исследования позволили сделать выводы о средних потерях заряда и массы в реакциях глубокого расщепления. Эти исследования потребовали разработок уникальных химических методов быстрого выделения малого количества короткоживущих радиоактивных изотопов (Б.А. Никитин, А.Н. Мурин, Б.К. Преображенский, И.А. Ютландов, А.В. Калямин, М.А. Якимов, Л.Н. Москвин, В.И. Барановский и др.).

После получения первых результатов по делению ядер под действием пионов и протонов в Радиовом институте осуществляется широкая программа исследований по физике деления при высокой энергии возбуждения, которая продолжается и в настоящее время. Изучение деления ядер от урана до серебра было проведено при энергии протонов от 70 до 9000 МэВ и под действием многозарядных ионов C, O, Ne и Ar энергией около 10 МэВ/нуклон. Используются различные методы: масс-спектрометрия в линию с ускорителем, ядерные фотоэмульсии, трековые детекторы CR-39, пробойные счетчики. Установлена универсальная зависимость вероятности деления ядер от параметра делимости при высокой энергии протонов (Н.А. Перфилов, 1961), изучены массовые и угловые распределения осколков деления и их энергетические спектры, получены функции возбуждения деления в широкой области энергии протонов, проанализированы эффекты больших угловых моментов и энергии возбуждения и влияние ядерной структуры на процесс деления, изучено деление релятивистских ядер (Н.А. Перфилов, В.П. Шамоу, А.И. Обухов, Б.Н. Беляев, В.Д. Дмитриев, О.Е. Шигаев, В.С. Быченков, В.Д. Домкин, А.Н. Смирнов, В.П. Эйсмонт, В.А. Плющев и др.).

Эксперименты, выполненные на ускорителях высокой энергии, показали, что неупругое взаимодействие частиц высокой энергии со сложными ядрами, когда длина волны частиц меньше расстояния между нуклонами в ядре, может быть понято в рамках процесса последовательного квазисвободного рассеяния падающих частиц на отдельных нуклонах ядра. Обсуждение подобных представлений в Радиовом институте было инициировано П.И. Лукирским еще в 1951 г. Для расчета первой стадии реакции в этой модели — внутриядерного каскада М. Гольдбергером в начале 50-х годов был разработан феноменологический подход с использованием метода случайных испытаний. Модель внутриядерного каскада сыграла большую роль при анализе реакций при

высокой энергии. Что касается Радиевого института, то первые расчеты каскадного процесса в 1956—1958 гг. были проведены при анализе результатов трех различных экспериментов: деление ядер урана при захвате отрицательных пионов (И.И. Пьянов), взаимодействие быстрых дейтронов с ядрами ^{12}C (Ф.Г. Лепехин) и расщепление ядер ^{12}C протонами энергией 660 МэВ (П.И. Федотов). В последующие годы расчеты по каскадно-испарительной модели широко используют при анализе экспериментальных данных. В 80-е годы была проведена важная работа по развитию модели внутриядерного каскада на основе единого теоретического подхода — метода кинетических уравнений (Г.В. Матвеев, В.Е. Бунаков, С.Г. Явшиц, В.А. Рубченя). Дальнейшее развитие теоретических моделей ядерных процессов в рамках той же барион-мезонной ядерной динамики в 90-е годы проводили с позиций квантовой молекулярной динамики (А.Б. Фокин), гидродинамической модели (А.Т. Дьяченко) и статистического приближения (М.Д. Зубков).

Начиная с середины 50-х годов большой цикл работ Радиевого института по ядерной физике высокой энергии составляют исследования фрагментации и мультифрагментации атомных ядер. Впервые в 1954 г. были определены характеристики нового ядерного явления при неупругом взаимодействии частиц высокой энергии с ядрами — явления образования многозарядных ($Z > 3$) фрагментов (О.В. Ложкин, Н.А. Перфилов), которое в дальнейшем получило название фрагментации ядер. Уже первые наблюдения при энергии протонов 660 МэВ выявили характерные черты фрагментации ядер: широкое зарядовое распределение фрагментов, наличие событий множественного их образования, особенности функций возбуждения и A -зависимости сечений фрагментации. Исследования фрагментации и деления при взаимодействии частиц высокой энергии с ядрами освещаются в первом обзоре по этой проблеме в УФН (Н.А. Перфилов, О.В. Ложкин, В.П. Шамоу, 1960) и в первой в мировой литературе монографии «Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий» (Н.А. Перфилов, О.В. Ложкин, В.И. Остроумов, 1962).

Введение в действие в 1957 г. синхрофазотрона на энергию 10 ГэВ в Дубне позволило продолжить исследования фрагментации ядер и других проблем при большей энергии протонов и мезонов. В это же время был проведен эксперимент по фрагментации ядер при энергии протонов 930 МэВ, когда специальные эмульсии, изготовленные в Радиевом институте, были облучены Дж. Фремлиным на Бирмингемском протонном синхротроне. Это первое совместное исследование с зарубежным научным центром уточнило информацию об энергетической зависимости сечений фрагментации и зарядового распределения фрагментов (О.В. Ложкин, Н.А. Перфилов, Дж. Фремлин, А.А. Римский-Корсаков, 1960).

Важную информацию о механизме фрагментации ядер дали измерения двойных дифференциальных сечений образования фрагментов ^8Li из ядер в большом диапазоне массовых чисел Be, C, Al, V, Au и Th при использовании методики вакуумной камеры реакций с фотоэмульсиями как детекторами. Были определены основные параметры источников фрагментов (температура, скорость, кулоновский барьер) в рамках испарительного приближения и дана оценка роли нестатистических процессов образования фрагментов из тяжелых ядер (В.В. Авдейчиков, В.И. Богатин, О.В. Ложкин, Н.А. Перфилов, Ю.П. Яковлев, 1964).

Особый интерес привлекло к себе явление мультифрагментации ядер, когда в событии неупругого ядерного взаимодействия образуется несколько фрагментов с $Z > 3$. Исследования при релятивистской энергии протонов и пионов впервые дали представление о функциях возбуждения множественного образования фрагментов, их зарядовом распределении и корреляции характеристик при мультифрагментации.

Значительные успехи в исследованиях фрагментации ядер были достигнуты в 70—80-е годы в экспериментах с использованием новой экспериментальной техники. В этот период были созданы и освоены электронные методы изучения процессов образования фрагментов промежуточной массы из ядер-мишеней непосредственно на пуч-

ках частиц высокой энергии: на выведенном пучке протонов энергией 660 МэВ синхроциклотрона ЛЯП и внутренних пучках протонов, дейтронов и α -частиц энергией от 2 до 15 ГэВ синхрофазотрона ЛВЭ в Дубне. Успешное применение для идентификации Z и A фрагментов метода dE — E -детекторов обеспечила разработка в Радиевом институте новой технологии изготовления тонких (до 6 мкм) поверхностно-барьерных полупроводниковых кремниевых детекторов с высокой однородностью по толщине (В.В. Авдейчиков, О.В. Ложкин, 1970). Измерения дисперсии потерь энергии тяжелых ионов от гелия до аргона при прохождении через dE -детекторы показали, что кремниевые детекторы обладают предельно возможным энергетическим разрешением.

Применение метода dE — E -детекторов для изучения фрагментации ядер дало информацию об изотопном составе фрагментов в реакциях при высокой энергии. Широкие изотопные распределения показали, что фрагментация ядер является хорошим средством изучения границы нуклонной стабильности. Пограничные ядра дают уникальную возможность проверки ядерных моделей, развитых для обычных ядер. Их изучение составляет одну из передовых областей физики ядра, имеющей большое значение и для ядерной астрофизики. В Радиевом институте постоянно сохранялся интерес к исследованиям нуклидов вблизи границы стабильности. Еще в 1937 г. А.Е. Полесицкий при изучении короткоживущих нуклидов, образующихся при облучении бериллиевой мишени нейтронами, идентифицировал ^6He . В 1946 г. были предприняты поиски ^5He в природном гелии в эксперименте на циклотроне Радиевского института (М.Г. Мещеряков, Т.И. Хренина). Исследования показали полное отсутствие ^5He в гелии любого происхождения ($< 10^{-14}$), что объяснилось позднее его нуклонной нестабильностью. В 1961 г. в Радиевом институте был открыт самый тяжелый изотоп гелия ^8He среди продуктов фрагментации ядер AgBr в эмульсии, облученной протонами энергией 930 МэВ (О.В. Ложкин, А.А. Римский-Корсаков). Факт двойного β -распада ^8He был подтвержден позднее в Дубне (В.А. Ярба, Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, 1965). Открытие ^8He — изотопа с отношением $N/Z = 3$ явилось, как стало ясно позднее, открытием самого нейтроноизбыточного нуклида в природе, который предсказывался еще в 1960 г. Я.Б. Зельдовичем и В.И. Гольданским. В 1972 г. это открытие было зарегистрировано в Государственном реестре под № 119. Таким образом, из четырех существующих в природе изотопов гелия два открыты в Радиевом институте.

После открытия ^8He возник вопрос о ядерной устойчивости ^{10}He , поискам которого было посвящено много работ в различных лабораториях. Сотрудники Радиевского института принимали участие в поиске ^{10}He в рамках нескольких экспериментов: в реакциях многонуклонных передач при взаимодействии тяжелых ионов с ядрами, среди продуктов фрагментации ядер ^{232}Th под действием протонов энергией 9 ГэВ, при анализе систематики сечений нейтроноизбыточных изотопов фрагментов. Все эти работы однозначно свидетельствовали о ядерной неустойчивости ^{10}He , что подтвердили последующие работы.

Применение новой экспериментальной методики и проведение измерений на разделенных изотопах ядер-мишеней привело к открытию изотопических эффектов в сечениях фрагментации — специфических изоспиновых корреляций полных сечений образования фрагментов в изотопных парах $^{150,154}\text{Sm}$, $^{112,124}\text{Sn}$, $^{58,64}\text{Ni}$, $^{10,11}\text{B}$ в реакциях при энергии 660 МэВ (В.И. Богатин, В.К. Бондарев, В.Ф. Литвин, О.В. Ложкин, Н.А. Перфилов, Ю.П. Яковлев, 1973).

Обнаружение изотопических эффектов в сечениях фрагментации позволило создать первую феноменологическую модель фрагментации ядер и предложить новый метод термометрии высоковозбужденных ядерных систем. Исследования изотопических эффектов были проведены также в области релятивистской энергии протонов, дейтронов и α -частиц. Изучение изотопических эффектов было распространено на процессы образования заряженных пионов в тех же реакциях. Эксперименты, прове-

денные на мишенях $^{58,64}\text{Ni}$ и $^{112,124}\text{Sn}$ при энергии протонов 660 МэВ, привели к открытию сильных изотопических эффектов в сечениях образования отрицательных пионов и в отношениях выходов пионов разных знаков, что потребовало уточнения модели ядер в расчетах пионообразования.

Начиная с середины 70-х годов в Радиевом институте для изучения фрагментации ядер используют еще два метода: прецизионной масс-спектрометрии в линию с ускорителем, когда ионным источником спектрометра является облучаемая протонами мишень, и γ -спектрометрии для идентификации радиоактивных фрагментов в облученных частицами высокой энергии мишенях. Масс-спектрометрические измерения в линию с синхроциклотроном ПИЯФ на пучке протонов 1 ГэВ дали уникальную информацию о форме и тонкой структуре изотопных распределений различных вторичных продуктов (Li, K, Rb, Sr, Cs) в большом интервале их времени жизни, что позволило обнаружить влияние ядерной структуры и определить четно-нечетные эффекты в сечениях (Б.Н. Беляев, В.Д. Домкин, Ю.Г. Коробулин и др.). Использование прецизионной γ -спектрометрии для идентификации продуктов ядерных реакций в облученной мишени дало возможность измерять полные сечения образования некоторых радионуклидов в области промежуточной массы (^7Be , ^{18}F , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{28}Mg) в широкой области массы ядер-мишеней для уточнения функций возбуждения фрагментации, A -зависимости сечений и изотопных эффектов (А.А. Римский-Корсаков, А.А. Носов, Е.Н. Изосимова, Ю.П. Яковлев).

В Радиевом институте в 70-е годы была усовершенствована методика фотоэмульсионных исследований за счет использования полуавтоматических прецизионных микроскопов и автоматизации обработки измерений треков в эмульсии. Ядерные фотоэмульсии в релятивистской области энергии частиц дали уникальную возможность исследования ядро-ядерных взаимодействий в условиях дискриминации продуктов расщепления ядра-снаряда и ядра-мишени в 4 π -геометрии. Большое значение сыграло объединение отдельных групп из разных институтов при ОИЯИ и Международное сообщество EMU-01, согласование методов измерений. Были детально изучены характеристики неупругих взаимодействий различных релятивистских ядер (p , d , He, Li, C, O, Ne, Si, S, Au, Pb, U) в широком диапазоне энергии от 1 до 200 ГэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии. Проведен сравнительный анализ полных сечений, топологических функций, распределения множественностей вторичных частиц и их кинематических характеристик. Данное направление работ продолжалось и в 90-е годы. Этот большой цикл работ прояснил многие существенные детали неупругих ядерных взаимодействий при суперрелятивистской энергии и способствовал развитию теоретических моделей на новом уровне — кварк-глюонной ядерной динамики.

Важной задачей исследований в 80-е годы явилось получение подробной экспериментальной информации о полных расщеплениях ядер серебра, брома в эмульсии под действием протонов и ионов ^2H , ^4He и ^{12}C с импульсом 4,5 ГэВ/с на нуклон. В этих работах впервые в рамках единого методического подхода изучено большое число характеристик вторичных частиц в предельных расщеплениях ядер серебра, брома (Н.А. Перфилов, В.А. Плюшев, З.И. Соловьева, 1981) и сделаны выводы о природе предельных ядерных расщеплений. Часть работ этого периода была посвящена поискам эффектов ударных волн в ядерном веществе под действием релятивистских ядер. Эксперименты были проведены с помощью ядерных эмульсий и новых детекторов — монокристаллов AgCl (Н.П. Кочеров, А.В. Воронов, А.И. Богданов, Н.А. Перфилов).

В 80-е годы особый интерес приобретают и становятся важным объектом исследования глубоконеупругие протон-ядерные и ядро-ядерные взаимодействия, приводящие к испусканию высокоэнергетических частиц и легких ядер в кумулятивной области кинематических переменных. По существующим представлениям эти вторичные частицы несут информацию о природе высокоимпульсного компонента волновой функции ядра-мишени, локальных свойствах ядерного вещества и связаны с кварковыми степенями свободы. В Радиевом институте исследования были сосредоточены на из-

мерении сложных частиц (нуклидов $^{1,2,3}\text{H}$, $^{3,4,6}\text{He}$ и $^{6,7}\text{Li}$) в кинематически запрещенной для свободного рассеяния области переменных в реакциях под действием протонов энергией 6,6 ГэВ на ядрах C , Cu , $^{112,124}\text{Sn}$. Для описания характеристик фрагментов в кумулятивной области было использовано приближение малонуклонных корреляций в ядрах (М.А. Браун, В.В. Вечернин, О.В. Ложкин, Ю.А. Мурин, 1982). Измерение спектров кумулятивных фрагментов под действием релятивистских α -частиц и протонов показало существование явлений масштабной инвариантности и факторизации сечений при образовании фрагментов, как и при рождении элементарных частиц.

Важное направление работ в Радиевом институте было связано с изучением реакций квазиупругого выбивания нуклонов и кластеров при взаимодействии частиц высокой энергии с ядрами. Проблема нуклонных ассоциаций в ядрах является одной из актуальных в теории ядра до настоящего времени. Начиная с 50-х годов в Радиевом институте изучают различные аспекты простых реакций и кластерной структуры ядер: квазиупругое рассеяние падающих частиц на малонуклонных кластерах в легких ядрах (П.И. Федотов, Ю.И. Серебренников, В.И. Богатин, О.В. Ложкин, В.Н. Кузьмин, Р.М. Яковлев и др.), квазиупругое выбивание α -частиц из периферии ядер Ag , Vg каскадными нуклонами (В.И. Остроумов, Р.А. Филон). Рассматриваются впервые внутриядерные реакции на кластерах в связи с измерением больших передач импульса в простых реакциях и создается модель полюсного механизма образования фрагментов. Изучаются реакции типа $(p, 2p)$ при энергии 180—9000 МэВ и рассматриваются общие вопросы трехчастичных процессов (Е.Л. Григорьев, О.В. Ложкин, З. Марич, В.К. Сусленко, В.И. Кочкин, Р.В. Афанасьева, Ю.П. Яковлев, В.М. Мальцев).

В конце 80-х годов в Радиевом институте было предпринято исследование фазового перехода жидкость—газ при высоком возбуждении ядерной материи. Проведен эксперимент по изучению зависимости формы зарядового распределения фрагментов от энергии падающих частиц на синхрофазотроне ЛВЭ. С помощью телескопа $dE-E$ -детекторов толщиной 6 и 24 мкм были измерены сечения образования фрагментов с $Z = 5-14$ из ядер золота под действием протонов энергией от 2,5 до 7,5 ГэВ и α -частиц от 1,3 до 13,5 ГэВ. В этом эксперименте было получено указание на существование минимума в зависимости параметра зарядового распределения фрагментов от энергии налетающих α -частиц, что может служить сигналом фазового перехода (В.В. Авдейчиков, А.И. Богданов, К.Г. Денисенко, Е.А. Ганза, О.В. Ложкин, Ю.А. Мурин, В.А. Никитин и др.).

Успехи научной деятельности в Радиевом институте в 90-е годы в области физики высокой энергии связаны с активным участием в исследованиях по программам международных сообществ. В конце 90-х годов усиливается интерес к исследованиям явления мультифрагментации ядер, связанного с фундаментальными свойствами барионной материи и ее уравниванием состояния. Сотрудники института принимают активное участие в создании электронного 4л-устройства для изучения мультифрагментации ядер на ускорителе-накопителе CELSIUS в Уппсале в рамках Международного сообщества CNIC, проводят исследования окологорогового мезонообразования в ядро-ядерных взаимодействиях, изучают параметры источников частиц в интерферометрических измерениях, изотопные эффекты в реакциях на тяжелых ионах, массовое распределение остаточных ядер в ядро-ядерных взаимодействиях (В.В. Авдейчиков, О.В. Ложкин, А.И. Богданов, Ю.А. Мурин, А.Б. Фокин, М.Д. Зубков, А.Т. Дьяченко, А.В. Кузнецов, И.Д. Алхазов, В.Г. Ляпин).

Продолжаются работы по ядерной астрофизике: анализируются реакции под действием нейтрино в первичном нуклеосинтезе (Я.М. Крамаровский, В.П. Чечев), изучается взаимодействие антиядер в космическом излучении с веществом (А.Т. Дьяченко, О.В. Ложкин). Предпринимаются исследования природы ядерно-активного компонента космического излучения, вызывающего множественное образование нейтронов в детекторе, который размещен в подземной лаборатории Радиевого института. Эти исследования предполагается включить в программу международного сотрудничества.